

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
Integrace SMR do elektrizační soustavy ČR

Autor práce: **Bc. Stanislav Frasyňuk**  
Vedoucí práce: **Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.**

---

2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2023/2024

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Stanislav FRASYŇUK**  
Osobní číslo: **E22N0019P**  
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**  
Specializace: **Elektroenergetika**  
Téma práce: **Integrace SMR do elektrizační soustavy ČR**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky**

## Zásady pro vypracování

- Proveďte rešerši energetické koncepce a aktuální politiky rozvoje elektrizační soustavy s ohledem na plánovanou výstavbu nových jaderných zdrojů v ČR.
- Zpracujte přehled existujících projektů malých modulárních reaktorů vhodných pro elektrizační soustavu ČR.
- Pro vybranou lokalitu proveďte detailní analýzu umístění nového jaderného bloku malého výkonu.
- Navrhněte potřebné úpravy v lokalitě a proveďte výsledné technicko-ekonomické zhodnocení potenciálu umístění SMR.

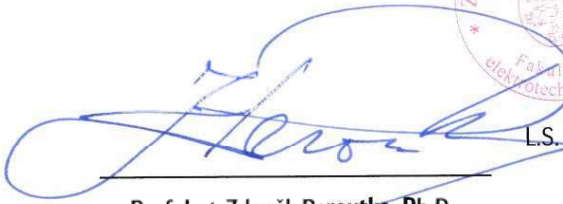
Rozsah diplomové práce: **40-60**  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**



Seznam doporučené literatury:

1. Státní energetická koncepce ČR. Ministerstvo průmyslu a obchodu. Praha 2014.
2. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. International Atomic Energy Agency. Vídeň 2022.
3. Vyhláška 378/2016 Sb. o umístění jaderného zařízení. Státní úřad pro jadernou bezpečnost. Praha 2016.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.**  
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání diplomové práce: **6. října 2023**  
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**

  
**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan

  
  
**Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 6. října 2023

## **Abstrakt**

Předkládaná práce se zabývá vyhodnocením integrace jaderných bloků SMR do elektrizační soustavy ČR. Záměry strategických dokumentů a státu jasně mluví o potřebě jaderných bloků, a to jak výkonově velkých, tak výkonově menších s využitím malých modulárních reaktorů (SMR), kde ČR hodnotí 7 designů určených pro výrobu elektrické energie, případně kogeneraci. V rámci práce jsou tyto dokumenty a strategie analyzovány pro výběr jednoho designu nejvhodnějšího pro podmínky ČR. Vytipovaná lokalita je zhodnocena dle Atomového zákona, který vyžaduje vyhodnocení vlivů z přírody a z činnosti člověka a poté je navrženo projektové řešení s vyvedením výkonu do elektrizační soustavy. Výběr umístění se souběžně hodnotil ekonomickými ukazateli CAPEX a LCOE. Výpočet návratnosti investice se provedl pro čistě elektrickou výrobu a s kogenerací pro teplárenské účely, kde se zkoumal vliv úrokové sazby, investičních nákladů nebo provozních nákladů. Prodej tepla je jednou z možností zlepšení konkurenceschopnosti k velkým blokům, i přesto se SMR jeví jako horší varianta po ekonomické stránce. Svými rozměry, flexibilitou výkonu nebo dobou výstavby se nerovnost vyváží a jejich možnost umístění na brownfield po fosilních zdrojích nabízí způsob, jak zachovat výrobní a regulační kapacitu pro naplnění energetické soběstačnosti.

## **Klíčová slova**

jaderná elektrárna, malý modulární reaktor, SMR, ekonomické náklady, CAPEX, LCOE, Státní energetická koncepce, atomové právo, elektrizační soustava, studie EIA, územní rozhodnutí

## **Abstract**

This master's thesis evaluates the integration of nuclear SMR into the electrical grid of the Czech Republic. Goals of the state strategic documents clearly define the need of big and small nuclear reactors, e.g. small modular reactors (SMRs), where Czech Republic is choosing between 7 designs of SMRs for electricity production, alternatively for cogeneration of heat. From the aforementioned documents an analysis was made to pick the best design for placement in the Czech Republic. Chosen location is then studied by atomic legislation, which requires a detailed analysis of natural and man made effects on nuclear safety, before a project design is made for connecting to the electrical grid. Choice of placement was also analysed using economical parameters of CAPEX and LCOE. Calculations of return of investment were made for both electrical production and combined heat and electricity production with respect to changes in discount rate, capital investments or operating expenditures. Supply of heat is one of the ways for SMRs to compete with big nuclear reactors, nevertheless return of investment in SMR is worse. However, thanks to their size, flexibility in regulation of power or shorter build time, they can make up for this inequality. Their ability to be placed upon brownfield locations left by fossil fuel power plants offers a way how to keep the power production and regulation in the region in order to maintain energy independence.

## **Keywords**

Nuclear Power Plant, Small Modular Reactor, SMR, Economical Expenses, CAPEX, LCOE, State Energy Policy, Atomic Legislation, Electrical Grid, EIA, Zoning Decision

## **Poděkování**

Při vyhotovení této diplomové práce jsem byl veden paní doktorkou Jiříčkovou a panem inženýrem Mašatou, kterým patří největší poděkování. Dále bych rád vyjádřil dík kolegům z řad ČEZ a.s. a Útvaru rozvoje SMR, díky kterým jsem měl k dispozici cenné zkušenosti pro vytvoření této práce.

# Obsah

Úvod .....	- 1 -
1 Rozvoj elektrizační soustavy ČR.....	- 2 -
1.1 Historický vývoj .....	- 2 -
1.2 Parametry elektrizační soustavy .....	- 4 -
1.3 Státní energetická koncepce .....	- 7 -
1.3.1 Starší vydání .....	- 8 -
1.3.2 Nové vydání.....	- 9 -
1.4 Další strategické dokumenty .....	- 12 -
1.4.1 Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR .....	- 12 -
1.4.2 Národní klimaticko-energetický plán .....	- 13 -
1.4.3 Plán pro malé a střední reaktory .....	- 14 -
2 Designy SMR uvažované v ČR.....	- 16 -
2.1 Úvod do SMR.....	- 16 -
2.2 SMR-300 Holtec.....	- 19 -
2.3 BWRX-300 GE-Hitachi .....	- 21 -
2.4 NuScale Power Module .....	- 23 -
2.5 UK SMR Rolls-Royce.....	- 25 -
2.6 NUWARD EDF.....	- 27 -
2.7 SMART KAERI.....	- 29 -
2.8 Westinghouse AP300 .....	- 31 -
2.9 Shrnutí a výběr designu .....	- 33 -
3 Výběr lokality .....	- 36 -
3.1 Temelín.....	- 38 -
3.2 Tušimice .....	- 39 -
3.3 Dětmarovice.....	- 40 -
3.4 Pruněřov .....	- 41 -
3.5 Mělník.....	- 43 -
3.6 Ledvice .....	- 44 -
3.7 Počeradý .....	- 45 -
3.8 Chvaletice .....	- 46 -

3.9	Jiné lokality .....	- 47 -
3.10	Výběr lokality .....	- 49 -
4	Požadavky na umístění .....	- 51 -
4.1	Atomový zákon, Vyhláška č. 378/2016 Sb. a č. 329/2017 Sb. ....	- 52 -
4.2	Stavební povolení .....	- 54 -
4.3	Připojení k ES .....	- 55 -
4.4	Shrnutí požadavků .....	- 57 -
5	Zhodnocení potenciálu .....	- 59 -
5.1	Technické provedení.....	- 59 -
5.1.1	Příprava lokality – Vyhl. 378 a EIA .....	- 59 -
5.1.2	Elektrická část.....	- 64 -
5.1.3	Ostatní infrastruktura .....	- 66 -
5.2	Ekonomika SMR .....	- 68 -
5.2.1	Příprava lokality .....	- 68 -
5.2.2	Elektrická část.....	- 69 -
5.2.3	Ostatní infrastruktura .....	- 70 -
5.2.4	Náklady na výstavbu .....	- 71 -
5.2.5	Návratnost výroby .....	- 72 -
5.2.6	Zjednodušený výpočet LCOE RR: .....	- 74 -
5.3	Ovlivnění ES .....	- 77 -
5.4	Budoucí rozvoj SMR v ČR.....	- 79 -
	Závěr.....	- 81 -
	Literatura .....	- 83 -
	Seznam tabulek.....	- 92 -
	Seznam obrázků.....	- 93 -



## Seznam symbolů a zkratek

### Symbols

$I$	A	<i>elektrický proud</i>
$U$	V	<i>elektrické napětí</i>
$\hat{U}$	V	<i>fázor elektrického napětí</i>
$\hat{I}^*$	A	<i>komplexně sdružený elektrický proud</i>
$\Delta U$	V	<i>úbytek napětí</i>
$X$	$\Omega$	<i>reaktance</i>
$R$	$\Omega$	<i>rezistivita</i>
$f$	Hz	<i>frekvence</i>
$\delta$	°	<i>fázový posun</i>
$P$	W	<i>činný výkon</i>
$Q$	VA <sub>r</sub>	<i>jalový výkon</i>
$S$	VA	<i>zdánlivý výkon</i>
$P_{th}$	W <sub>t</sub>	<i>tepelný výkon</i>
$P_{el}$	W <sub>e</sub>	<i>elektrický výkon</i>
$E$	Wh	<i>vyrobená energie</i>
$t$	h, den, rok	<i>čas</i>
$r$	%	<i>úroková sazba</i>
$I_t$	Kč	<i>investiční náklady</i>
$M_t$	Kč	<i>modernizační náklady</i>
$P_t$	Kč	<i>provozní náklady</i>

### Zkratky

AC	<i>Střídavý proud (Alternating Current)</i>
AZ	<i>Atomový zákon</i>
BWR	<i>Varný reaktor (Boiling Water Reactor)</i>
CAPEX	<i>Investiční náklady (Capital expenditures)</i>
CNSC	<i>Canada Nuclear Safety Commission</i>
CZT	<i>Centrální zásobování tepla</i>
ČGS	<i>Česká geologická služba</i>
DC	<i>Stejnosměrný proud (Direct Current)</i>
DS	<i>Distribuční soustava</i>
DÚR	<i>Dokumentace územních rozhodnutí</i>
EDF	<i>Électricité de France</i>
EIA	<i>Studie dopadu na životní prostředí (Environmental Impact Analysis)</i>

<i>ENTSO-E</i>	<i>Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny</i>
<i>EDU</i>	<i>Elektrárna Dukovany</i>
<i>EK</i>	<i>Evropská komise</i>
<i>EMC</i>	<i>Elektromagnetická kompatibilita</i>
<i>ERÚ</i>	<i>Energetický regulační úřad</i>
<i>ES</i>	<i>Elektrizační soustava</i>
<i>ETE</i>	<i>Elektrárna Temelín</i>
<i>EU</i>	<i>Evropská unie</i>
<i>FOAK</i>	<i>První svého druhu (First of a kind)</i>
<i>FVE</i>	<i>Fotovoltaická elektrárna</i>
<i>GDA</i>	<i>General Design Assessment</i>
<i>GEH</i>	<i>General Electric Hitachi</i>
<i>HČČ</i>	<i>Hlavní cirkulační čerpadlo</i>
<i>HDO</i>	<i>Hromadné dálkové ovládání</i>
<i>CHKO</i>	<i>Chráněná krajinná oblast</i>
<i>CHOPAV</i>	<i>Chráněné oblasti přirozené akumulace vod</i>
<i>IAEA</i>	<i>International Atomic Energy Agency</i>
<i>JE</i>	<i>Jaderná elektrárna</i>
<i>KAERI</i>	<i>Korea Atomic Energy Research Institute</i>
<i>KVET</i>	<i>Kombinovaná výroba elektřiny a tepla</i>
<i>LCOE</i>	<i>Vyrovnané náklady na elektřinu (Levelized Costs of Electricity)</i>
<i>LLI</i>	<i>Komponenta s dlouhou dobou dodání (Long-lead items)</i>
<i>LOCA</i>	<i>Nehoda se ztrátou chladiva (Loss of coolant accident)</i>
<i>LOLE</i>	<i>Ztráta očekávaného zatížení (Loss Of Load Expectations)</i>
<i>MAF</i>	<i>Národní hodnocení zdrojové přiměřenosti</i>
<i>MPO</i>	<i>Ministerstvo průmyslu a obchodu</i>
<i>MŽP</i>	<i>Ministerstvo životního prostředí</i>
<i>NKEP</i>	<i>Národní klimaticko-energetický plán</i>
<i>NJZ</i>	<i>Nový jaderný zdroj</i>
<i>NRC</i>	<i>Nuclear Regulation Commission</i>
<i>NSSC</i>	<i>Nuclear Safety and Security Commission</i>
<i>NTK</i>	<i>Nadrozměrná a těžká komponenta</i>
<i>ONR</i>	<i>Office for Nuclear Regulation</i>
<i>OSN</i>	<i>Organizace spojených národů</i>
<i>OZE</i>	<i>Obnovitelné zdroje energie</i>
<i>PS</i>	<i>Přenosová soustava</i>
<i>PST</i>	<i>Transformátor s regulací fáze (Phase Shifting Transformer)</i>

<i>PÚR</i>	<i>Politika územního rozvoje</i>
<i>PWR</i>	<i>Tlakovodní reaktor (Pressurized Water Reactor)</i>
<i>RR</i>	<i>Rolls-Royce</i>
<i>SEK</i>	<i>Státní energetická koncepce</i>
<i>SKŘ</i>	<i>Systémy kontroly a řízení</i>
<i>SMR</i>	<i>Malý modulární reaktor (Small Modular Reactor)</i>
<i>SP</i>	<i>Stavební povolení</i>
<i>SÚJB</i>	<i>Státní úřad pro jadernou bezpečnost</i>
<i>TPR</i>	<i>Transformátor s příčnou regulací</i>
<i>UK</i>	<i>Velká Británie (United Kingdom)</i>
<i>USA</i>	<i>Spojené státy americké</i>
<i>ÚP</i>	<i>Územní plán</i>
<i>VJP</i>	<i>Vyhořelé jaderné palivo</i>
<i>VS</i>	<i>Vlastní spotřeba (elektrárny)</i>
<i>VTE</i>	<i>Větrná elektrárna</i>
<i>VVER</i>	<i>Vodo-vodní energetický reaktor</i>
<i>vvn</i>	<i>velmi vysoké napětí</i>
<i>WEC</i>	<i>Westinghouse Electric Company</i>
<i>ZEVO</i>	<i>Zařízení pro energetické využití odpadů</i>
<i>ZÚR</i>	<i>Zásady územního rozvoje</i>
<i>zvn</i>	<i>zvlášť vysoké napětí</i>

## Úvod

S plánovanou náhradou fosilních zdrojů – uhlí a zemní plyn – v následujících dvou dekádách a uznáním jaderné energie za zelenou energii, došlo k rozšíření zájmu o jaderné elektrárny jako stabilní zdroj čisté energie. Obzvláště v Evropě, kde se plánuje snižování uhlíkových emisí do roku 2050 na uhlíkově neutrální úroveň, se rozmohla podpora obnovitelných zdrojů energie (OZE). Nicméně tyto zdroje mají zásadní nevýhodu, a to v časové dostupnosti výkonu v průběhu dne a roku. Potenciál obnovitelných zdrojů a jejich vliv na síť jsou limitujícími faktory pro využití v ČR, čímž nám zbývají jaderné zdroje. Zakázka na dostavbu velkých bloků je v procesu ale instalovaný výkon a jejich umístění nevyřeší vzniklé problémy v elektrizační soustavě po plánovaném odstavení uhelných bloků v západních Čechách.

Až na několik výjimek se ve světě potkáme s provozem jen velkých jaderných bloků pro ekonomickou návratnost velmi vysokých investičních nákladů na výstavbu. V posledních letech se rozvíjela myšlenka jít jiným směrem, díky čemuž se dostáváme k malým modulárním reaktorům (SMR). Firmy vyvíjející designy SMR se snaží dostat cenu nákladů na vyrobenou energii pod úroveň velkých bloků a zajistit kratší dobu výstavby pomocí sériovější výroby modulů, tj. hromadná výroba důležitých komponent místo individuální výroby na specifickou lokalitu. Z hlediska řízení vyrobené energie v průběhu denního diagramu zatížení jsou vhodné menší bloky, které bude možné odstavit nebo najet s menším krokem výkonu – nahradily by tak funkci stávajících uhelných elektráren.

Cílem této práce bude srovnat aktuální, tj. začátek roku 2024, uvažované designy SMR v ČR z technického hlediska, vybrat jeden z nich a umístit do lokality v ČR dle podkladů ze Státní energetické koncepce (SEK), Ministerstva průmyslu a obchodu (MPO) a plánů ČEZ a.s. Následně pro tento výběr zhodnotit potenciál umístění v těchto oblastech:

- Příprava lokality k umístění
- Ovlivnění elektrizační soustavy (ES) po připojení bloku
- Ekonomickou výhodnost jaderné elektrárny s bloky SMR

Výsledek této práce může posloužit jako podklad pro budoucí přípravu výstavby a provozu SMR v ČR, ať už pro brownfield nebo greenfield umístění.

# 1 Rozvoj elektrizační soustavy ČR

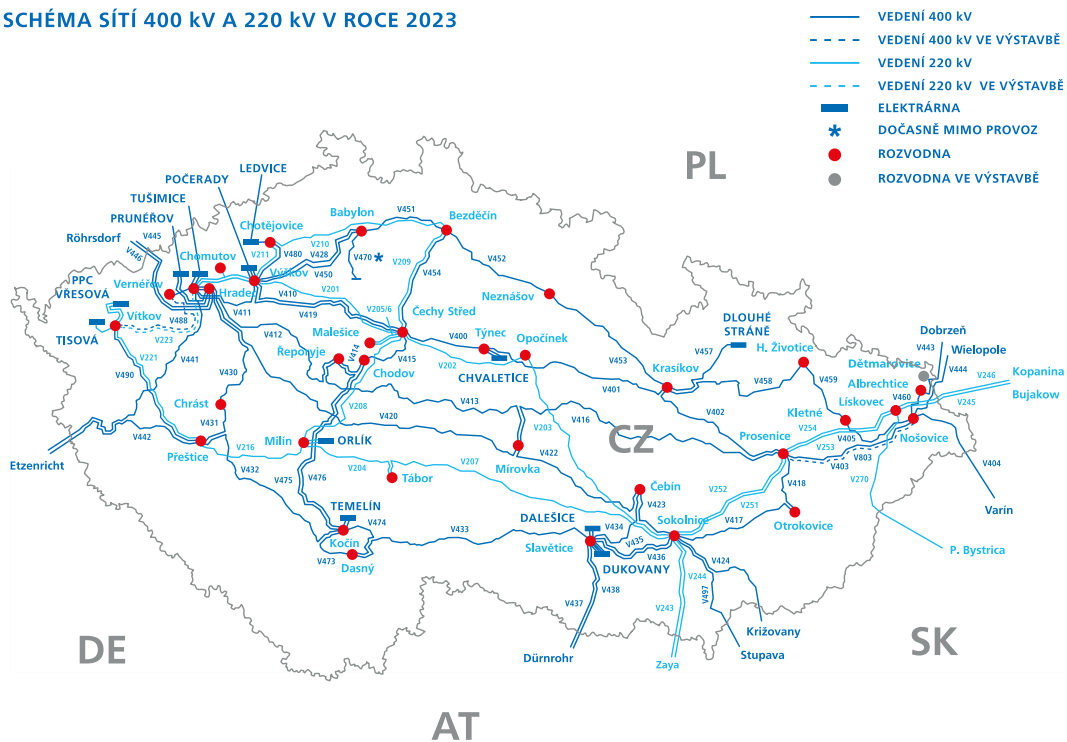
## 1.1 Historický vývoj

Do první světové války se vývoj elektrizace nesjednotil a bylo možné se setkat se stejnosměrným i střídavým proudem nebo s různými hodnotami napětí a kmitočtu. Počátky české elektrizační soustavy jsou datovány v roce 1919 Zákonem o soustavné elektrizaci státu. Stát se stal majoritním vlastníkem 20 elektrárenských společností a zavedla se třífázová soustava 50 Hz s místní sítí 3x220/380 V a přespolní 22 kV a 100 kV. Tehdejší rozvoj směřoval k umístění výroby co nejbližší spotřebě, čímž se snížily ztráty přenosem. Zároveň s tím vznikl problém několika nepropojených soustav 100 kV, který se vyřešil až po druhé světové válce sjednocením do jedné přenosové soustavy s dispečerským řízením.

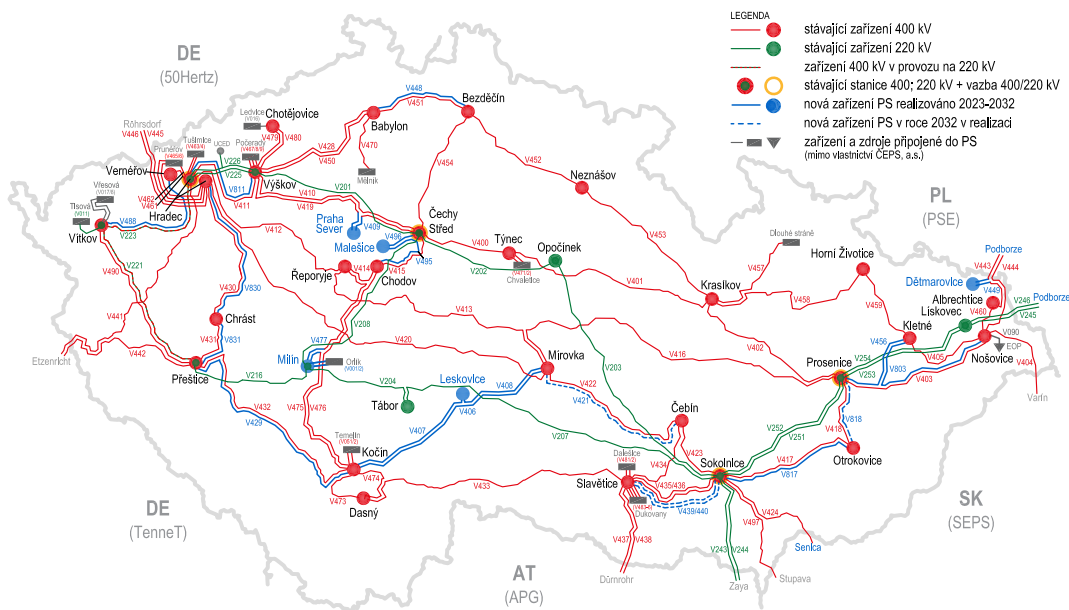
Zvyšování napěťové hladiny probíhalo společně se zvyšujícím se výkonem výrobních bloků a centralizované výroby u uhelných dolů. První vedení 220 kV se zprovoznilo mezi Výškovem a Opočínkem již v roce 1951. Další vystavěné linky 220 kV vytvořily okruh a propojily vedení z Německa, Polska a Rakouska. Od 1960 se začínají objevovat první linky 400 kV, které se stavěly ve stejném směru – výroba na západě, spotřeba na východě. Od 70. let minulého století se pro účely přenosové soustavy stavěly výhradně linky 400 kV a linky 220 kV dodnes slouží jako doplňující, případně zálohové. Do budoucna se plánuje plné nahrazení 220 kV, tj. využití jejich koridorů pro stavbu nových linek 400 kV jak se tomu již stalo například na lince Bezděčín – Čechy Střed nebo současně realizovaná náhrada V224 za V488 mezi Vítkovem a Hradec-Západ.

Do výstavby jaderné elektrárny Dukovany se nejvýkonnější rozvodny nacházely na území Ústeckého a Moravskoslezského kraje a u měst Praha a Brno, tj. u uhelných elektráren, těžkého průmyslu a velkých aglomerací. Významné elektrárny u Mostecké pánve se postupně odstavují nebo odstaví ke splnění emisních limitů v rámci Fit for 55. Po odstavení uhelných elektráren se centrum výroby posune na jih díky jaderným elektrárnám a vodním elektrárnám na Vltavě. Nový trend decentralizované výroby z FVE a dalších OZE se významně projeví na umístění výroby co nejbližší spotřebitelům, takže se ušetří energie na přenosu. Protiargumentem velkého počtu malých elektráren bude obtížné naplnění kritéria N-1 při odstávce velkého jaderného zdroje. [1]

SCHÉMA SÍTÍ 400 kV A 220 kV V ROCE 2023



Obrázek č. 1: Stav přenosové soustavy k roku 2023 [2]



Obrázek č. 2: Plánované úpravy přenosové soustavy v letech 2023-2032 [2]

## 1.2 Parametry elektrizační soustavy

Pro udržení stability ES je zapotřebí udržet velikost frekvence  $f$  a napětí  $U$ . Jedná se o kvalitativní ukazatele, kde  $f$  je globální parametr (celá síť  $50 \pm 0,2$  Hz) a  $U$  lokální parametr (v uzlech  $\pm 5 \% U_n$ ). Kromě toho od ES očekáváme spolehlivost a hospodárnost dodávky elektřiny. Stabilita se dělí na tři kategorie – úhlová, frekvenční a napěťová.

Úhlovou stabilitu udržujeme skrz akumulovanou energii v setrvačnosti rotační hmoty soustrojí a jedná se o nejrychlejší regulaci malých výkyvů frekvence, jelikož rychlost otáčení soustrojí je úměrná rychlosti otáčení elektromagnetického pole. Rotační hmoty nalezneme u všech zdrojů kromě FVE, FVE tedy nezlepšuje výkonové číslo soustavy  $K_{ES}$  – rovnice (1). Po vyřazení fosilních elektráren se soustrojím a vzrůstu podílu FVE se výkonové číslo soustavy sníží a odezva frekvence na změny se zvýší = nežádáný stav, proto se hledá řešení, jak u měničů FVE zavést umělou setrvačnost. Mechanický výkon u klasických zdrojů se reguluje hmotnostním průtokem – vody nebo páry, u které se navíc reguluje tepelný příkon.

$$K_{ES} = \frac{\Delta P_{ES}}{\Delta f_{ES}} \left( \frac{MW}{Hz} \right) \quad (1)$$

kde  $\Delta P_{ES}$  je změna výkonu a  $\Delta f_{ES}$  změna frekvence vyvolaná změnou výkonu.

Proti změně  $f$  dále pracuje primární regulace s odezvou 5-30 s. Primární a úhlová regulace brzdí pokles, respektive růst, frekvence a po ustálení hodnoty frekvence na  $f_2$  najíždí sekundární regulace, která navrátí hodnotu zpátky na 50 Hz regulací činného výkonu na bloku. Terciární regulace slouží k obnovení regulačních schopností primární a sekundární regulace, proto může trvat desítky minut až hodiny – spuštění, respektive odpojení elektráren nebo spotřebičů.

V případě velkých změn výkonu, například vypadnutí velkého výrobního bloku nebo skoková nadvýroba OZE ze změny počasí, vstupují v platnost opatření proti poklesu nebo nárůstu frekvence. U silného poklesu dochází k frekvenčnímu odlehčování zátěže až do hodnoty 48,1 Hz, pak už nastává rozpad propojené soustavy na menší ostrovy. Každý ostrov se reguluje jako samostatná síť na frekvenci 50 Hz, kam se regulačními prostředky musí korigovat po přechodovém ději, protože hrozí vypadnutí ze synchronismu a kolapsu do blackoutu. Na elektrárnu v ostrovním provozu se kladou vysoké nároky na regulační schopnosti, aby na vlastní spotřebě, případně v izolované soustavě, byla schopná provozu až do obnovení sítě.

Udržení funkce systému vyžaduje balancovat aktuální výrobu a spotřebu, čehož se docílí řízením výrobních zdrojů – regulační energie kladná (doplnění výkonu pro vyrovnání spotřeby) nebo záporná (snížit výrobu po poklesu spotřeby). Regulace toku energie na straně spotřebitelů se dosud prováděla skrz podnět hromadného dálkového ovládání (HDO) nebo po dohodě s velkým odběratelem.

Iniciativa výstavby velkého množství OZE, převážně FVE, způsobí výrobu v době, kdy není velký odběr – okolo poledne. Přebytek výkonu nemusí být jen lokálního charakteru, což povede na přetěžování linek, tj. vyšší ztráty a kratší životnost prvků, konkrétně přeshraničních linek. Posilování PS výstavbou nového vedení, zdvojení stávajících nebo výměna linek 220 kV na linky 400 kV tento problém nevyřeší, jen nám zvýší kapacitu ES. Jednou z možností ošetření této situace je upravit spotřebu tak, aby sledovala výrobu například dálkovým spouštěním energeticky náročných spotřebičů s myšlenkou peak shaving / valley filling, tj. přerozdělení současné spotřeby s dominantními špičkami (ranní a večerní špičky) na rovnoměrnější hodnoty v diagramu zatížení a zlepšit využití polo špičkových a špičkových zdrojů elektrické energie. Nevýhodou tohoto postupu jsou samozřejmě výkyvy výroby FVE a VTE – nejedná se kvůli klimatickým jevům o stabilní zdroj.

V synchronně propojené soustavě se tok výkonu ovlivní všemi zdroji, veškerou spotřebou a topologií sítě v daném okamžiku. Přenos činného výkonu  $P$  vedením směřuje od zdrojů ke spotřebě, jalový výkon  $Q$  volně mění směr podle potřeby výkonu, ale oba výkony podléhají Kirchhoffovým zákonům – v uzlu je jejich součet roven 0. Celkový přenášený výkon vedením  $S$  je součet činných a jalových výkonů:

$$S_1 = \hat{U}_1 \cdot \hat{I}_1^* = P_1 + jQ_1 \text{ (VA)} \quad (2)$$

kde  $\hat{U}_1$  je fázor napětí v uzlu 1 a  $\hat{I}_1^*$  komplexně sdružený proud tekoucí z uzlu 1.

Hodnoty v uzlu 1 (zdroj) a v uzlu 2 (spotřebič) se liší vlivem parametrů vedení – dochází k úbytku napětí a posunu fázového úhlu, konkrétně u vedení velmi vysokého napětí (vvn) a zvláště vysokého napětí (zvn), má největší podíl reaktance  $X$  a vliv odporu  $R$  je zanedbatelný – přenášený výkon poté zobrazuje rovnice (3) a rovnice (4).

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{X} \cdot \sin(\delta_1 - \delta_2) \text{ (MW)} \quad (3)$$

$$Q = \frac{U_1 \cdot U_2}{X} \cdot \cos(\delta_1 - \delta_2) - \frac{U_2^2}{X} \text{ (MVar)} \quad (4)$$



kde  $U$  označuje efektivní napětí příslušného uzlu,  $X$  podélnou reaktanci a  $\delta$  fázorový úhel napětí v daném uzlu.

Za předpokladu malého fázového posunu se rovnice upraví formou  $\sin \delta \cong \delta$ ,  $\cos \delta = 1$  do

$$\frac{P \cdot X}{U_1 \cdot U_2} = \delta \quad (5)$$

$$\frac{Q \cdot X}{U_1} = U_1 - U_2 \quad (6)$$

z čehož je patrné, že změna úhlu mezi napětími je ovlivněna činným výkonem a změna napětí změnou jalového výkonu. Rozdíl úhlů je přímo spojený se změnou frekvencí napětí, a tudíž činný výkon na vedení vvn ovlivňuje parametr frekvence a jalový výkon hodnoty napětí v uzlech.

Řízení a optimalizace provozu přenosových sítí se provádí několika způsoby, mezi něž patří rekonfigurace impedanční matice ES, redispečink zdrojů a spotřebičů, změna injektovaných výkonů do ES (sériové vstřikování napětí a paralelní vstřikování proudu), snížení reaktance vedení sériovou kompenzací, regulace napětí transformátorem s odbočkami, změna úhlu pomocí transformátoru s příčnou regulací (TPR) a regulací fáze (PST) a v neposlední řadě skrz Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS) založené na výkonové elektronice (dle typu prostředku regulují podélnou impedanci, příčnou admitanci, injektují proud nebo napětí). Užití těchto specializovaných zařízení závisí na požadavcích dispečera a ekonomické náročnosti, v ČR se setkáme s PST na přeshraničních linkách s Německem (rozvodny Hradec – Röhrsdorf). Jejich největší výhodou je zlepšení stávajících parametrů vedení pro lepší spolehlivost, stabilitu a kvalitu dodávky elektřiny. [3] [4]

### 1.3 Státní energetická koncepce

Funkce SEK spočívá ve vytvoření krátkodobého (do 10 let) a dlouhodobého (20 až 30 let) plánu, respektive možných scénářů zajištění vrcholového cíle, tj. dodávky energie, s důrazem na spolehlivost, bezpečnost a konkurenceschopnost. Dodávka musí být zaručena jak v běžném stavu, tak v krizových situacích, ke kterým může s rozumnou pravděpodobností docházet. Tento plán se vypracovává na základě dosavadních znalostí, zkušeností, ze současné a plánované infrastruktury, z politiky státu a vývoje ekonomiky. Jen při zajištění kvalitní dodávky energie pro potřeby obyvatelstva a průmyslu se docílí stability růstu státu. Důležité je podotknout, že se jedná jen o strategický dokument bez legálního závazku, jako tomu je např. u dokumentu Národní klimaticko-energetický plán (NKEP), též označován jako Vnitrostátní plán České republiky v oblasti energetiky a klimatu, určený pro plnění závazných evropských cílů v oblasti klimatu a energetiky. Ne všechny cíle a priority se ze SEK 2015 splnily a lze očekávat, že se to samé stane s novou verzí SEK. [7]

Na začátku se definují strategické cíle energetiky a strategické priority, díky kterým se naplní vrcholový cíl zmíněný výše. Jako podklad slouží SWOT analýza, současný stav energetiky, hlavní trendy vývoje a indikativní ukazatele. Níže dávám přehled strategických cílů a priorit:

- Vyvážení energetického mixu primárních zdrojů
- Efektivní využití tuzemských zdrojů
- Udržet výkonovou bilanci ES s dostatkem rezerv
- Zvyšování energetické účinnosti hospodářství
- Vývoj síťové infrastruktury v ČR
- Integrace do mezinárodních trhů s energiemi
- Zachování konkurenceschopnosti české energetiky
- Podpora výzkumu, vývoje a inovací
- Podpora školství a generační obměny technické inteligence
- Zvýšit energetickou bezpečnost a soběstačnost ČR

S úvahou strategických cílů a priorit se tvoří investice na dlouhodobé projekty. Investice do nových zdrojů se stanoví z ekonomické návratnosti a zajišťují si je samotné energetické společnosti s minimálním ovlivňováním od státu – zachování soutěžního práva. SEK tak dává dlouhodobou orientaci a podklady pro investory, kteří se chtějí technicky a ekonomicky vyvíjet do budoucnosti.

SEK se publikoval naposledy v roce 2015 a předtím až v roce 2004. Hlavní motivací pro verzi z roku 2015 bylo zhodnotit vliv vstoupení do EU a prvních 10 let v EU, rozšíření energetického trhu, posun energetické politiky s novým důrazem na klima (Pařížská dohoda ratifikovaná v roce 2015), stárnoucí výrobní zdroje nebo dynamický vývoj v sousedních státech. Nyní se zpracovává jeho aktualizace s uvážením významných změn vývoje energetiky – energetická nezávislost, odklon od fosilních paliv, vzrůst podílu obnovitelných zdrojů, vodíkové a hybridní pohony a dekarbonizační plán Fit for 55. Mezi vydáními je tím pádem vidět určitá souvislost v cílech, přestože se jedná o rozdíl 9 let.

Jelikož se tato práce zabývá jadernými zdroji, budu se nejvíce zaměřovat na tyto dvě oblasti v SEK: Elektroenergetika a Výroba a dodávka tepla. Okrajově se zde podílí ještě Energetická účinnost, Energetické strojírenství a průmysl, Vnější energetická politika nebo Výzkum, vývoj, inovace a školství. Další oblasti již nejsou přímo související – Plynárenství, Přeprava a zpracování ropy a Doprava.

Prosazování SEK se provádí pomocí nástrojů, které lze zařadit do následujících oblastí – legislativa, výkon státní správy, fiskální a daňové nástroje, vzdělávání, podpora vědy a výzkumu a samozřejmě komunikace a medializace. Značný vliv má vnitrostátní politika a zahraniční politika, což můžeme vidět v zavázání se ke snížení produkce skleníkových plynů a klimatické neutrality. Zahraniční politika jádro podporuje jako čistý a stabilní zdroj pro dosažení klimatické neutrality, z hlediska ČR se bude jednat o nezbytný zdroj pro energetickou nezávislost, zejména při pokrytí základního a případně polo špičkového zatížení v denním diagramu zatížení po odstavení fosilních zdrojů.

### **1.3.1 Starší vydání**

Hlavním podkladem pro SEK z 2015 byl dokument Strategický rámec udržitelného rozvoje ČR, schválen usnesením vlády č. 37 ze dne 11. ledna 2010. Jeho hlavním cílem je „zlepšení života současné generace i generací budoucích cestou vytvoření udržitelných komunit schopných efektivně využívat zdroje a odblokovat ekologický a sociální inovační potenciál nutný k zajištění ekonomické prosperity, ochrany životního prostředí a sociální soudržnosti“. Reaguje tak na vývoj energetiky po vstupu do EU. Zadání pro SEK obsahuje jednotlivé priority a cíle popsané v předchozí kapitole. Důležitou pozornost mělo zdraví, životní prostředí, zvýšení efektivity a energetická bezpečnost. Také se zde začalo řešit plnění národních závazků v oblasti snižování emisí skleníkových plynů.

Tvorba předchozího SEK byla rozdělena na několik fází, kde se v první fázi vytvořila SWOT analýza české energetiky, na kterou navázala druhá fáze diskuse s odborníky. Výstupem těchto dvou fází bylo pět klíčových dlouhodobých priorit (do roku 2040) a dílčí rozvojové strategie jednotlivých oblastí sektoru energetiky. V poslední třetí fázi se již tvořily modely možného vývoje jednotlivých sekcí energetiky. Scénáře popisují několik alternativ, kde vývoj energetiky závisí na vnitřních poměrech – domácnosti, energetická bilance, národní hospodářství, a na vnějším prostředí – ekonomika, politika států a EU nebo pokrok ve vývoji.

### 1.3.2 Nové vydání

Dokument měl být vyhotoven 5 let po poslední aktualizaci, jenže předchozí vláda toto nedodržela a začal se zpracovávat až v roce 2023. Plánované schválení do konce roku 2023 nebylo splněno kvůli připomínkovému dokumentu Evropské komise k Vnitrostátnímu klimaticko-energetickému plánu, takže muselo dojít k vyřízení připomínek až po obdržení podkladů, které přišly v prosinci 2023. Nové vydání SEK se skládá ze 185 priorit a strategií a 53 nástrojů k jejich plnění, které popisuje ve 3 koridorech (stav do 2030, 2040 a 2050). Předpoklady vývoje ze SEK budou nezbytné pro plánování přechodu výrobních zdrojů a vyvolaných investic.

Mezi hlavní motivace současného vydání SEK rozhodně patří dekarbonizace při zachování energetické soběstačnosti, konkurenceschopnosti a bezpečnosti. Několikrát zmiňovaný plán Fit for 55 počítá s útlumem uhelných zdrojů, přechodnými zdroji na zemní plyn a velkému růstu OZE, které je podpořeno novelami energetického zákona LEX OZE. Jelikož více než třetina vyrobené elektřiny pochází z uhelných zdrojů, tak se jedná o zásadní změnu energetického mixu ČR v krátkém časovém horizontu. Vytratí se důležitý zdroj se schopností celoroční produkce a regulace elektrické energie, který žádný současný OZE nedokáže v požadované míře nahradit.

Dále zde má vliv válka, která v roce 2022 ochromila zásobování zemním plynem a dalšími fosilními palivy z Ruska pro značnou část Evropy. Nejistota v dodávkách se projevila na energetické bezpečnosti a ekonomické krizi – ceny elektřiny a tepla dosáhly historického maxima na začátku topné sezóny a došlo k zásahu do trhu státem. Odklon k jiným dodavatelům během krátké chvíle se podařilo zasmluvnit a nyní se budují nové terminály a plynovody ve zbytku EU. Zemní plyn bude důležitou surovinou pro následující desetiletí, než se začne nahrazovat jinými plyny, např. biometanem a vodíkem. [10]

Při posledním setkání COP 28 – každoroční klimatická konference uspořádaná od OSN – v listopadu 2023 se mimo utvrzení snížení skleníkových plynů dohodlo 22 států, včetně ČR, o celosvětovém ztrojnásobení výkonu z jaderných elektráren, tj. z nynějších 373 GWe na alespoň 1160 GWe, do roku 2050. Tohoto ambiciózních cíle se chce docílit třemi nástroji a) vybudování SMR (růst od roku 2035), b) stavěné (59 GWe) a nové velké zdroje, c) prodloužení stávajících zdrojů až na 80 let provozu. Současný SEK se během této konference nacházel ve finální fázi zhotovení před zasláním na připomínky, je tedy možné že díky posunu vyhotovení se východiska COP28 zahrnuly do SEK.

Podle posledních informací z MPO (diskuse s širokou veřejností k SEK 2024) se dokument stále upravuje a k vládě se pošle na schválení nejdříve v červnu spolu s dalšími strategickými dokumenty. Údaje zmiňované v této kapitole tím pádem nejsou finální a mohou se ještě mezi datem odevzdání a datem schválení změnit.

Tabulka č. 1: Koridor 2030 z verze SEK 2024

Zdroj	Výroba elektřiny	Energetický zdroj
Uhlí	0 %	4 %
Zemní plyn	1-5 %	12-16 %
Jádro	47-65 %	30-40 %
OZE	33-47 %	24-27 %
Ostatní	1-2 %	-
Ropa	-	20-22 %

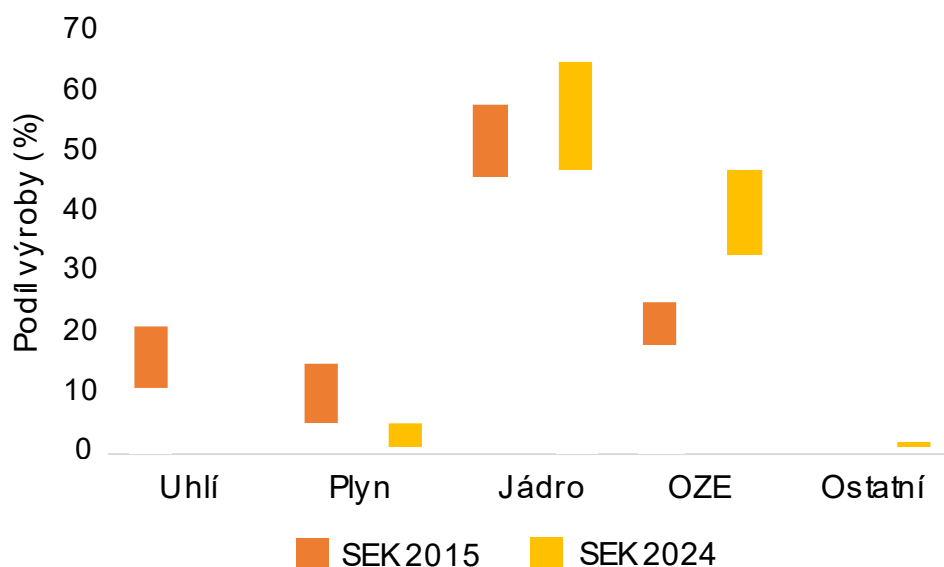
Tabulka výše zobrazuje podíl zdrojů na výrobě elektřiny a jako primární energetický zdroj, který navíc zahrnuje využití domácností a průmyslu (teplo a pohonné hmoty) nebo dopravy (pohonné hmoty). Položka „ostatní“ obsahuje vodík a jiné nízkouhlíkové plyny, případně zdroje mimo OZE. Již zde můžeme vidět přerozdělení, ke kterému by podle plánu mělo dojít v následujících 6 letech – pokles uhlí z 30 % na 10 % u výroby elektřiny ve prospěch jádra a OZE, čehož se může dosáhnout prostým odstavením uhelných elektráren a stavbou nových OZE. Zemní plyn nebo ropa se změní minimálně, kdežto ostatní zdroje budou nabývat na důležitosti, např. v koridoru 2050 vzrostou až na 8 %.

Srovnání dlouhodobých vizí na rok 2040 pro SEK 2015 a SEK 2024 ukazuje tabulka níže. Pro absolutní hodnoty spotřeby elektřiny verze 2015 očekávala spotřebu v rozsahu 62-82 TWh / rok (dle scénářů rozvoje elektromobility), pro verzi 2024 se nyní počítá s 10-20 TWh navíc, tj. mezi 70-100 TWh / rok.

Tabulka č. 2: Koridor 2040 předpokládané výroby elektřiny z roku 2015 a 2024\*

Zdroj	Výroba	Zdroj	Výroba
Uhlí	11-21 %	Uhlí	0 %
Zemní plyn	5-15 %	Zemní plyn	1-5 %
Jádro	46-58 %	Jádro	47-65 %
OZE	18-25 %	OZE	33-47 %
		Ostatní	1-2 %

\*SEK 2024 se v době odevzdání práce stále upravuje a ke schválení vládou dojde během letních měsíců. Údaje převzaty ze zprávy MPO ze dne 7.2.2024, nejsou tedy finální. [10]



Obrázek č. 3: Koridor 2040 podílu výroby elektřiny ze SEK – rozsah min a max

Mezi předchozím a nynějším vydáním vidíme skokovou změnu u uhlí, které se uvažovalo jako zdroj pro výrobu elektřiny až do 2040 a nyní je jisté, že se úplně vyřadí a nahradí jinými zdroji. Totéž platí pro zemní plyn, kde se neuvažuje využití v dlouhodobém měřítku na výrobu elektřiny, zbývá tak jádro s OZE, které jsou úměrně větší.

## 1.4 Další strategické dokumenty

SEK není jediný strategický dokument uvažující provoz SMR v ČR, proto zde zmíním některé z vlivnějších, jako například vize Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR (MAF), NKEP 2023 a Plán pro malé a střední reaktory. Tyto 3, a další z nich odvozené, se vyvíjí souběžně s vývojem SMR ve světě, dekarbonizací EU, ekonomik a průmyslem ČR, novými nařízeními Evropské komise a s vnitrostátní politikou.

### 1.4.1 Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR

MAF se zpracovává každé 2 roky státní společností ČEPS a.s. a zhodnocuje vývoj ES do roku 2040. Prochází tak spolehlivost ES ve vazbě na výrobní kapacity a spotřebu elektřiny v ČR ale také záměry energetických soustav ostatních států, zejména Německa a Francie. Vytvořily se zde 4 scénáře vývoje – Respondentní (vize provozovatelů zdrojů), Konzervativní (odchod od uhlí k roku 2038), Progresivní (odchod od uhlí v 2032, více OZE a větší spotřeba) a Dekarbonizační (nejmenší uhlíková stopa a odchod od uhlí již v 2030). Importní saldo se v roce 2030 ve všech scénářích pohybuje okolo 20 %, tj. 13 a více TWh / rok. Z tohoto podkladu vzešly následující klíčové body, které mohou ovlivnit budoucnost energetiky:

- 1) Vývoj cen paliv a emisních povolenek
- 2) Podíl OZE, elektromobility a výroby vodíku
- 3) Přenosová kapacita přeshraničních vedení
- 4) Ukončení uhelných zdrojů
- 5) Dozdrojování plynových zdrojů
- 6) Zprovoznění NJZ nejpozději do 2036

Pro mé téma je nejdůležitější fakt ten, že výstavba obnovitelných zdrojů společně s výstavbou nových velkých reaktorů (EDU 5 a 6 v roce 2036 a dál) nepokryje potřeby energetické soběstačnosti České republiky, a že bude potřeba dodatečných 3 GW<sub>e</sub> instalovaného výkonu do roku 2050. MAF identifikuje elektrárny se SMR jako vhodný doplněk výrobního mixu omezující provozní rizika ES, vedou ke zvýšené soběstačnosti ČR a poslouží jako náhrada výrobních kapacit v místech, kde se plánují odstávky současných elektráren. Za předpokladu splnění bezpečnostních podmínek se výkon do 500 MW<sub>e</sub> neprojeví na nároku připojení k PS dle ČEPS a.s.

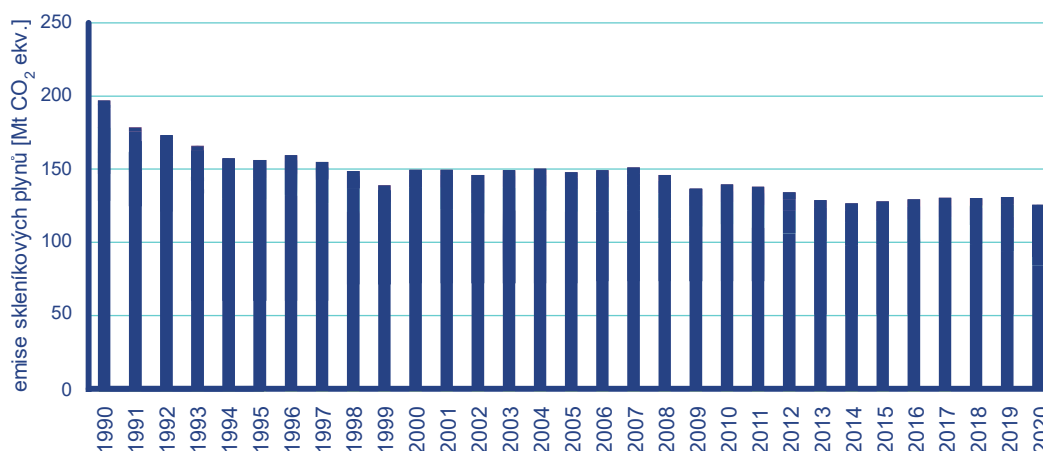
Na závěr MAF varuje, že ještě před rokem 2030 se z ČR stane importní země a produkce z OZE bude volatilní – indikátor ztráty očekávaného zatížení (LOLE) u Progresivních a Dekarbonizačních scénářů dosahuje stovek hodin, soběstačnost státu bude ohrožena a stát musí podniknout takové kroky, aby se vůbec dodržela hranice <10 % dovozu silové elektřiny jak je zmíněno v SEK. ČEPS a.s. tak v MAF popisuje 12 klíčových podmínek přechodu k nízkoemisní energetice, kde SMR a NJZ jsou zmíněné na prvním místě. [6]

#### 1.4.2 Národní klimaticko-energetický plán

Podle NKEP (poslední vydání říjen 2023) se tvoří výhled vývoje energetiky do 2030 s naplněním dekarbonizačních závazků. Plán představuje několik scénářů, označované jako WEM (scénář bez nových opatření) a WAM (několik verzí s příslušnými opatřeními pro naplnění Fit for 55), které ještě musí projít diskusemi a Evropskou komisí. Srovnání celkového výkonu v  $\text{GW}_e$  nejdůležitějších scénářů zobrazuje Tabulka č. 3. Plán také počítá se vzrůstem vlivu vodíku, snížení energetické náročnosti domácností a průmyslu nebo zavedením modernizačních fondů – řádově stovky miliard korun v následujícím desetiletí.

Tabulka č. 3: Srovnání instalovaného výkonu  $\text{GW}_e$  ve scénáři WEM / WAM3

Zdroj energie	2022	2030	2050
Jádro	4,3 / 4,3	4,3 / 4,3	4,4 / 5,9
Slunce	2,1 / 2,1	6,0 / 10,1	21 / 26,1
Vítr	0,3 / 0,3	0,7 / 1,5	3,5 / 5,5
Zemní plyn a vodík	2,4 / 2,4	3,8 / 3,2	3,0 / 4,0
Uhlí	9,4 / 9,4	5,6 / 3,0	2,6 / 0,0



Obrázek č. 4: Vývoj emisí CO<sub>2</sub> v ČR mezi lety 1990 a 2020 [8]



Při dodržení plánů na výstavbu nových jaderných zdrojů se podíl jádra v energetickém mixu ČR změní na 5,9 GW<sub>e</sub> v roce 2050, tj. nárůst 1,5 GW<sub>e</sub> instalovaného výkonu oproti současnému stavu. Vzhledem k omezenému prodloužení provozu EDU 1-4 (předpoklad provozu 60 let – do roku 2037, optimisticky až 70 let) se jedná o výstavbu 3,7 GW<sub>e</sub> během následujících 26 let, z toho 2 GW<sub>e</sub> zajistí EDU 5-6 a zbytek ETE 3-4 nebo SMR. Upřesnění plánu a jednotlivých scénářů se očekává po vydání aktualizace SEK a Politiky ochrany klimatu. [7]

### 1.4.3 Plán pro malé a střední reaktory

Na podzim 2023 vydalo Ministerstvo průmyslu a obchodu vlastní Plán pro malé a střední reaktory s časovou osou. Hlavní myšlenkou tohoto dokumentu od MPO je podpořit investice do jaderné energetiky a činí tak na základě taxonomie EU pro udržitelné investice, kam patří NJZ se stavebním povolením do roku 2045. Plán vyzdvihuje využitelnost SMR pro potřeby dekarbonizace, energetické bezpečnosti a soběstačnosti ale také jako příležitost pro zlepšení ekonomiky, udržení jaderného know-how a využití expertů z fosilních elektráren.

Příležitost SMR v ČR se dotkne několika odvětví – energetiky, průmyslu, ekonomie, vědy a vzdělávání. ČR má ambice se stát pokrokovou zemí s touto technologií a zapojit tak SMR do exportního trhu. Jedná se o projekt, který začne na začátku 30. let 21. století nabývat na důležitosti a s přibývajícím lokalitami se bude rozšiřovat – vytvoření flotily a kolující skupiny technických expertů. Jako plus se dále předpokládá navázat spolupráci se zemí původu pro dlouhodobé partnerství. Plán od MPO vypisuje několik bodů pro uplatnitelnost a možná rizika SMR v ČR, mezi něž patří například:

- podpora veřejnosti, státu a krajů,
- právní a regulační rámec
- stabilní investiční podmínky
- zajištění financování u prvních projektů
- připravenost technologie
- komponenty s dlouhou dobou dodávky
- zajištění jaderného paliva
- radioaktivní odpady
- zájem okolních států a vyčerpání dodavatelského řetězce
- nedostatek lidských zdrojů

Po vzoru SEK nebo MAF jsou v tomto dokumentu srovnány možnosti, konkrétně 3 scénáře hospodářského přínosu a 4 varianty investorského modelu. Hospodářský přínos rozlišuje čistou koupi designu, spolupráci na vývoji a tvorbě designu a čistě český design. Každý scénář se dále dělí na vývoj technologie, zapojení českého průmyslu a dopad na ekonomiku. Pro varianty se rozhoduje mezi soukromou společností, soukromá společnost a stát, státní společnost nebo alternativní modely. Mezi variantami se hledá taková možnost, aby podpora státu byla dostatečná pro realizování projektu ale zároveň nechat prostor pro soukromý sektor.

Výběr konkrétního designu se též řídí několika podmínkami, ať už po straně a) technické – připravenost technologie, bezpečnost, vhodná lokalita, b) ekonomické – ekonomika projektu, přínos pro hospodářství, riziko investice, tržní potenciál nebo c) administrativní – zajištění lidských zdrojů, povolení technologie. Právě u povolení technologií SMR nastává problém v tom, že se jedná o novou technologii ve fázi vývoje a bez ověření na zkušebním modelu / pilotním projektu. SÚJB tak nemůže plně využít dosavadní zkušenosti s povolováním a bude zapotřebí rozšířit mezinárodní spolupráci s regulačními úřady zemí, kde se zmiňované SMR certifikují – NRC, CNSC a ONR. Souběžně vzniká platforma pro sdílení a výměnu informací, kde jsou zapojené státy skrz International Atomic Energy Agency (IAEA) a z této platformy může vzniknout institut pro vzájemné uznávání bezpečnostních systémů.

Současné zkušenosti SÚJB spočívají v lehkovodních reaktorech, konkrétně v tlakovodních. Podle toho je též nastaven zákon 263/2016 Sb. Atomový zákon a dle posledních informací se v nejbližší době vytvoří jeho úprava pro usnadnění povolování SMR technologií nebo jaderných lokalit. Rychlejší proces licencování se může docílit flotilou, tj. stejný design zkrátí lhůtu pro povolení dalších lokalit, což ale vyžaduje se omezit na jeden design z důvodu omezených kapacit odborníků. [5]

## 2 Designy SMR uvažované v ČR

### 2.1 Úvod do SMR

SMR jsou jaderné zdroje s výkonem do 300 MW<sub>e</sub> a jejich předností oproti velkým jaderným blokům je modulární konstrukce. Kromě výroby elektrické energie jsou využitelné i pro teplotné účely, odsolování mořské vody či výrobu vodíku. Za předchůdce SMR se považují první komerční bloky a jaderné reaktory v letadlových lodích a ponorkách – mají srovnatelný výkon a kompaktní design. Největší změna spočívá v přenesení těchto znalostí z vojenského sektoru do civilního a na suchou zem. Vyvíjené jsou jak v běžných technologiích – tlakovodní (PWR) a varné (BWR,) tak v inovativních technologiích (vysokoteplotní, roztavené soli, plynové). Jelikož chceme jako ČR postavit první SMR již ve 30. letech 21. století, tak se nabízí uvažovat známé technologie vzhledem k dlouhé době licencování ze stran regulačních úřadů.

Výhodou SMR bývá nejčastěji zmiňovaná modularita a standardizace, umožňující sériovou tovární výrobu komponent a technologie mimo lokalitu v kontrolovaných podmínkách výrobního závodu, včetně testování a zajištění kvality s následným dovezením a sestavením hotových částí na lokalitu s pozitivním dopadem na délku a spolehlivost výstavby (zmírnění výstavbových rizik). Standardizace dále sníží náklady pro n-tý vyrobený blok, častější výstavba má nižší riziko změn, oprav a zpoždění projektu než v případě velkých bloků a SMR se tak mohou stát konkurenčně schopnými k velkým blokům. [5]

S ohledem na nižší kapitálové výdaje mohou být investice do SMR pro investora dostupnější oproti velkým jaderným zdrojům, u kterých je naopak větší efekt úspor v instalovaném výkonu. To se promítne do ceny energie (LCOE), viz vzorec (7) [21]. Pro první SMR daného designu ve světě se hodnota LCOE dostane nad hranici velkých elektráren a s každým dalším vyrobeným kusem se tato hodnota bude snižovat. Navíc u velkých zdrojů je investiční kapitál natolik vysoký, že se v našich podmínkách nenajde investor schopný uhradit značnou sumu bez pomoci od státu nebo banky.

$$LCOE = \frac{\textit{náklady na výstavbu a provoz}}{\textit{celková vyrobená energie během života bloku}} = \frac{I+P+M}{E} \left( \frac{\textit{Kč}}{\textit{kWh}} \right) \quad (7)$$

kde  $I$  jsou investiční náklady,  $P$  provozní náklady,  $M$  náklady na modernizaci a  $E$  celková vyrobená energie.

Některé výpočty uvažují diskontní sazbu u nákladů a snížení účinnosti výroby s přibývajícím rokem, jenže se jedná o zjednodušené předpoklady, které nemusí odpovídat realitě. Verze uvažující diskontní sazbu zobrazuje rovnice (8) níže.

$$LCOE = \frac{I_t + \sum_{t=1}^n \frac{P_t + M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \left( \frac{Kč}{kWh} \right) \quad (8)$$

kde  $t$  značí rok, pro který platí hodnoty nákladů a vyrobené energie, a  $r$  je úroková sazba. Problémem tohoto vztahu je určení úrokové sazby, která po dobu životnosti elektrárny nezůstává stejná a může se měnit v závislosti na vnějších vlivech.

Velikost modulů a ostatních součástí je typicky optimalizován pro transport, s výjimkou zásadních nadrozměrných komponent – reaktorová nádoba, parogenerátor, kompenzátor objemu, turbína, generátor nebo transformátor. Velikost elektrárny je srovnatelná s dnešními uhelnými bloky, tj. menší rozměry a vyšší bezpečnost ovlivní zónu havarijního plánování, která se plánuje snížit až na hranici areálu jaderného zařízení. Umožní se tak umístit SMR blíže k městům s centrálním zásobováním teplem (CZT) a tím blíže k odběru elektrické a tepelné energie. Další výhodou menších rozměrů se projeví v délce výstavby, kde se u SMR předpokládá 3-5 let oproti 7+ let u velkých bloků.

SMR se jako jaderné zdroje nejlépe hodí na pokrytí základního zatížení v diagramu zatížení, akorát stejně jako uhelné bloky umožňují určitou míru výkonové flexibility a mají potenciál pro stabilizaci sítě nebo poskytování podpůrných služeb elektrizační soustavě s vysokým zastoupením intermitentních zdrojů. Regulační rozsah výkonu v některých designech dosahuje až 50 % jmenovitého výkonu s pohybem 5 %/min.

V ČR existuje rozsáhlá síť CZT napájená z uhlí a zemního plynu a využití kogenerace bude žádané. S ohledem na nižší spotřebu tepla v letních měsících a evropskou vodíkovou strategii je technologie SMR perspektivní také pro výrobu vodíku. U vodíkových strategií států EU se uvažuje výstavba elektrolyzérů o instalovaném výkonu v řádu desítek GW<sub>e</sub> a pokud jsou napájené z jaderných zdrojů, označují se jako „růžový“ vodík. V současné době se též hledí na nízkoemisní výrobu energie, kde se jaderné zdroje s emisemi vyrovnají nejčistším OZE – větrným, vodním a slunečním elektrárnám. Značná část těchto emisí se vytvoří během stavby zdroje, v provozu má téměř nulové. [20]

Ve většině případů jsou použity pasivní bezpečnostní systémy, zvyšující bezpečnost v provozu a při havárii, tj. využívají se systémy generace III+ a IV. Díky pasivním systémům a vyšší míře automatizace se předpokládá menší počet pracovníků potřebných k zajištění provozu. Když zvážíme rostoucí zájem o instalovanou kapacitu v EU (2 GW<sub>e</sub> instalovaného výkonu SMR do roku 2035) a v ČR (3 GW<sub>e</sub> instalovaného výkonu do roku 2050), tak právě počet vyškolených expertů v tak krátkém čase bude jedno z omezujících kritérií. [5]

Malé a střední reaktory jsou inovativní jadernou technologií, pro jejíž uvedení na trh bude klíčových následujících pět až deset let, s tím jsou spjaty i odpovídající příležitosti. V zahraničí probíhají práce na řadě projektů, jejichž zástupci projevují prostřednictvím memorand zájem spolupracovat s českými firmami. Ve hře je tak společný vývoj českých a zahraničních firem, který by mohl být realizován ve společném podniku.

Rozhodnutí o konečném výběru partnera pro české SMR spadá na jednotlivých zákaznících – největším z nich je ČEZ a.s. ale jsou tu také ambice Sokolovské uhelné a.s. a do budoucna se mohou objevit další zájemci. Vzhledem k tomu, že ČEZ a.s. spadá z větší části pod stát (vlastnictví akcií přes 70 %), vlastní a provozuje obě stávající jaderné elektrárny a má ve své skupině firmu ŠKODA JS a.s. vyrábějící komponenty do jaderných elektráren, tak budu v této práci uvažovat designy zvažované tímto subjektem. Na konci roku 2023 se jednalo o spolupráci s těmito projektovými firmami:

- Holtec International
- GE Hitachi Nuclear Energy
- NuScale Power
- Rolls-Royce
- Nuward EDF Group
- SMART Power Company
- Westinghouse Electric Company

Každá z těchto firem již podepsala memorandum o spolupráci s firmou ČEZ a.s., proběhlo několik návštěv mezi zástupci obou stran a předpokládá se výběr jednoho strategického partnera v roce 2024. Díky zúžení na jeden design se příprava lokalit a celého programu SMR v ČR zjednoduší, jelikož se dosud pracuje se všemi designy. [22]

## 2.2 SMR-300 Holtec

Firma Holtec International se zabývá elektrárnami již od roku 1986, zpočátku v řešení vibrací a koroze u výměníků tepla, později ve skladování vyhořelého jaderného paliva v elektrárně. Právě u mokrého a suchého skladování se jedná o předního dodavatele ve světě (okolo 100 zákazníků). Její dceřiné společnosti se podílí na výrobě a servisu výměníků tepla, skladování vyhořelého paliva, decommissioning elektráren (Oyster Creek, Pilgrim, Indian Point a Palisades) a vývoj SMR-300.

Od roku 2011 se firma zabývá vývojem SMR-160, který byl v září 2023 upraven na SMR-300. Protože se tato změna udála relativně nedávno, tak zatím nejsou dostupné nové technické specifikace. Zatím se předpokládá změna jen ve velikosti aktivní zóny a množství paliva pro zvýšení výkonu se zachováním stejných principů z předchozího designu. Z IAEA SMR ARIS Booklet z roku 2022 máme dostupná technická data pro předchozí edici SMR-160, která popisuje Tabulka č. 4.

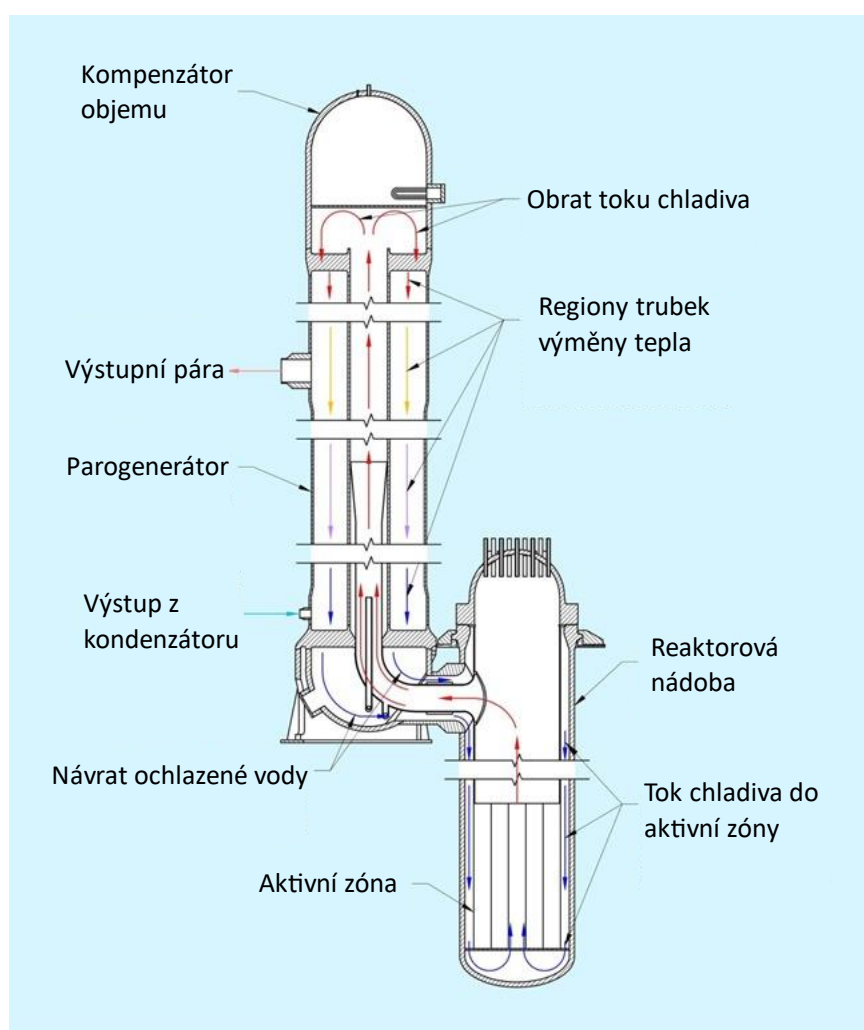
Jejich SMR-300 je vyvíjen jako PWR generace III+ s výstupním výkonem 300 MW<sub>e</sub>. Design zahrnuje robustní pasivní systémy pro dosažení spolehlivosti a jaderné bezpečnosti za provozu a během havárií. Samotný reaktor se nachází pod úrovní terénu v železobetonovém kontejnmentu pro zvýšenou bezpečnost před vnějšími vlivy. Hlavní předností tohoto projektu je automatizované odstavení a chlazení aktivní zóny bez zásahu operátora pro všechny projektové havárie pomocí pasivního systému a přirozeného proudění vody v primárním okruhu. Řízení a regulace výkonu se provádí regulačními tyčemi a přiléváním borité vody. Firma též disponuje know-how výroby suchého chlazení, které umožní umístění elektrárny na místech s nedostatkem vody.

Pro zajištění modulárnosti a jednoduchosti designu se veškeré přenositelné komponenty vyrobí v továrně a následně přenesou do lokality. Mezi cíle společnosti patří výstavba celé elektrárny za 2 roky pro n-tou elektrárnu a postavit první elektrárnu ještě před rokem 2030. Primární využití SMR-300 je výroba elektrické energie s možností vybavit zdroj na kogeneraci – zásobování teplem, výroba vodíku nebo odsolování. Mezi podpůrné služby se plánuje zajistit „start ze tmy“ a ostrovní provoz pro místa s nestabilní soustavou. [12]

Booklet též zobrazuje dosavadní časovou osu vývoje – Koncepční design byl vyhotoven v roce 2015 a předběžný v roce 2020. V roce 2023 se mělo žádat o certifikaci s povolením k stavbě u národního regulačního úřadu NRC v USA, nicméně došlo ke změnám designu na vyšší výkon, tím pádem zde bude časový skluz. Spolu s firmami Hyundai Engineering & Construction a Mott McDonald se pokouší o certifikaci a výstavbu flotily ve Velké Británii, kde obdrželi grant 30 milionů liber v prosinci 2023. [32] [11]

Tabulka č. 4: Základní technické parametry SMR-160 [11]

Typ reaktoru	Parametry páry	Obohacení, počet PS, délka kampaně	Životnost (roky)	Reaktorová nádoba		
				Výška (m)	Průměr (m)	Váha (t)
PWR 160 MW <sub>e</sub>	15,5 MPa 321 °C	<5 % <sup>235</sup> U, 57 PS, 2 roky	80	15	3	295



Obrázek č. 5: Příčný řez reaktorem SMR-160 [23]

### 2.3 BWRX-300 GE-Hitachi

General Electric vyvíjí jaderné reaktory již od roku 1955 a má bohaté zkušenosti s výstavbou a provozem BWR reaktorů – podíleli se na prvních soukromých reaktorech a od té doby dodali 67 reaktorů v 10 státech. Dceřiná společnost GE Hitachi Nuclear Energy (GEH), vzniklá spojením GE a Hitachi v roce 2007 a slouží k propojení know-how vývoje a výroby všech komponent v elektrárně, včetně palivových souborů.

Design BWRX-300 jako jediný z vybraných 7 využívá, jak už je z názvu patrné, technologii varného reaktoru. Výchozím podkladem pro tento design jsou předchozí modely od GEH, specificky ESBWR o výkonu 1520 MW<sub>e</sub>, který obdržel certifikaci NRC v roce 2014. Tento design plánuje dodávat do sítě 300 MW<sub>e</sub> pro základní zatížení a zároveň sledovat požadavek na výrobu s regulací až do 50 % výkonu. Kromě toho se může uzpůsobit na kogeneraci pro dodávání tepla do domácností nebo výroba vodíku.

Jaderná bezpečnost se zaručí plně pasivním systémem s přirozenou cirkulací vody, regulace výkonu pak řídicími tyčemi a vyhořívajícími absorbátory. Protože se jedná o BWR, tak investiční náklady na výstavbu jsou na 1 MW<sub>e</sub> zřetelně nižší oproti konkurenčním PWR SMR – dáno absencí parogenerátoru a nižším tlakem, tudíž méně náročné konstrukční požadavky primárního a sekundárního okruhu.

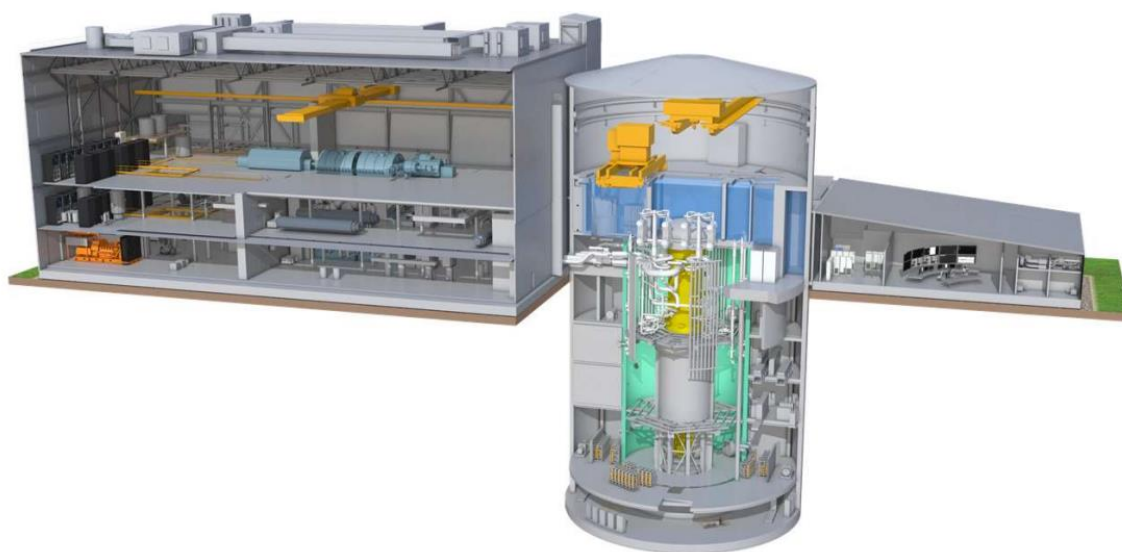
Proces licencování probíhá v USA, Kanadě a Velké Británii s tím, že v Kanadě v červenci 2023 již byla podepsána dohoda o výstavbě 4 bloků BWRX-300 v jaderné lokalitě Darlington, provincie Ontario. Plánované spuštění prvního bloku se uvažuje v roce 2028 [24]. Mezi další plánované lokality patří Clinch River v Oak Ridge (firma Tennessee Valley Authority) a Polsko, kde došlo k uzavření dohody s Orlen Synthos na 26 lokalit se 79 bloky BWRX-300 do roku 2038.

Časová osa vývoje a blízké budoucnosti: 2019 zahájení licencování v USA v regulačním úřadě NRC, 2020 začátek licencování v Kanadě u regulátora CNSC, 2024 předpoklad začátku stavby prvního bloku a spuštění prvního v roce 2028. Technická data dle [11] obsahuje Tabulka č. 5.



Tabulka č. 5: Základní technické parametry BWRX-300 [11]

Typ reaktoru	Parametry páry	Obohacení, počet PS, délka kampaně	Životnost (roky)	Reaktorová nádoba		
				Výška (m)	Průměr (m)	Váha (t)
BWR 290 MW <sub>e</sub>	7,2 MPa 288 °C	3,8-4,9 % <sup>235</sup> U, 240 PS, 1-2 roky	60+	26	4	485



Obrázek č. 6: Schéma elektrárny s reaktorem BWRX-300 [11]

## 2.4 NuScale Power Module

NuScale Power Corporation vzniklo v roce 2007 za účelem vyvinout SMR pro komerční využití výroby elektrické a tepelné energie. Na vývoj jim poskytuje finanční pomoc Ministerstvo energetiky USA v rámci smlouvy o kooperaci ve vývoji SMR. Pro certifikaci vytvořili model SMR v měřítku 1:3 a jako první SMR získali certifikaci od regulačního úřadu NRC v USA (žádost podána v roce 2016 a schválená o 4 roky později), jenže pro model o výkonu 50 MW<sub>e</sub>. S minimálními změnami v designu, například zkrácení palivové kampaně z 24 měsíců na 18 měsíců, se zvýšil výkon modulu o polovinu a požádal se opět proces licencování. [14]

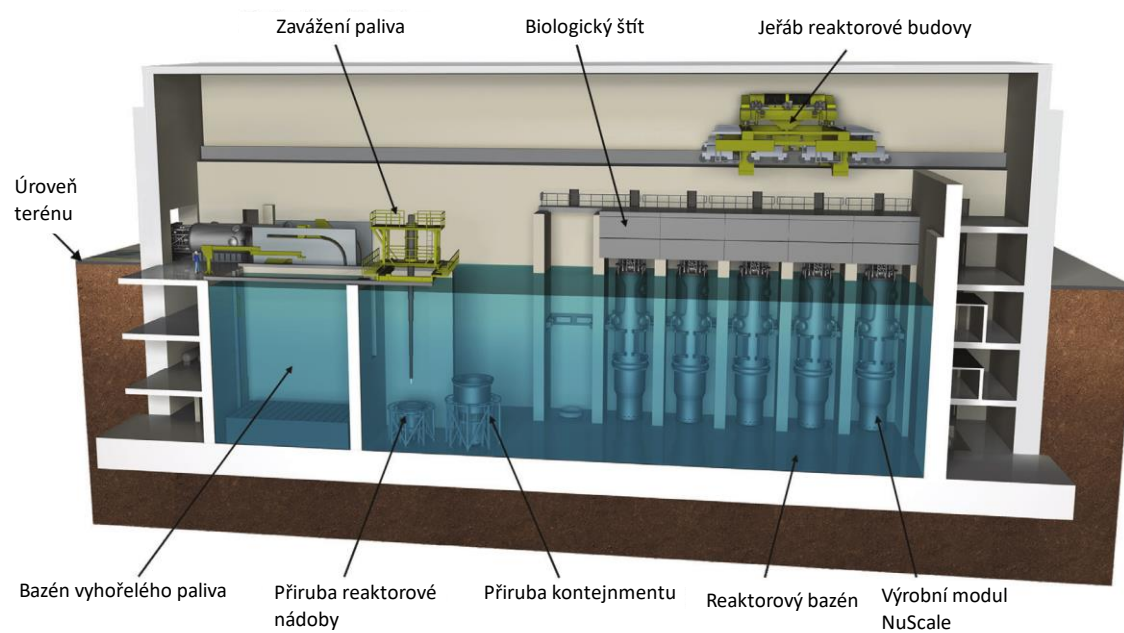
NuScale Power Module™ je integrovaný tlakovodní reaktor o výkonu 77 MW<sub>e</sub> schopný pracovat v jedné reaktorové budově v uspořádání 4, 6 nebo 12 modulů (označováno jako VOYGR elektrárna) pro škálování vyrobené elektřiny a tepla, celkem tedy do výše 924 MW<sub>e</sub>. Všechny moduly jsou ponořené do společného bazénu s pasivním odvodem tepla, který nepotřebuje zásah operátora nebo počítače pro dlouhodobé chlazení po odstavení. Mezi moduly jsou umístěné stínící zdi a nad nimi stínění pro personál, které se při manipulaci jeřábem odkryje. Použitím jeřábu se přemístí celý modul do druhé části bazénu pro výměnu paliva, aniž by se musely ostatní bloky vypínat. Celá elektrárna se řídí z jedné blokové dozorny, kde musí být minimálně 3 operátoři.

Samotný modul integruje podstatné komponenty (reaktor, řídicí tyče, chlazení, 2 parogenerátory a kompenzátor objemu) v jedné nádobě a jedinými vývody ven jsou parní potrubí na turbínu a návrat vody zpátky z kondenzátoru. Uvnitř modulu proudí voda přirozeně bez nutnosti čerpadla do parogenerátorů a řízení výkonu se provádí regulačními tyčemi a borovou vodou. Moduly jsou vytvořené v továrně a dopravené v celku do lokality.

Časová osa vývoje: podpora od Ministerstva energetiky od roku 2013, podání žádosti o licencování modulu 50 MW<sub>e</sub> v roce 2016, schválení designu v roce 2020 a plánované spuštění první elektrárny v roce 2029 v lokalitě Idaho Fall. Bohužel v listopadu 2023 došlo k zrušení této myšlenky, když se LCOE zvýšil nad předpoklad objednatele [15]. Hned na to se našel další zájemce o technologii pro zásobování průmyslového komplexu elektřinou a teplem pro výrobu, zatím bez bližších specifikací o počtu nebo časové ose. Technické specifikace modulu NuScale shrnuje Tabulka č. 6. [11]

Tabulka č. 6: Základní technické parametry modulu NuScale [11]

Typ reaktoru	Parametry páry	Obohacení, počet PS, délka kampaně	Životnost (roky)	Reaktorová nádoba		
				Výška (m)	Průměr (m)	Váha (t)
PWR 77 MW <sub>e</sub>	13,8 MPa 316 °C	<5 % <sup>235</sup> U, 37 PS, 2 roky	60+	17,7	2,7	-



Obrázek č. 7: Rozložení reaktorové haly NuScale VOYGR [25]

## 2.5 UK SMR Rolls-Royce

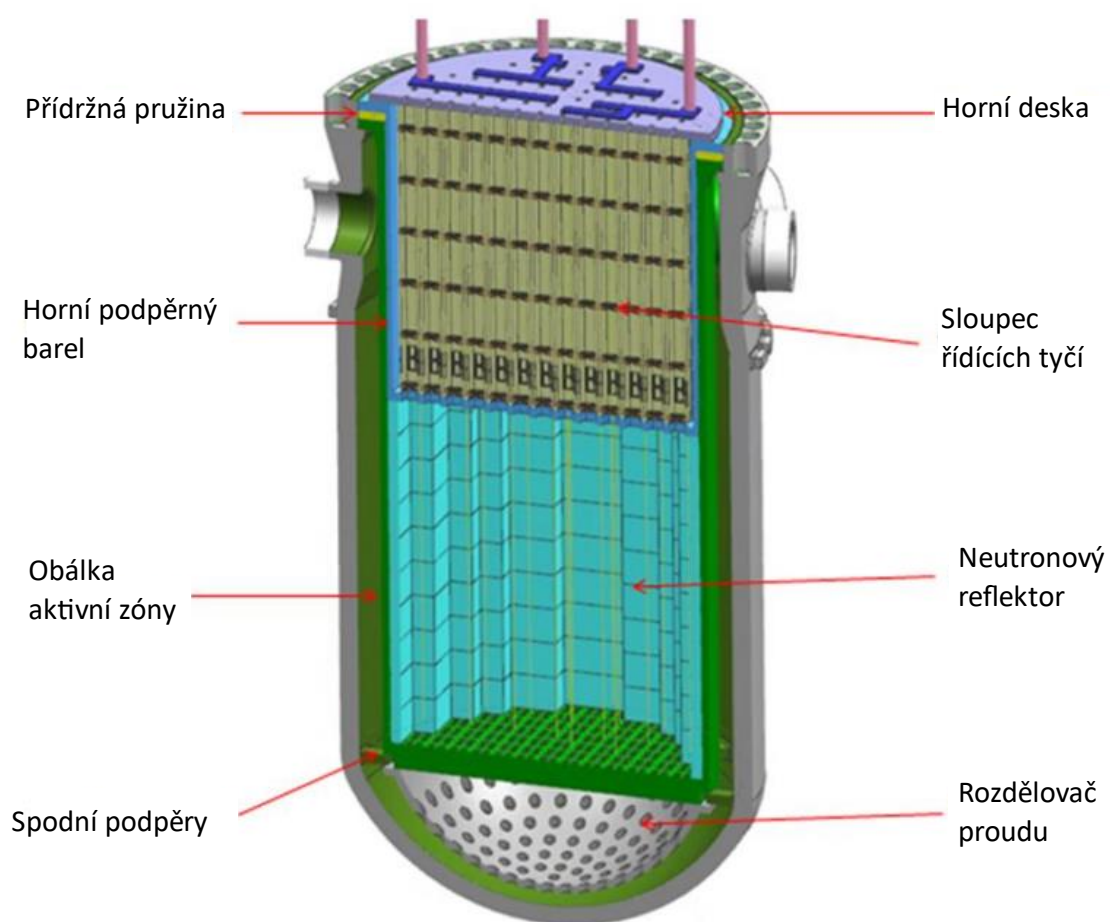
Rolls-Royce (RR) se v jaderném průmyslu pohybuje již od roku 1963, kdy začal dodávat tlakovodní reaktory do jaderných ponorek pro britské námořnictvo. Reaktory pro ponorky sice mají srovnatelné rozměry, nicméně vojenský sektor nemá omezení na obohacení a tyto reaktory proto pracují až 20 let bez výměny paliva. Ve Walesu a Skotsku se plánují první SMR od RR, proto britská vláda finančně podporuje vývoj těchto reaktorů. Cenově se odhaduje investice 4 miliony liber na 1 MW<sub>e</sub> instalovaného výkonu pro n-tý blok kdežto aktuálně plánované velké jaderné zdroje se pohybují okolo 7 milionů liber na 1 MW<sub>e</sub>. [16]

Design RR SMR je klasický tlakovodní reaktor o výkonu 470 MW<sub>e</sub> na výstupu elektrárny, ale to už nepatří do skupiny malý a vyrovná se tak výkonu bloků VVER 440 v Dukovanech. Oproti ostatním designům se dále liší v užití hlavních cirkulačních čerpadel (HCČ) místo přirozeného proudění vody v primárním okruhu – máme zde 3 HCČ zásobující 3 parogenerátory ve tvaru U. Systém samozřejmě obsahuje aktivní a pasivní bezpečnostní prvky s redundancí a řízení výkonu pomocí regulačních tyčí. RR proto spoléhá na princip modulárnosti (až 90% komponent se vyrobí v továrně) a vyšší instalovaného výkonu pro snížení LCOE. Primární využití těchto bloků firma vidí v základním zatížení pro přímořské i vnitrozemní lokality s možností kogenerace tepla nebo výroby vodíku a syntetických paliv.

Projekt se nyní nachází ve fázi licencování ve Velké Británii u regulačního úřadu ONR (zažádáno o GDA v roce 2022), kde počítají s dokončením licencování do roku 2026 a začátku stavby první lokality. Pro zkrácení doby ověřování designu se zde nenacházejí žádné větší inovativní technologie, které v konzervativním jaderném sektoru prodlužují ověřování bezpečnosti designu. Výstavba by neměla trvat déle než 4 roky, takže v roce 2030 může být spuštěn první blok, pokud se najde investor / odběratel technologie – nejlépe na území UK. Technické parametry bloku popisuje Tabulka č. 7. [11]

Tabulka č. 7: Základní technické parametry RR SMR [11]

Typ reaktoru	Parametry páry	Obohacení, počet PS, délka kampaně	Životnost (roky)	Reaktorová nádoba		
				Výška (m)	Průměr (m)	Váha (t)
PWR 470 MW <sub>e</sub>	15,5 MPa 325 °C	<5 % <sup>235</sup> U, 121 PS, 1,5 roku	60+	7,9	4,2	150



Obrázek č. 8: Reaktorová nádoba Rolls-Royce SMR [26]

## 2.6 NUWARD EDF

EDF se řadí mezi přední výrobce a provozovatele jaderných elektráren ve světě – první elektrárna ve Francii v roce 1963. V současnosti provozují 56 bloků ve Francii a dalších 8 ve Velké Británii s plánem rozšířit působnost v dalších státech v EU. NUWARD vznikla jako dceřiná společnost EDF Group jako společný podnik 7 výrobců komponent výhradně pro vývoj a zprovoznění SMR projektů. Firma dostává politickou podporu od stávající vlády Francie, která spoléhá na jadernou energetiku. [17]

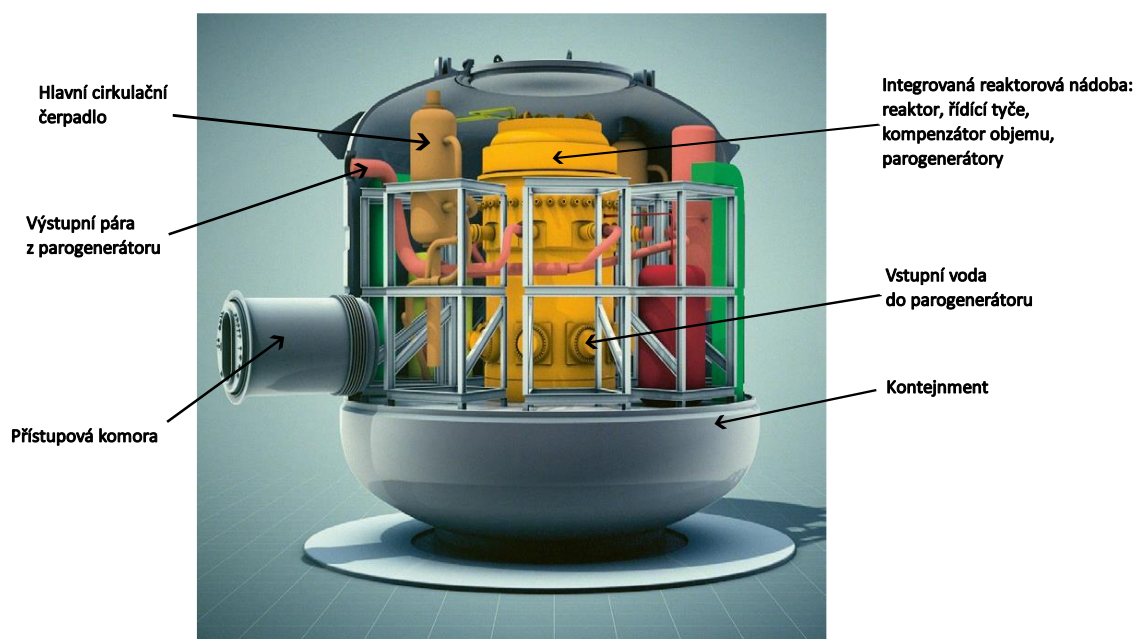
SMR od NUWARD se vyznačuje dvěma integrovanými reaktorovými nádobami, každá dodávající výkon 170 MW<sub>e</sub>, ve společné reaktorové budově, s nezávislou produkcí tepla a oddělenými kontejnmenty. Ocelové kontejnmenty jsou ponořené do vody a mezi oběma reaktory je umístěn bazén s vyhořelým palivem. Tím se docílí zmenšení rozměrů a pasivní systémy dokáží chladit oba reaktory po dobu 3 dní bez napájení. K řízení využívá regulačních tyčí a vyhořívající absorbatory bez bóru. Voda v reaktoru se pohání nucenou cirkulací 6 čerpadly do 2 parogenerátorů umístěných v reaktorové nádobě.

Projektované jsou k nahrazení fosilních zdrojů elektřiny a tepla nebo k doplnění OZE. Díky dvěma reaktorům se snadno regulují výkony dle požadavků a proces výměny paliva může probíhat s druhým v provozu. Vhodné lokality jsou jak přímořské, tak u řek ve vnitrozemí - voda je nedílnou součástí pro naplňování nádrží a pro konvenční kondenzátor, nicméně suché chlazení se také vyvíjí. Základní technické parametry popisuje Tabulka č. 8.

Společně s RR SMR se proces licencování provádí na standardy EU, včetně připojení do elektrizační soustavy ENTSO-E. NUWARD v minulém roce ukončil koncepční fázi a nyní probíhá základní fáze, od roku 2026 pak detailní fáze se začátkem komercializace. Uvedení do provozu zatím není jisté, plánuje se začátek stavby ve Francii po roce 2030. [11]

Tabulka č. 8: Základní technické parametry NUWARD SMR [11]

Typ reaktoru	Parametry páry	Obohacení, počet PS, délka kampaně	Životnost (roky)	Reaktorová nádoba		
				Výška (m)	Průměr (m)	Váha (t)
PWR 170 MW <sub>e</sub>	15 MPa 307 °C	<5 % <sup>235</sup> U, 76 PS, 2 roky	60+	15	5	310



Obrázek č. 9: Reaktorový blok NUWARD [27]

## 2.7 SMART KAERI

KAERI se již od zrodu v roce 1959 zabývá vývojem komerčních jaderných elektráren pro Korejskou republiku a v posledních letech rozšířila působnost do Saudské Arábie a Spojených arabských emirátů. Know-how společnosti spočívá v těžkovodních (varianta CANDU) a lehkovodních tlakovodních reaktorech o vysokých výkonech (1000 a 1400 MW<sub>e</sub>). Existuje zde úzká spolupráce s korejskými společnostmi zaměřenými na výstavbu elektráren a výrobu paliva. V poslední řadě firma KHNP pak provozuje tyto designy a nyní operuje s 24 jadernými bloky v Koreji a pomáhá s dalšími 4 bloky v Barakah – Spojené arabské emiráty. [18]

Design SMART od KAERI používá integrovaný reaktor s elektrickým výkonem 107 MW<sub>e</sub> s inherentní bezpečností a pasivními systémy až na nucenou cirkulaci. Pro řízení výkonu používají regulační tyče a boritá voda. Využití se předpokládá ve výrobě tepla, odsolování vody a výrobě elektřiny v malých nebo izolovaných soustavách, tj. do 100 000 obyvatel. Technické parametry obsahuje Tabulka č. 9 .

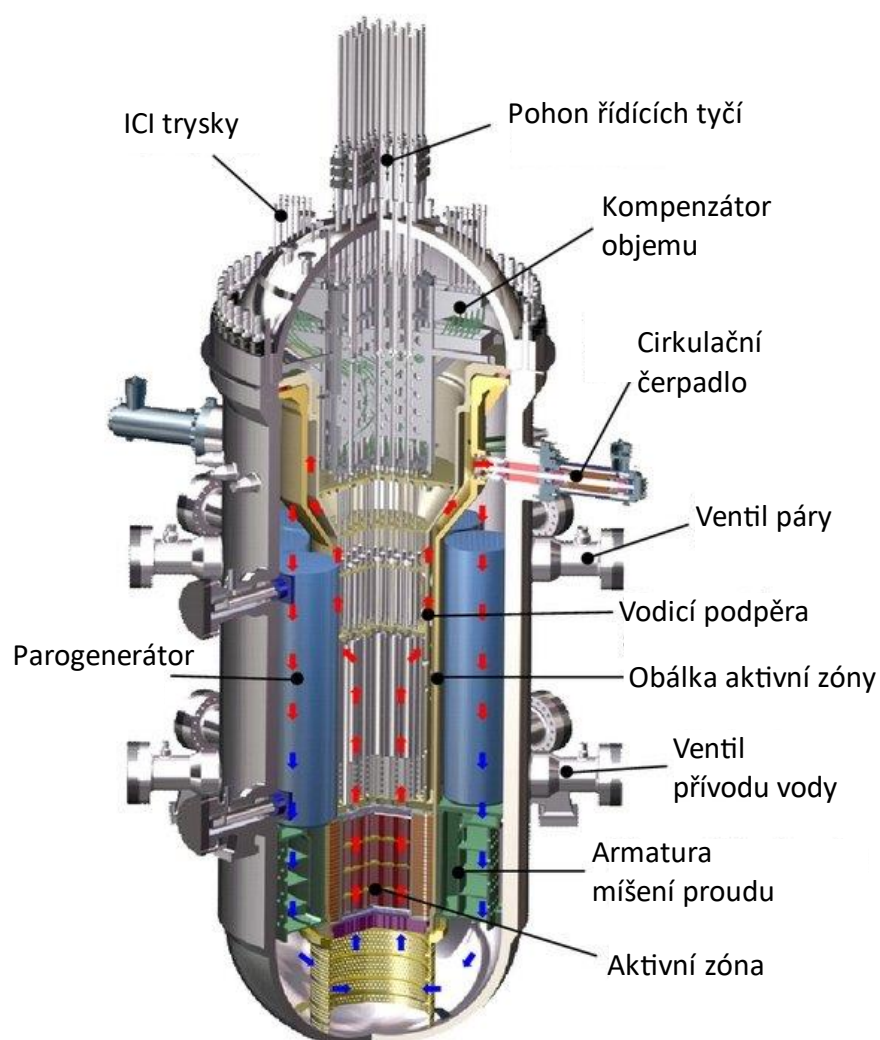
Oproti ostatním designům má značný náskok v licencování, protože se začal vyvíjet již v roce 1999 a v Koreji obdržel od regulačního úřadu NSSC certifikaci v roce 2012. V následujících letech k tomuto designu byl vyvinut pasivní bezpečnostní systém a schválen v roce 2015. Tento reaktor se primárně vyvinul na export a vznikla tak spolupráce se Saudskou Arábií o výstavbě několika bloků v následujících letech. Od roku 2020 ale nedošlo k posunu, neboť se stále diskutuje o možnosti spolupráce.

S ohledem na nízkou poptávku se KAERI rozhodlo vyvinout větší integrovaný reaktor i-SMR o výkonu 170 MW<sub>e</sub>. V minulém roce dokončil fázi základního designu a nyní přešel do certifikace v Koreji, kde se počítá s vyhotovením v roce 2028. Bohužel není jisté, jestli se někde začne stavět a zda bude uznán evropskými regulačními úřady. Plán pro malé a střední reaktory od MPO z května 2023 stále uvažuje SMART před i-SMR, to ale neznamená, že se nejedná o perspektivní design, a tak ho v této práci porovnám s ostatními designy. [11]



Tabulka č. 9: Základní technické parametry SMART a i-SMR [11]

Typ reaktoru	Parametry páry	Obohacení, počet PS, délka kampaně	Životnost (roky)	Reaktorová nádoba		
				Výška (m)	Průměr (m)	Váha (t)
PWR 107 MW <sub>e</sub>	15 MPa 322 °C	<5 % <sup>235</sup> U, 57 PS, 1,5 roku	60+	18,5	6,5	1000
PWR 170 MW <sub>e</sub>	15 MPa 321 °C	<5 % <sup>235</sup> U, 69 PS, 2 roky	80	23	5	650



Obrázek č. 10: Pohled na integrovaný reaktor SMART [28]

## 2.8 Westinghouse AP300

Westinghouse Electric Company (WEC) dodává jaderné reaktory na klíč už od počátku komerčního využívání, když spustili Shippingport v roce 1958. Značná část reaktorů v USA a některé ve světě využívají komponenty od WEC. V tendrech pro dostavbu Temelína a Dukovan figuroval jejich design AP1000, který se již postavil v USA a Číně, ale neuspěl v posledním tendru pro nezávaznost přihlášky. [19]

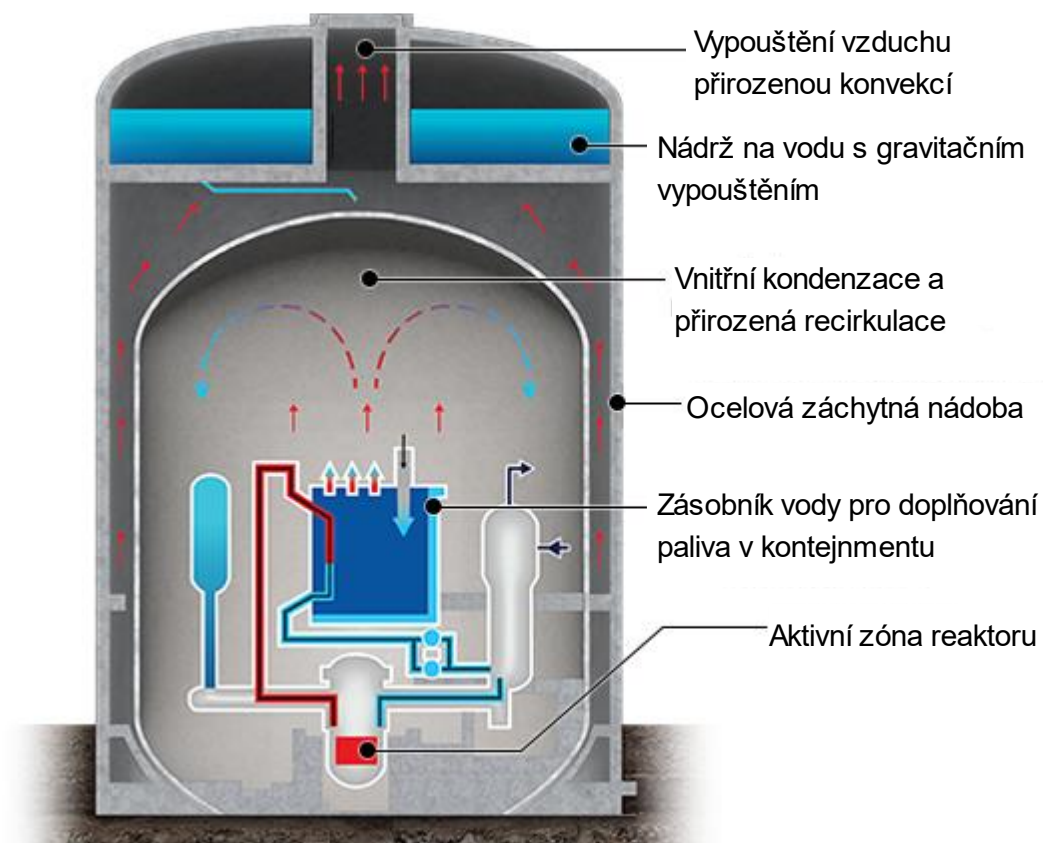
SMR AP300 od WEC je založen na odzkoušeném designu AP1000 ve zmenšené podobě s integrovanými systémy v reaktorové nádobě. Řízení výkonu se provádí regulačními tyčemi a přiléváním borité vody. Výstupní výkon zatím nebyl jasně stanoven, může se pohybovat mezi 270 až 300 MW<sub>e</sub> a samozřejmě bude kogenerace tepla nebo ostrovního provozu u ropných ložisek. Další technické parametry vypisuje Tabulka č. 10. Projekt předpokládá plnou modularitu vyrobením všech komponent v továrně a následně dopravou do lokality pomocí pozemní a říční dopravy.

V únoru 2024 došlo k oznámení podpisu o nasazení 4 bloků AP300 ve Velké Británii skrz soukromou firmu Community Nuclear Power, Ltd s očekávanou stavbou mezi lety 2028-2032. Zvolilo se místo Seal Sands u města Middlesbrough, kde v roce 2021 sice skončil provoz chemického závodu, ale dosud se jedná o lokalitu se silným hutnickým průmyslem. [30]

Proces licencování začal evaluací designu u NRC v letech 2012–2015 a následně v roce 2015, kdy si u NRC vyžádali povolení k testování konceptů a projektových havárií. Pasivní systémy jsou projektovány na udržení chlazení po dobu 7 dní bez vnějšího zásahu. WEC spoléhá na to, že NRC zrychlí proces certifikace díky podobnosti s výchozím designem AP1000, který NRC schválila na konci roku 2011. Žádost o licencování AP300 u NRC se podala v květnu 2023 ale zatím se čeká na podání ve Velké Británii, kde tento proces může trvat až 4 roky. [11]

Tabulka č. 10: Základní technické parametry AP300 [11]

Typ reaktoru	Parametry páry	Obohacení, počet PS, délka kampaně	Životnost (roky)	Reaktorová nádoba		
				Výška (m)	Průměr (m)	Váha (t)
PWR 270–300 MW <sub>e</sub>	15,5 MPa 324 °C	<5 % <sup>235</sup> U, 89 PS, 2 roky	60+	28	3,7	-

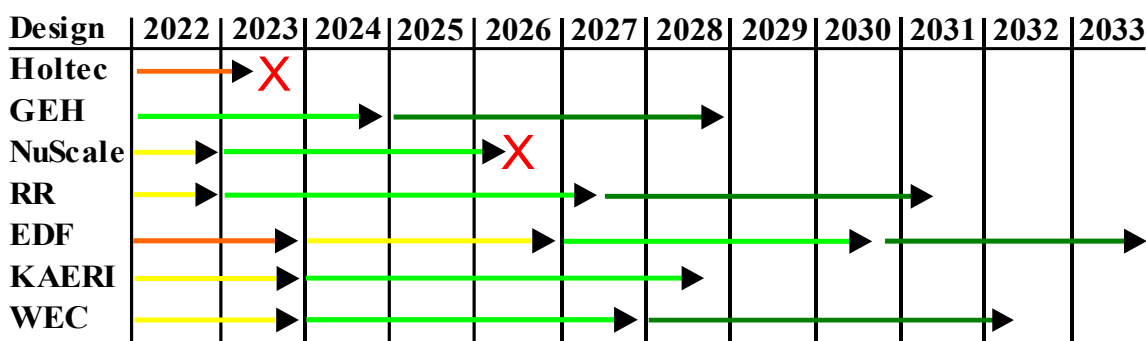


Obrázek č. 11: Popis kontejnmentu AP300 [29]

## 2.9 Shrnutí a výběr designu

Z výše uvedených designů jsem sestavil časovou osu vývoje a tabulku s technickými parametry. Oranžová barva značí design v rané fázi, žlutá základní design, světle zelená licencování a tmavě zelená výstavbu prvního bloku (FOAK).

- Červený křížek u Holtec zobrazuje změnu designu z 160 MW<sub>e</sub> na 300 MW<sub>e</sub> ještě v rané fázi designu, proto následující roky jsou nejisté.
- Červeným křížkem označený rok 2026 u NuScale byl až do listopadu 2023 předpokládaný rok začátku stavby v Idaho Falls, po zrušení plánu ještě před zahájením stavby je časová osa designu nejistá.
- U KAERI zobrazuji vývoj i-SMR, jelikož SMART již má hotové licencování v místě původu, ale žádné plány na výstavbu.
- Plán WEC začít stavbu prvního bloku v roce 2028 spoléhá na rychlý proces certifikace ve Velké Británii, který dosud nezačal.
- GEH má dosud nejjistější začátek stavby po uzavření dohody v Darlington, naproti tomu RR a EDF mají termín zahájení výstavby prvního bloku jen odhadnutý.



Obrázek č. 12: Časová osa vývoje, licencování a stavby FOAK

Díky této ose lze vidět, že se může uvažovat výběr designů GEH BWRX-300, RR SMR, EDF NUWARD SMR, WEC AP300 a případně KAERI i-SMR. Jestli chceme naplnit plán ČEZ a.s. a MPO ke zprovoznění prvního bloku v lokalitě Temelín do roku 2033, tak bych se osobně rozhodoval mezi GEH, RR a WEC. Níže popisují jejich hlavní přednosti:

Velkou výhodou BWRX-300 jsou již probíhající předběžné práce na první lokalitě se záměrem obdržet povolení k výstavbě ke konci roku 2024 a spustit první blok již v roce 2028. Další výhodou je potenciál sériové výroby, protože v Polsku se v rámci spolupráce mezi GEH a Orlen Synthos (a spolupráce se státem) uvažuje o flotile 24 bloků BWRX-300 v 6 lokalitách během příštího desetiletí. Inherentně s technologií BWR souvisí nižší náklady

na  $MW_e$  – používá nižší provozní parametry a nepotřebuje parogenerátor. Naopak komplikace k umístění v ČR spočívá v povolení technologie BWR, se kterou SÚJB nemá zkušenosti a není na to připraven legislativní rámec. S firmou GEH nemá stát zažitou spolupráci, může tak dojít k dlouhému povolovacímu řízení. Na to navazuje zaučování nové generace operátorů na jinou technologii, ale to se dá vyřešit v průběhu certifikace. [31]

U RR se jedná o design výkonově srovnatelný s bloky VVER-440 provozovanými v Dukovanech, akorát s více pasivními prvky k zajištění větší bezpečnosti. S tím souvisí snížení nákladů na instalovaný  $MW_e$  oproti ostatním SMR, jenže se zde může projevit komplikace ve vývojové fázi, například půjčky pro zajištění financí. Proces licencování ve Velké Británii stále běží a oproti GEH se první blok očekává o 3 roky později, proto RR ve svém vývoji dává velký důraz na modularitu a stavbu většiny elektrárny pomocí modulů vyráběných sériově v továrně. Pokud tento koncept bude úspěšný, tak využití modulů zkrátí dobu výstavby a design se stává zajímavým pro stanovený harmonogram od ČEZ a.s. Kromě několika nadměrných komponent se vše plánuje převážet v kontejnerech uzpůsobených na železniční a kamionovou dopravu. Spolupráce s ČR dosud nebyla možná, protože RR dodával své reaktory do ponorek a letadlových lodí, nejsou tu tedy zkušenosti s SÚJB.

Velkou předností designu AP300 od WEC je jeho odvození od většího bloku AP1000 s jistými úpravami pasivního chlazení a výměny tepla. Na tento fakt firma spoléhá u procesu certifikace, což taky dokazuje plánem vystavět první 4 bloky ve Velké Británii počínaje rokem 2028. Tento plán nicméně zní optimisticky když ještě nezačali s certifikačním procesem. Další silnou stránkou designu je výroba všech dílů v továrně a následný transport do cílové lokality. S WEC má ČR zažitou spolupráci, jelikož dodával první palivo a nyní opět dodává palivo pro elektrárnu Temelín po ukončení spolupráce s ruským TVEL. Oproti GEH a RR tak mají zkušenosti s českým regulačním úřadem SÚJB. Výběr designu od Westinghouse by mohl dále zlepšit vztahy po odmítnutí jejich velkých zdrojů pro Dukovany a Temelín, kde se plánují celkem 4 velké bloky.

Pro účely této práce volím design od RR pro vysoký výkon, modularitu a harmonogram certifikace. Designy BWRX-300 a AP300 jsou také dobrou volbou, kde první blok BWRX-300 se plánuje stavět již příští rok, ale může působit komplikace s povolováním technologie BWR u SÚJB. Design od WEC má také dobrou modularitu nicméně nemá jistotu v urychlení certifikace, a tudíž časově zaostává.

Tabulka č. 11: Základní technické parametry zvažovaných designů [11]

Design	Typ reaktoru	Parametry páry	Obohacení, počet PS, délka kampaně	Životnost (roky)	Reaktorová nádoba		
					Výška (m)	Průměr (m)	Váha (t)
Holtec SMR-160	PWR 160 MW <sub>e</sub>	15,5 MPa 321 °C	<5 % <sup>235</sup> U, 57 PS, 2 roky	80	15	3	295
GEH BWRX-300	BWR 290 MW <sub>e</sub>	7,2 MPa 288 °C	3,8-4,9 % <sup>235</sup> U, 240 PS, 1-2 roky	60+	26	4	485
NuScale VOYGR	PWR 77 MW <sub>e</sub>	13,8 MPa 316 °C	<5 % <sup>235</sup> U, 37 PS, 1,5 roku	60+	17,7	2,7	-
RR UK SMR	PWR 470 MW <sub>e</sub>	15,5 MPa 325 °C	<5 % <sup>235</sup> U, 121 PS, 1,5 roku	60+	7,9	4,2	150
EDF Nuward	PWR 170 MW <sub>e</sub>	15 MPa 307 °C	<5 % <sup>235</sup> U, 76 PS, 2 roky	60+	15	5	310
KAERI SMART	PWR 107 MW <sub>e</sub>	15 MPa 322 °C	<5 % <sup>235</sup> U, 57 PS, 1,5 roku	60+	18,5	6,5	1000
KAERI i-SMR	PWR 170 MW <sub>e</sub>	15 MPa 321 °C	<5 % <sup>235</sup> U, 69 PS, 2 roky	80	23	5	650
WEC AP300	PWR 270-300 MW <sub>e</sub>	15,5 MPa 324 °C	<5 % <sup>235</sup> U, 89 PS, 2 roky	60+	28	3,7	-

### 3 Výběr lokality

Zhodnocení potenciálu lokality je podloženo výzkumem možného umístění. Plán pro malé a střední reaktory od MPO pracuje převážně s nahrazením současných provozů a výstavbou na takzvaném brownfield, ale nevylučuje potenciální lokality na zelené louce, tj. greenfield. U brownfield lokalit se uvažovaly provozy s minimální dodávkou tepla 1000 TJ nebo 1,5 TWh elektřiny, které zároveň mají v současné době jako palivo uhlí z více než 50 %. Tato dvě kritéria splňuje 37 zdrojů, k čemuž se ještě přidalo 8 ostatních neuhelných zdrojů, lokality Temelín, Dukovany a Blahutovice (v minulosti uvažovaná lokalita pro třetí velkou jadernou elektrárnu, nyní greenfield). Zmiňovaných 37 zdrojů se dále dělí dle využití na: 18 tepláren, 10 uhelných elektráren a 9 průmyslových zdrojů. Z tabulky jsem vybral největší lokality podle instalovaného výkonu a dodané elektrické a tepelné energie.

Tabulka č. 12: Výňatek lokalit ze seznamu zdrojů uvažovaných dokumentem od MPO

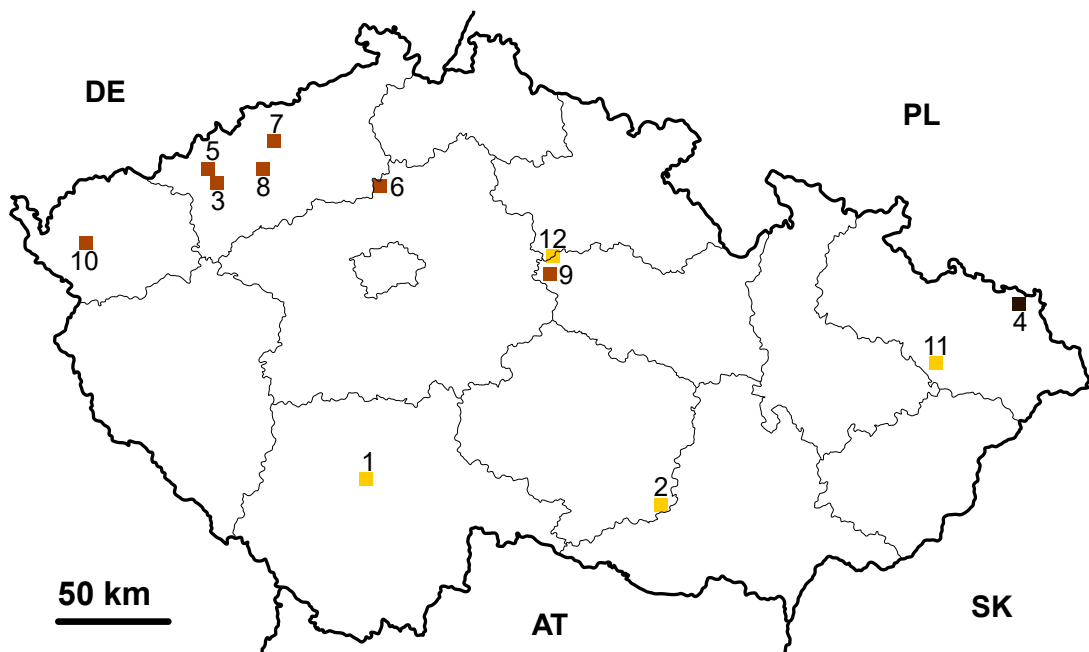
<b>Lokalita</b>	<b>Instalovaný tepelný výkon (MW<sub>t</sub>)</b>	<b>Elektrický výkon (MW<sub>e</sub>)</b>	<b>Roční dodávka tepla (TJ)</b>	<b>Roční výroba elektřiny (GWh)</b>
Mělník	1711	460	10512	-
Třebovice	765	174	3713	773
Opatovice	1068	363	3259	960
Ledvice	1563	770	975	4200
Prunéřov	1581	750	939	4050
Dětmárovice	2074	800	558	1763
Tušimice	1774	800	530	5632
Počerady	2435	1000	63	6099
Chvaletice	2024	820	140	2160
Tameh	1359	254	3413	1014
Litvínov	768	112	5579	1116
Kralupy n. V.	361	67	4510	0
Brno	1072	181	3559	260

Pozn.: Data výkonu a dodávky získané z dokumentu MPO, data z let 2016-2020. Instalovaný tepelný výkon u některých elektráren neodpovídá účinnosti přeměny tepla na elektřinu. Data dle skutečných účinností uhelných elektráren (32-42 %) a výročních zpráv výrobců jsem uvedl v tabulce č. 14.

Nejvhodnější bude SMR využívat převážně pro produkci elektřiny a s druhořadou prioritou teplo vzhledem k předpokládané nestabilitě elektrizační soustavy po roce 2030. S touto úvahou se možné nahrazování fosilních zdrojů týká těchto lokalit: Ledvice, Prunéřov, Dětmárovice, Tušimice, Počerady, Chvaletice a Tisová. Ostatní jsou spíše teplárny s dominantní tepelnou výrobou nad elektrickou. [5]

Společnost ČEZ a.s. uvažuje instalovaný výkon 3 GW<sub>e</sub> v SMR do roku 2050, což vyžaduje více různých lokalit pro výstavbu. Temelín jakožto jaderná lokalita bude první místem výstavby SMR. Uvedení do provozu bylo plánováno na rok 2032, nicméně dle posledních zpráv se termín posunul na rok 2034. K tomu navíc od roku 2020 ČEZ a.s. provádí průzkumy svých lokalit pro potenciál výstavby dalších SMR v několika etapách. V první etapě vzešlo 6 velkých uhelných lokalit: Tušimice, Prunéřov, Ledvice, Dětmárovice, Mělník a Poříčí. Po druhé etapě se odebrala lokalita Poříčí kvůli kolizi s vylučujícím kritériem aktivního zlomu. Tušimice a Dětmárovice měly nejlepší hodnocení, a tak u nich probíhají dodatečné průzkumy. Zbylé elektrárny jsou stále uvažované pro SMR, včetně umístění v blízkosti Dukovan, jenže nemají vysokou prioritu. [33][34][35]

Mezi návrhy od MPO a ČEZ a.s. nebyly dostatečně zmíněné greenfield možnosti. Greenfield pro velké jaderné zdroje (2-4 bloky 1000 MW<sub>e</sub>) se v ČR zkoumal na konci minulého století a vzešly jen 2 možnosti – Blahutovice a Tetov. Obě měly přijatelnou blízkost k velkým odběrům (Ostrava a Hradec Králové respektive), jenže to byly návrhy vzniklé a hodnocené za socialismu a nyní zůstávají jako rezervní pro budoucí velké zdroje.



Obrázek č. 13: Mapa současných provozů (1-10) a greenfieldů Blahutovice (11) a Tetov (12)



### 3.1 Temelín

Jelikož Temelín již má status jaderné lokality, není přínosné zde hodnotit požadavky na umístění a potenciál. Naopak můžu se inspirovat dosavadním postupem v přípravování území pro výstavbu SMR a využít jako referenci pro další lokality. Jaderná elektrárna Temelín se navrhla na 4 velké bloky VVER-1000, z kterých se postavily jen první dva v letech 2000 a 2002. Po neúspěšném tendru o dostavbě zbývajících 2 bloků v roce 2014 se zvažovalo co s lokalitou, která má schválenou studii EIA na 2 velké bloky s rezervou instalovaného výkonu a předimenzovanou infrastrukturu. Právě v této rezervě se může vystavit zdroj o výkonu až 500 MW<sub>e</sub>, tím pádem ideální možnost pro SMR.

Na základě tohoto záměru vznikl Jihočeský jaderný park (společnost s vlastnictvím ČEZ a.s. a Jihočeským krajem) – kromě souběhu velkých bloků a jednoho SMR v Temelíně má projekt podpořit přípravu a zavádění SMR po celé České republice. Stejnou funkci pak plní Útvar rozvoje SMR přímo v ČEZ a.s. Po rozšíření tendru EDU 5 o další tři reaktory (EDU 6, ETE 3 a ETE 4) se lokalita rozšíří o 1 menší SMR a 2 velké reaktory, které se budou stavět až po dokončení Dukovan, tj. po roce 2040. [36]

Projekt v Temelíně zvažuje 7 designů SMR (viz kapitola 2 této práce), s výběrem konkrétního dodavatele v průběhu roku 2024, a umístění na louce jižně od stávajících 2 bloků, viz obrázek níže. Připojení k infrastruktuře se může vyřešit rozšířením ochranného pásma stávající elektrárny a napojení na její přívody.



Obrázek č. 14: Letecký snímek jaderné elektrárny Temelín a rozvodny Kočín [38]

Během přípravy SMR a tendru k velkým blokům dojde ke zvýšení požadavků na infrastrukturu, konkrétně zásobování vodou a vyvedení výkonu. Do budoucna to znamená další přívodní řady z vodní elektrárny Hněvkovice a rozšíření rozvodny Kočín. Po realizaci všech plánů se bude jednat o lokalitu s více než 4,5 GWe koncentrovaného v ploše 2 km<sup>2</sup>. Zároveň se zvýšením počtu jaderných reaktorů v ČR padla otázka hlubinného úložiště, kde jedna z možných lokalit je Janoch v blízkosti Temelína. Vůči tomuto záměru se vyhrazuje spolek Platforma proti hlubinnému úložišti. [36][37]

### 3.2 Tušimice

Současná elektrárna se nachází 5 km východně od města Kadaň v okrese Chomutov v Ústeckém kraji, vzdálené 20 km od hranice s Německem. V širším okruhu se nachází města Žatec, Podbořany, Chomutov, Jirkov, Klášterec nad Ohří a průmyslové zóny plné výrobních linek, tj. využití energie k těžbě uhlí a průmyslu. Na jihozápad se pak rozkládá aktivní Vojenský újezd Hradiště a na jihovýchod vodní nádrž Nechranice.



Obrázek č. 15: Letecký snímek hnědohelné elektrárny Tušimice II [38]

Elektrárna Tušimice II, se čtyřmi bloky o výkonu 200 MW<sub>e</sub>, byla uvedena do provozu v letech 1974-1975 a vlastníkem je společnost ČEZ a.s. Elektrárna Tušimice II se postavila přímo u zdroje paliva lom Nástup – Tušimice. Právě pásová doprava uhlí snižuje výrobní náklady a řadí elektrárnu mezi nejefektivnější provozu v České republice. V letech 2007 až 2012 prošla celá elektrárna komplexní obnovou, kde kromě snížení vypouštěného znečištění (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, popílek) se zlepšily parametry provozu. Účinnost elektrárny se zvýšila o 6 % čímž došlo k 14 % úspoře paliva na vyrobenou MWh.

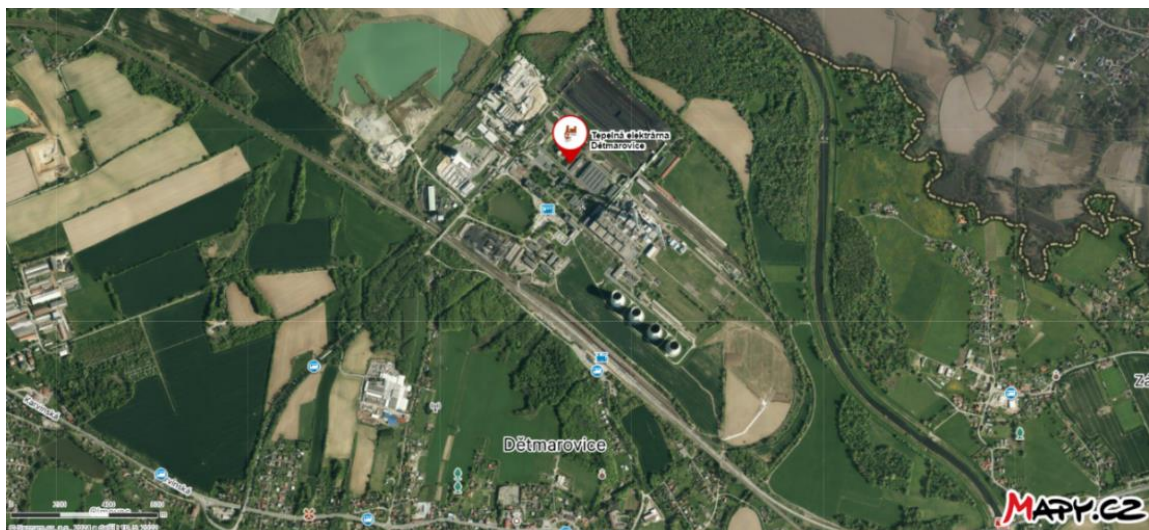
Elektrárna je napojena na síť horkovodů do města Kadaň s celkovou roční dodávkou tepla do 500 TJ. Plánovalo se zde propojení s CZT z elektrárny Prunéřov, která zásobuje Klášterec nad Ohří, Chomutov a Jirkov. Společně s propojením se uvažuje o stavbě plynové kotelny v areálu Tušimic pro pokrytí zásobování tepla během odstávek. [39]

Lokalita k vyvedení výkonu používá venkovní dvojlinku 400 kV V463 a V464 do rozvodny Hradec se záložním vedením 110 kV do rozvodny Vernéřov. Další infrastruktura v areálu zahrnuje plynovod, horkovody a železniční trať. Pro zásobování chladící vodou je využívána čerpací stanice na Ohří s dvěma výtlačnými řády a dvěma zásobníky vody. Plocha elektrárny a okolních pozemků dosahuje 90 ha, což je více než dostačující pro několik zdrojů SMR.

Možné překážky pro umístění v této lokalitě zahrnuje nedávno vystavěné datové centrum, skleníky v areálu bývalé elektrárny ETU I, rekreační areál Nechranické přehrady vzdálené jen 3 km od elektrárny, poddolované území z lomu Nástup, výskyt geologických zlomů v okolí Krušných hor, Vojenský újezd Hradiště, blízkost k osídlení, mezinárodní letecký koridor a nedaleká hranice s Německem.

### 3.3 Dětmárovice

Černouhelná elektrárna Dětmárovice se nachází mezi městy Bohumín a Karviná, obě vzdálené 7 km, přímo na hranici s Polskem. O něco dál se nachází Ostrava, Havířov, Český Těšín a z polské strany pak Rybník. Jedná se o region s vysokým odběrem energie díky vysoké hustotě osídlení (více než 700 tisíc obyvatel v okruhu 25 km), aktivní hlubinné těžbě černého uhlí a hutnickému průmyslu.



Obrázek č. 16: Letecký snímek černouhelné elektrárny Dětmárovice [38]

Elektrárna Dětmárovice byla uvedena do provozu v 70. letech a skládá se ze čtyř černouhelných bloků o výkonu 200 MW<sub>e</sub>, jenž od 2020 jsou jen 2 bloky trvale v provozu (kotel 1 se trvale odstavil a kotel 2 slouží jako záložní zdroj). Rekonstrukce provozu proběhla ve dvou fázích, kde od roku 1998 funguje odsíření a od roku 2014 DENO<sub>x</sub> pro splnění evropských limitů. Provoz elektrárny se několikrát plánoval odstavit, nicméně během COVID-19 a následné války na Ukrajině se její provoz prodloužil nejméně do roku 2025 podle dostupnosti a ceny černého uhlí. [40][41]

Elektrárna ročně vyrobí okolo 2 TWh elektrické energie a až 650 TJ tepla, které se dodává horkovody do Orlové, Bohumína a do skleníků pro pěstování zeleniny v Dolní Lutyni. Kromě tepla z uhelných bloků se v areálu nachází plynové kotle jako záloha pro zásobování horkovodů. Po odstavení elektrárny se zde plánuje výstavba nových plynových zdrojů jako například motory, kotle a paroplynová elektrárna s důrazem na zásobování tepla do horkovodů. Vodu pro provoz chladicích věží čerpá z řeky Olše skrz vodovodní řády z jezu Koukolná. Současný areál zaujímá plochu o něco větší než 70 ha, není ale jisté kolik místa bude potřebovat paroplynová elektrárna a další zdroje.

Výkon z elektrárny se vyvádí pomocí čtyř venkovních vedení 110 kV do nejbližších rozvodn, tj. Albrechtice, Vratimov, Pudlov. V těsné blízkosti elektrárny se nyní dokončuje rozvodna ve vlastnictví ČEPS a.s. a ČEZ Distribuce a.s., o napětích 420/110 kV. Připojení nadcházející paroplynové elektrárny se do této rozvodny plánuje skrz kabelové vedení 110 kV ze stávající rozvodny v areálu elektrárny, nicméně hlavní funkcí rozvodny od ČEPS a.s. bylo posílení přeshraničních toků na vedení 400 kV. [42]

Mezi známé problémy ztěžující případné umístění SMR patří zmiňovaný plynový a paroplynový zdroj, rozvodna ČEPS a.s./ČEZ Distribuce a.s., železniční trať, plánovaný obchvat silnice I/67, horkovody, poddolované území, nejistota zlomu, podzemní voda z Olše, těsná blízkost k polské hranici nebo vysoká hustota osídlení v okolí.

### **3.4 Pruněřov**

Podobně jako elektrárna Tušimice se Pruněřov nachází v okrese Chomutov, přesněji severně od měst Klášterec nad Ohří a Kadaň, navíc blízko k hranici s Německem – jen 12 km. O něco dál pak nalezneme Chomutov, Jirkov, Žatec a průmyslové zóny plné výrobních linek, tj. využití energie k těžbě uhlí a průmyslu.



Obrázek č. 17: Letecký snímek hnědouhelné elektrárny Prunéřov II [38]

Elektrárna Prunéřov II se vystavěla s pěti  $210 \text{ MW}_e$  bloky, které byly postupně uvedeny do provozu v letech 1981 až 1982. Po třiceti letech provozu se dočkaly modernizace a nyní se provozují tři bloky  $250 \text{ MW}_e$ . Zásobování uhlím probíhá ze sousedního povrchového lomu Nástup – Tušimice přes železniční vlečku.

Prunéřovská elektrárna má rozsáhlou horkovodní síť propojující města Jirkov, Chomutov a Klášterec nad Ohří, kde se roční odběr tepla pohybuje okolo 900 TJ. V budoucnu se předpokládá propojení CZT z Tušimic a stavba zdrojů v areálu Prunéřova: plynové motory  $45 \text{ MW}_t$ , biomasová kotelna  $35 \text{ MW}_t$  a plynová kotelna  $78 \text{ MW}_t$ .

Vyvedení výkonu ze stávajících tří bloků míří do PS 400 kV linkami V465 a V466, konkrétně do rozvodny Hradec u Kadaně. V těsné blízkosti elektrárny se nachází rozvodna 110 kV Vernéřov, která slouží k nouzovému vyvedení. Přívod vody je řešen z řeky Ohře a podél železniční trati vede plynovod pro plynové hořáky. Plocha areálu dosahuje více než 100 ha, část ale připadne na zamýšlené plynové zdroje. [43][44]

Při uvažování umístění SMR v této lokalitě narazíme na několik překážek, například plynové zdroje, železniční koridor Cheb-Ústí nad Labem přiléhající k plotu, silnice první třídy I/13, horkovody, vyšší riziko zlomu vlivem blízkosti ke Krušným horám, blízkost k německé hranici nebo přírodní park Prunéřovského potoka.

### 3.5 Mělník

Elektrárna Mělník I, II a III se nachází přibližně 7 km po proudu Labe od města Mělník, Středočeský kraj. Další větší aglomerace v okolí jsou Roudnice nad Labem, Štětí, Kralupy nad Vltavou nebo Neratovice. Odběr elektrické a tepelné energie je zde značný z těchto odběratelů: Praha, přístav Mělník, petrochemické závody v Kralupech nebo průmyslové zóny Štětí a Neratovice. Pro potřeby tepla v Kralupech je zřízená vlastní teplárna dodávající 4500 TJ a vlastní spotřebu elektřiny.



Obrázek č. 18: Letecký snímek hnědouhelné elektrárny Mělník [38]

Elektrárna Mělník I z roku 1960 se v současné době provozuje převážně pro dodávku tepla pomocí 6 kotlů o jmenovitém tepelném výkonu  $183 \text{ MW}_t$  a celkový elektrický výkon ze 4 turbín je  $240 \text{ MW}_e$ . Mělník II má nyní v provozu 2 bloky o elektrickém výkonu  $110 \text{ MW}_e$  a tepelném výkonu  $120 \text{ MW}_t$ . Zdroj Mělník III pracoval s nadkritickými parametry páry až do roku 2021 na výkonu  $500 \text{ MW}_e$ . Pro splnění emisních limitů prošly jednotlivé zdroje odsířením, změnou technologie se snížil obsah  $\text{NO}_x$ , Mělník II se zmenšil na 2 bloky a Mělník III se odstavil úplně.

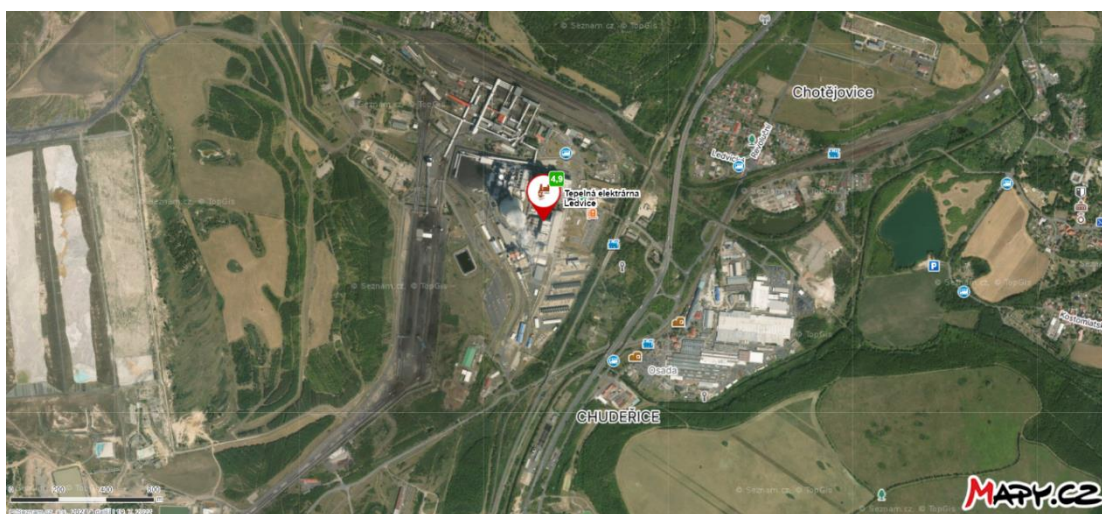
Od roku 2021 probíhá příprava tří paroplynových kogeneračních zdrojů o výkonu  $1000 \text{ MW}_e$  se spuštěním do 2030. Dále je v této variantě uvažováno s výstavbou plynové kotelny  $140 \text{ MW}_t$ , elektrický kotel s akumulací, instalace FVE a případně ZEVO. Zásobování teplem prochází dvojicí potrubí o délce 34 km a průměru 1,2 m. V této síti, spadající pod Pražská teplárenská a.s., se dále nachází zdroje Teplárna Třeboradice a další teplárny v centru Prahy (Malešice, Michle, Invalidovna).

Pro vyvedení výkonu se využívá venkovního vedení 110 kV do rozvodny Mělník, venkovní vedení 400 kV V470 do rozvodny Babylon z původního bloku Mělník III se nevyužívá. Pro chlazení se odebírá voda z přílehlé Labe a hnědé uhlí se dováží vlakovými soupravami z Mostecké pánve. Rozloha areálu 130 ha je více než dostatečná pro několik zdrojů. [45]

Z těchto informací vychází, že umístění SMR by kolidovalo se záměry paroplynových a dalších zdrojů, které by buď musela nahradit krátce po spuštění nebo spolupracovala v těsné blízkosti. K dalším problémům k umístění rozhodně patří sousedství s řekou Labe – ohrožení povodní Q100, umístění na sedimentovém podloží, zásah do CHOPAV nebo kolize s leteckými koridory.

### 3.6 Ledvice

Elektrárna stojí mezi městy Teplice a Bílina v Ústeckém kraji, hned vedle hnědouhelného lomu Bílina, z kterého přes dopravníky dováží uhlí. Mezi další města v okolí patří Most, Litvínov, Duchcov, Ústí nad Labem nebo Lovosice. Jedná se o hustě obydlenou oblast s významným petrochemickým průmyslem (Litvínov, Lovosice, Ústí nad Labem) a těžbou uhlí v lomu Bílina.



Obrázek č. 19: Letecký snímek hnědouhelné elektrárny Ledvice [38]

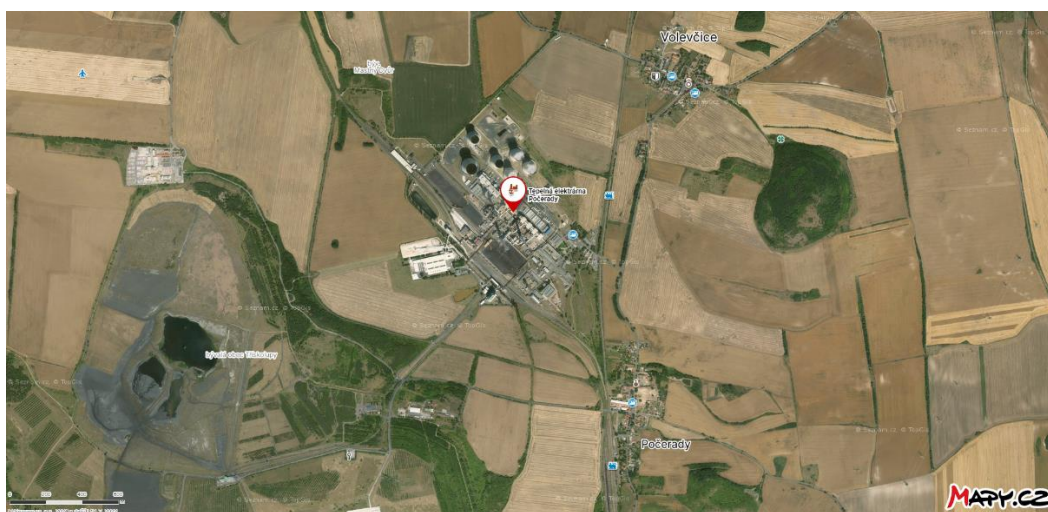
Areál se využívá pro výrobu už od roku 1966, kdy se tu postavilo 5 bloků s celkovým výkonem 640 MW<sub>e</sub>. K splnění emisních limitů se postupně odstavovaly a rekonstruovaly, takže nyní zde najdeme jen blok 4 v provozu pro teplárenské účely. Od roku 2017 je v provozu nový nadkritický blok 6 s výkonem 660 MW<sub>e</sub>, jedná se tak o nejmodernější uhelný blok v ČR s vysokou účinností (více než 42 %) výroby a čištění spalin.

Vyvedení tepla z elektrárny se provádí parovody do měst Teplice a Bílina a horkovodem do Bíliny. V areálu se ještě nachází plynová kotelna pro zálohu dodávky. Vyvedení výkonu z bloku 6 míří venkovním vedením 400 kV V016, z bloku 4 linkou 110 kV, obojí do rozvodny Chotějovice v těsné blízkosti elektrárny. Zásobování vody pro kondenzátory je zajištěno čerpací stanicí v Dolních Zálezlech z Labe se zálohou v nádrži Všechlapy. Areál má rozlohu přibližně 130 ha. [46]

Pro umístění SMR do této lokality se musí zvážit vliv několika překážek, například nevhodné podloží (sprašová hlína), poddolované území lomu Bílina, zlomy v Krušných horách, železniční trať, silnice I. třídy I/13, souběh s plynovým zdrojem a FVE v areálu, blízkost rozvodny Chotějovice a v neposlední řadě značná hustota osídlení v okruhu 30 km.

### 3.7 Počerady

Lokalita Počerady se nachází mezi městy Louny, Žatec a Most v Ústeckém kraji, nedaleko od CHKO České středohoří. V relativně malé ploše se nachází 4 velké elektrárny (Tušimice, Pruněrov, Ledvice a Počerady) a několik menších, které více než dostatečně pokrývají poptávku po teple a elektřině Ústeckého kraje.



Obrázek č. 20: Letecká mapa elektrárny Počerady [38]

Elektrárnou Počerady se myslí pět hnědouhelných bloků z roku 1977 o celkovém výkonu 1000 MW<sub>e</sub>, což z ní dělá největší hnědouhelnou elektrárnu v ČR. Spadá pod majetek Sev.en Group a.s., která vlastní lom Vršany, odkud se železnicí dováží palivo. Podle vyjádření firmy se v současné ekonomice uhelné zdroje stávají nekonkurenceschopné a zvažuje se jejich zavření. O zavření také usiluje řada ekologických organizací, protože spolu s elektrárnou Chvaletice se jedná o nejhorší zdroje znečištění v ČR.



V areálu elektrárny se vystavěla a od roku 2014 provozuje paroplynová elektrárna od ČEZ a.s. s výkonem 890 MW<sub>e</sub> a účinností až 60 % pro polo špičkové pokrytí diagramu zatížení. Vzhledem k strategii státu se plynové zdroje stanou kritickými pro přechod energetiky ve 30. letech, proto případná elektrárna SMR se musí zvážit se souběhem s paroplynovou elektrárnou.

Venkovní vedení 400 kV do rozvodny Výškov se skládá ze tří linek V467, V468 a V469. Pro chlazení se využívá vody z řeky Ohře. Současný areál se rozkládá na ploše 70 ha, jenže část zaujímá paroplynová elektrárna. Pro umístění více bloků SMR by se hodilo rozšířit lokalitu a zachovat stávající infrastrukturu vyvedení výkonu. [47] [48]

Největší komplikací k umístění zdroje SMR je samozřejmě provoz paroplynové elektrárny a zájem Sev.en Group a.s. k přechodu z uhelného zdroje na jaderný, jenže firma nemá zkušenosti s jadernou legislativou a provozem jaderné elektrárny. Dále za zmínku patří nevhodné podloží (nezpevněný sediment), neprozkoumaný vliv zlomů, železniční trať a blízkost k CHKO.

### 3.8 Chvaletice

Elektrárna se nachází na půlce cesty mezi Kolínem a Pardubicemi na břehu Labe. Podobně jako elektrárna Mělník nedisponuje uhelným lomem a palivo se dováží po železnici, dříve také po vodě. Mezi významné průmyslové zóny v okolí rozhodně patří petrochemický průmysl Pardubic a průmyslové zóny Kolína nebo Kutné Hory.



Obrázek č. 21: Letecká mapa elektrárny Chvaletice [38]

Elektrárna Chvaletice obsahuje 4 bloky ze 70. let o celkovém výkonu 820 MW<sub>e</sub> a spadá pod majetek Sev.en Group a.s. Pro zachování provozu musela projít modernizací a snížení vypouštěných látek, nicméně stále má problémy s limitem rtuti. Majitel stejně jako u Počerad zvažuje uzavření při zvyšujících se cenách emisních povolenek. O zavření také usiluje řada ekologických organizací, protože spolu s elektrárnou Počerad se jedná o nejhorší zdroje znečištění v ČR. [48] [49]

Pro vyvedení výkonu je zde dvoulinka venkovního vedení 400 kV V471 a V472 do rozvodny Týnec, záložní čtyřlinkové vedení 110 kV míří do rozvoden Týnec a Opočíněk. Chladicí voda se čerpá z přílehlé Labe a dostupná plocha areálu činí 80 ha, což je dostatečné pro dvojici zdrojů SMR.

Stejně jako u lokality Počerad se zde projeví vliv vlastníka bez jaderné zkušenosti a absence záměru přechodu k jaderné energetice. Co se týče samotného areálu, tak problémem může být významný železniční koridor Praha – Pardubice, podloží nezpevněného sedimentu, blízkost k Labi a povodňové úrovni Q100 nebo zlomy masivu na jih.

### 3.9 Jiné lokality

Kromě výše zmíněných 8 lokalit (většina z nich spadající pod ČEZ a.s.) stojí za zmínku některé z těchto lokalit: Tisová, Vřesová, Blahutovice, Tetov a jiné greenfield lokality.

Elektrárna Tisová spolu s paroplynovou elektrárnou Vřesová patří firmě Sokolovská uhelná a.s. a obě elektrárny se nachází v blízkosti Sokolova v Karlovarském kraji. S výkonem 300 MW<sub>e</sub> a 320 MW<sub>t</sub> ve dvou blocích to je relativně malý zdroj, který se využívá převážně pro zásobování tepla do sousedních měst a průmyslu. Od roku 2023 firma provádí zkoumání svých lokalit pro možné umístění SMR o výkonu do 500 MW<sub>e</sub> díky grantu Phoenix od ministerstva zahraničí USA. Grant o objemu 1,5 milionu dolarů má pokrýt geologické studie a studii proveditelnosti s očekávanými výsledky v roce 2025. Už teď lze z archivních podkladů říct, že zde bude menší kolize s podložím, zlomy a CHKO Slavkovský les, což lze samozřejmě zahrnout do návrhu a technickým řešením snížit riziko. Pro účely této práce se spíše zaměřím na větší lokality s potenciálem několika bloků SMR. [50]

Paroplynová elektrárna Vřesová s výkonem 400 MW<sub>e</sub> se od roku 1996 využívala spolu s výrobou energoplynu v areálu (do té doby zde byla výroba svítiplynu), jenže po odstavení zplyňování uhlí se provoz řídil dovozem zemního plynu. Zdroj má rychlou regulaci a díky modernizaci se jedná o nejmodernější paroplynovou elektrárnu v ČR, která bude klíčovou v přechodu energetiky na nefosilní zdroje. Umístování zdroje SMR v této lokalitě bych zvážil až po stavbě v jiných lokalitách kvůli provozu paroplynové elektrárny. [51]

Lokalita Blahutovice se nachází mezi městy Hranice a Nový Jičín na okraji Moravskoslezského kraje. S umístěním se počítá již od 70. let minulého století v územních plánech (ÚP), zásadách územního rozvoje (ZÚR) kraje a v politice územního rozvoje (PÚR) pod označením E4b o rozloze 173 ha. Strategické umístění blízko Ostravy, relativně dobré podloží a dostupnost chladicí vody z Bečvy mělo potenciál, nicméně s revolucí a odstoupení komunistické strany skončil projekt v šuplíku. Od té doby byly identifikovány ztěžující okolnosti: v širším okruhu se vyskytovaly zemětřesení, přítomnost možného zlomu přímo pod územím a vzdálenost od jakékoliv infrastruktury. Tyto hlediska mění záměr a nyní se jedná o rezervní lokalitu. Zůstává otázkou, zda se zde zlepší veřejné mínění a ekonomičnost výstavby infrastruktury, proto to beru jako zálohu. [52][53]

Dalším v pořadí pro velký zdroj měl být Tetov, přibližně 6 km na sever od stávající uhelné elektrárny Chvaletice a 20 km na západ od Pardubic. Greenfield Tetov skončil obdobně jako Blahutovice v koncepční fázi umístění, nicméně v ÚP, ZÚR nebo PÚR již od roku 2006 není zmíněná – důvodem byl odpor veřejnosti a ekologů, jelikož umístění by si vyžádalo vykácení rozsáhlého lesa a zbourání několika obcí. Protože jsem v okolí zhodnotil možný brownfield s podobnými vlastnostmi, tak nevidím přínos v hodnocení tohoto greenfieldu. [54]

Nalezení vhodného greenfieldu bude chtít kompromis z hlediska infrastruktury, blízkosti k odběrům, vhodného podloží, dostatku chladicí vody (případně zvolit méně účinnější vzduchové chlazení v odlehlé oblasti), dopravitelnosti komponent a hustoty osídlení. Pro určení takové lokality bude přínosné vytvořit interaktivní mapu s vrstvami zahrnující přírodní zdroje, vzdálenost od infrastruktury a kolize s Vyhl. č. 378/2016 Sb. Takových lokalit bude v ČR vzhledem k rozloze státu a rozložení aglomerací málo. Ke zjištění nových lokalit se musí provést zdoluhavé studie dostupných lokalit splňující náročné požadavky, které předchází generace pro velké zdroje již provedly, viz Blahutovice a Tetov, akorát nyní již pro menší zdroje SMR.

### 3.10 Výběr lokality

Po zběžném zhodnocení několika zvažovaných lokalit se ve zbytku práce zaměřím na jednu lokalitu. Největším potenciálem bude mít v současné urgenci poptávky po elektrické energii brownfield s vybudovanou infrastrukturou vyvedení výkonu, přívodu vody a dopravní spojení. Dalším pozitivem bude lokalita, kde se již zkoumá umístění zdroje SMR, jestli vlastníkem je ČEZ a.s. jakožto jediný provozovatel stávajících jaderných elektráren nebo kde se projeví nedostatek výkonu nejvíce. Pro shrnutí brownfield lokalit jsem vytvořil tabulku se základními údaji a nejdůležitějším parametrem pro (ne)umístění.

Tabulka č. 13: Shrnutí možných lokalit s uhelnou elektrárnou

Lokalita	Výkon (MW <sub>t</sub> + MW <sub>e</sub> )	Zdroj vody	Rozloha (ha)	Vlastník	Kolize umístění **
Tušimice	2051+800	Ohře	90	ČEZ a.s.	zlom, podloží, vodní nádrž
Dětmarovice	1556+600	Olše	70*	ČEZ a.s.	zlom, rozvodna, Polsko, podloží, paroplyn
Pruněrov	1981+750	Ohře	100*	ČEZ a.s.	zlom, železnice, silnice, plynové zdroje
Mělník	1711+460	Labe	130*	ČEZ a.s.	řeka, podloží, paroplyn, ZEVO
Ledvice	1863+770	Labe	130	ČEZ a.s.	zlom, lom, silnice, podloží
Počerady	2435+1000	Ohře	70*	Sev.en Group a.s.	paroplyn, zlom, CHKO, podloží, záměr vlastníka
Chvaletice	2024+820	Labe	80	Sev.en Group a.s.	řeka, zlom, železnice, záměr vlastníka
Tisová	821+290	Ohře	77	Sokolovská uhelná a.s.	zlom, podloží, CHKO

\* Rozloha stávající elektrárny, přidružené infrastruktury a dalšího zdroje (současný / plánovaný)

\*\* Více vysvětleno v kapitole 4.1.

Z výše vypsanych elektráren mají dobrý potenciál lokality Tušimice, Ledvice a Chvaletice, jelikož vylučujícím faktorem pro mou práci je záměr jiného zdroje – plynové a paroplynové zdroje. Ty budou po odstavení uhelných zdrojů nutné k udržení frekvenční a napěťové stability ES až do výstavby velkých jaderných bloků a SMR. Kolizní faktor „zlom“ se dle archivních záznamů nachází ve všech lokalitách a dle Vyhl. 378 patří k závažným rizikům jaderné bezpečnosti schopným vyřadit lokalitu k dalším posudkům. Jsou proto nutné detailnější zkoumání přímo na lokalitě pro vyvrácení rizika a zahrnutí dostatečných opatření v projekční fázi. Rozloha není limitujícím faktorem, kde dodavatelé designu projektují nejvýše 4 ha na kontejnment jednoho bloku elektrárny.

U lokality Chvaletice se nachází relativně dobré podmínky až na ohrožení povodní a vlastníka, který dosud o jaderném zdroji neuvažoval a nedělají se zde průzkumné práce pro ověření umístění lokality. Nebude se tak jednat o lokalitu pro umístění prvních bloků SMR, ale lze předpokládat pro budoucí využití po vyhodnocení ekonomičnosti SMR.

Elektrárna Ledvice vykazuje řešitelné kolize, které se musí ještě prozkoumat, tj. vliv lomu Bílina na podloží a aktivnost zlomů v nedalekých Krušných horách. Významná silnice první třídy v sousedství elektrárny se dá relativně lehce ošetřit technickými opatřeními. Potíž zde vidím s nadkritickým blokem 6, který je v provozu teprve 7 let a očekává se jeho další provoz. Díky moderní technologii má na uhelnou elektrárnu vysokou účinnost a čistotu provozu, můžu tedy předpokládat, že se udrží co nejdéle v provozu.

Tušimice II se podobně jako elektrárna Ledvice nachází vedle lomu na hnědé uhlí a z archivních záznamů má náznak zlomu v blízké vzdálenosti nebo nekvalitní podloží. Velkým plusem je pokročilá fáze zkoumání lokality, kde již proběhly vrty na geologii a hydrologii. Specifickým problémem tohoto umístění je vodní nádrž Nechranice, kde se může koncentrovat tritium, tj. izotop vodíku s 2 neutrony v jádře navíc. Tritium tvoří u současných elektráren Temelín a Dukovany největší podíl na vypouštěné aktivitě a pro splnění bezpečnostní limitů od SÚJB se výpusť z kondenzátorů ředí v řece. Tento problém se zjistil u nádrže Mohelno, sloužící jako zdroj chladící vody pro elektrárnu Dukovany a pro tendr EDU 5 se zkoumal vliv dalšího zdroje [55] na limit výpustí. Pro SMR v Tušimicích se musí vyhotovit obdobná studie a na základě ní zvolit formu opatření – vypařování tritia v areálu, zachytávání a filtrace, vypouštění za vodní nádrží nebo jiné. Jedná se o technicky řešitelný problém, a proto si volím tuto lokalitu pro další zkoumání.

## 4 Požadavky na umístění

V České republice se nyní nachází jen šest jaderných lokalit – Dukovany, Temelín, Řež (výzkumné reaktory) a úložiště radioaktivního odpadu – Richard, Bratrství a Hostim. Každá nová lokalita je předmětem individuálního posouzení na základě požadavků Zákona č. 263/2016 Sb., atomový zákon (AZ), který posuzuje vhodnost daného území a pro SMR se neočekává nižší úroveň bezpečnosti a ochrany, než je tomu u stávajících jaderných zařízeních. Tyto požadavky jsou blíže popsány ve Vyhlášce č. 378/2016 Sb. o umístování jaderného zařízení (Vyhl. 378) a ve Vyhlášce č. 329/2017 Sb. o požadavcích na projekt jaderného zařízení (Vyhl. 329). [56]

Přijetí nebo vyloučení lokality se tudíž bude řídit splněním požadavků obou vyhlášek a AZ, souladem se SEK a PÚR, připojitelností k ES a přijatelném vlivu na životní prostředí. Aktualizovaná SEK počítá s růstem jaderné energetiky, bohužel zatím nespécifikuje umístění SMR v ČR, jelikož je stále ve fázi schvalování. Sekce Elektroenergetika v PÚR je svou povahou provázaná se SEK a příslušně k tomu ovlivní podřazené dokumenty ZÚR a ÚP v daných oblastech. Připojitelnost k elektrizační a teplárenské soustavě se bude zkoumat studiiemi jen v případě zásadního rozdílu v instalovaném výkonu oproti stávající lokalitě a podle ČEPS a.s. není problém připojit SMR kdekoliv, myšleno jak brownfield, tak greenfield, tj. za předpokladu dostatku financí. [5]

Studie EIA (zákon č. 100/2001 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí) má pravděpodobně nejdlejší dobu řízení z výše uvedených požadavků, kde se zkoumá vliv jaderného zařízení v lokalitě na životní prostředí a obyvatelstvo ještě před zahájením projektu, během výstavby a při provozu pomocí monitoringu. Celý proces se průběžně sleduje a zůstává pro veřejnost dostupný, čímž se otevírá možnost vznášet připomínky a dotazy k jednotlivým sekcím. Pro příklad Temelína, kde se záměr EIA předložil na Ministerstvo životního prostředí (MŽP) v roce 2008, se dokonce ozvaly státy Rakousko a Německo. Ze záměru proběhlo zjišťovací řízení, z čehož vyšly požadavky na obsah dokumentace EIA - 34 hlavních a 165 dílčích požadavků. Po 5 letech od podání záměru na MŽP vyšlo stanovisko EIA, obsahující 90 podmínek a požadavků rozdělených do fází přípravy, výstavby a provozu. Ty se musí dodržet v projektové dokumentaci stavby, načež se začne teprve vyhotovovat proces získání stavebního povolení. [57]

#### 4.1 Atomový zákon, Vyhláška č. 378/2016 Sb. a č. 329/2017 Sb.

Veškeré využívání jaderné energie pro civilní účely se řídí AZ včetně energetických zařízení s reaktorem. V samotném AZ se principy zmiňují v Hlavě I, § 45 (principy bezpečného využívání jaderné energie) a § 46 (požadavky na projekt jaderného zařízení a projektování jaderného zařízení). Dále se zde vymezují obecné povinnosti držitele povolení, ať už pro stavbu, první spuštění, provoz nebo vyřazování, a jak toto povolení získat skrz SÚJB. Nejdůležitějším paragrafem ale bude § 47 o umístění jaderného zařízení, ke kterému vyšla dodatečná Vyhl. 378.

Posuzování možné lokality se provádí pro zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany, technické bezpečnosti a možných radiačních mimořádných událostí. Umístěné jaderné zařízení nesmí zhoršit vlastnosti výše uvedených parametrů, které se před stavbou důkladně změří, například obsah radionuklidů v areálu a ve složkách okolního životního prostředí. K dosažení stanovených limitů se při projektování mohou využít technická opatření, ze stávající úrovně vědy a techniky, a administrativní opatření.

Když se zaměříme na Vyhl. 378, tak získáváme přehled o posuzovaných vlastnostech území, které se dále dělí na a) přírodní vlastnosti a jevy, b) jevy z činnosti člověka. U každé vlastnosti a jevu se v detailu popisuje její dovolený vliv, což se zhodnotí a zahrne do žádosti o povolení k umístění. Činnosti se dále popisují v bezpečnostním návodu od SÚJB, označených Jaderná bezpečnost BN-JB-4.1 (přírodní vlivy) a BN-JB-4.2 (činnosti člověka).

Přírodní vlastnosti zahrnují:

- 1) seismicita,
- 2) porušení území zlomem v zemské kůře,
- 3) povodně,
- 4) oběh podzemní vody,
- 5) geodynamické jevy a geotechnické parametry základových půd,
- 6) klima a meteorologie,
- 7) biologické jevy,
- 8) přírodní požáry.

Lidské činnosti:

- 1) pád letadla a jiných objektů,
- 2) výbuchy a požáry,
- 3) kolize s ochranným nebo bezpečnostním pásmem,
- 4) vliv jiného jaderného zařízení,
- 5) silné vibrace,
- 6) elektromagnetické interference,
- 7) vířivý elektrický proud,
- 8) negativní projev letecké, silniční, železniční a vodní dopravy,
- 9) působení produktovodů a energetického vedení,
- 10) znečištění ovzduší, horninového prostředí povrchových a podzemních vod,
- 11) provoz zařízení pracujícího s látkami, které jsou hořlavé, výbušné, toxické, dusivé, s korozivními účinky nebo radioaktivní.

Přijatelnost lokality se získává na základě archivních a terénních průzkumů přírodních a lidských vlivů v areálu a v okruhu 25 km. Mezi ty důležitější patří seismicita (stabilita budov na otřesy, okruh až 300 km), zlomy (vylučující kritérium, technické opatření nemožné nebo ekonomicky nevýhodné), hydrologie, geodynamika (vlastnost základových půd), pád letadla a jiných objektů, výbuchy, kolize s infrastrukturou (doprava, produktovody) a souběh s nebezpečnými provozami. Kromě vlivu okolí na jaderné zařízení se provádí i opak v podobě dopadu na obyvatele (a jiné provozování) a ten se zkoumá šířením radioaktivní látky různými médii, například vzduchem, vodou nebo potravním řetězcem. Zásadní pro výpočet dopadu na životní prostředí a obyvatele je zjistit rozložení a hustotu osídlení v dotčeném území.

Vyhláška č. 329/2017 Sb. o požadavcích na projekt jaderného zařízení navazuje na předchozí vyhlášku v procesu umístění jaderného zařízení. V procesu vyhotovení projektu se respektují bezpečnostní cíle, skutečnosti vlastnosti území, možné vnitřní události, ochrana do hloubky a výstupem jsou požadavky na zařízení, požadavky na bezpečnostní funkce a projektová východiska – odolnost jaderného zařízení, spolehlivost komponent a systémů během životního cyklu jaderného zařízení. Pro detailnější postup a hodnotící kritéria se vytvořil bezpečnostní návod BN-JB-3.1 od SÚJB. [56]



## 4.2 Stavební povolení

Výstavba jaderného zařízení podléhá předpisům zakotveným ve stavebním zákoně 283/2021 Sb. a zároveň musí výstavba splňovat požadavky speciální legislativy dané AZ. Stavební zákon dělí výstavbu do pěti etap: a) umístění stavby, b) výstavba, c) spouštění a zkušební provoz, d) trvalý a dlouhodobý provoz, e) vyřazování a likvidace, kde další fáze nemůže začít bez dokončení předchozí a vydání povolení k dalšímu postupu.

Až po předložení Zadávací bezpečnostní zprávy, která musí obsahovat dokumentaci o vhodnosti vybrané lokality pro stavbu jaderného zařízení, viz podmínky z předchozí kapitoly, se zahájí řízení územního rozhodnutí. V této fázi mají podstatnou roli kraje a obce, které mají odpovědnost za ZÚR a ÚP, což se také stalo v případě tendru EDU 5 a EDU 6. Ke zdržení došlo z námítky účastníků řízení, aktualizace PÚR a rozsáhlé dokumentace. Po změně stavebního zákona se správní řízení převedlo z města Třebíč přímo pod MPO, které již povolilo území ke stavbě energetického zdroje. [58]

Paralelně s povolením k umístění se vybírají možnosti financování – zdroj peněz, záruka půjčky, záruka výkupu elektřiny a tím rentabilita budoucího jaderného zdroje. Dále se začne vybírat technologie a dodavatel designu prostřednictvím tendru, jelikož se jedná o jaderný zdroj s vysokými nároky na bezpečnost a náklady, takže nad procesem musí dohlížet stát. Kromě designu se musí rozmyslet kdo bude dodavatelem paliva, kde se uskladí a kam s budoucím radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem.

Samotné povolení k výstavbě začíná po vyhotovení Předběžné bezpečnostní zprávy, obsahující průkazná fakta zvoleného projektového řešení. Projekt v této fázi splňuje všechny požadavky na jadernou bezpečnost, radiační ochranu a havarijní připravenost v celém rozsahu životnosti elektrárny a po vyřazení. Ověření požadavků provádí SÚJB, s kterou komunikuje dodavatel designu a subjekty účastníci se stavby.

Když už se vydá povolení k výstavbě, probíhá stejný postup jako u kterékoliv jiné elektrárny – staveniště a zázemí, úprava podkladů, napojení energií a vody, dovoz stavebního materiálu a další potřebná infrastruktura. Koordinace stavebních prací je klíčová pro dodržení harmonogramů a k úspoře financí při zachování požadované kvality stavěných objektů. [59][60]

### 4.3 Připojení k ES

Základním zákonem k výrobě elektrické energie je zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů neboli energetický zákon. Pro účely této práce je poté stěžejní navazující vyhláška č. 16/2016 Sb., o podmínkách připojení k elektrizační soustavě od Energetického regulačního úřadu (ERÚ). [61]

Dle vyhlášky se každý výrobní zdroj nad 10 kW musí před připojením k PS nebo DS nahlásit na regulační úřad skrz Žádost o připojení. Tato žádost se pro každé zařízení podává zvlášť, a to ještě před výstavbou a při každém zvýšení rezervovaného příkonu a výkonu. Pro výrobní nad 0,5 MW se přikládá harmonogram výstavby s těmito termíny: a) splnění vlivu na životní prostředí, b) vydání územního rozhodnutí a stavebního povolení, c) zahájení výstavby. U SMR jakožto nové technologie jsou harmonogramy ještě nejisté a případné zdržení se bude kumulovat. Další problém umístění zdroje je bod i) z paragrafu 8, který se odkazuje na zákon 165/2012 Sb., kde má přednost k připojení podporovaný zdroj, což dosud byly OZE, druhotné zdroje a vysokoúčinné kogenerace elektřiny a tepla. Vzhledem k strategii výstavby jaderných zdrojů by bylo vhodné upravit tento zákon nebo seznam podporovaných zdrojů.

Žádost o připojení má několik posuzujících kritérií provozovatele, mezi něž patří

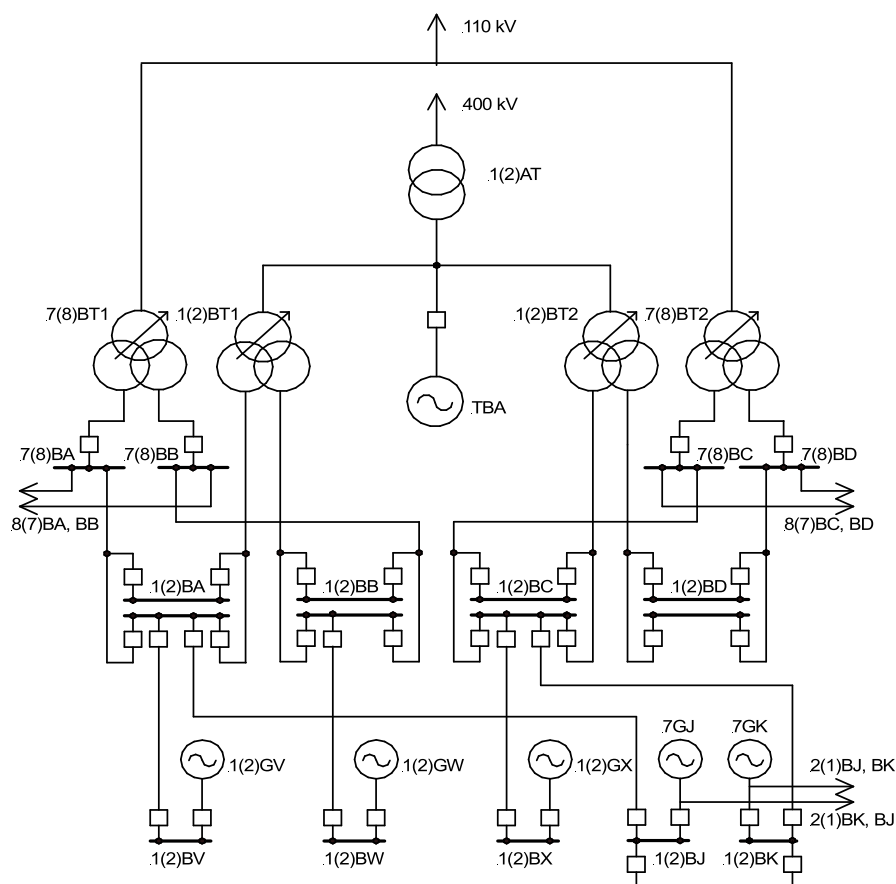
- místo a způsob připojení,
- velikost a časový průběh příkonu a výkonu,
- spolehlivost dodávky,
- zpětné vlivy zařízení na PS nebo DS,
- plánovaný rozvoj soustavy.

Žádost se vypracovává též pro krátkodobé připojení pro zařízení staveniště. Po žádosti následuje vyhotovení studie připojitelnosti, za předpokladu připojení k vysokému napětí a vyšší napěťové hladiny, a smlouvy o připojení k soustavě s provozovatelem. Studie připojitelnosti se vyhotoví spoluprací žadatele a provozovatele PS nebo DS. [64]

Dle Kodexu PS od ČEPS a.s. se určují požadavky na vybavení a infrastrukturu k připojení elektráren. Výkon z alternátoru elektrárny se vyvádí skrz generátorový vypínač, odbočkový transformátor vlastní spotřeby (VS), blokovaný transformátor, blokované vedení

a elektrárenskou rozvodnu. Podmínkou pro schéma vyvedení je takový návrh, aby jednoduchá porucha nezpůsobila výpadek výkonu, který by nebyl možný zabezpečit systémovými službami, tj. výpadek jednoho vedení, pro JE dvou vedení. Důvodem dvou vedení u jaderných elektráren spočívá ve vyšší úrovni zabezpečení napájení, kde jsou tři nezávislé systémy napájení pro chlazení reaktoru (hlavní vedení, rezervní vedení, dieselaagregát). [62]

U příkladu JE Temelín se nachází 2 linky 400 kV na samostatných stožárech a rezervní napájení v podobě linky 110 kV, vše z rozvodny Kočín. Transformátory VS jsou celkem 4, kde 2 z nich jsou odbočkami před blokovým transformátorem s převodem 24/6 kV a 2 jsou paralelně připojené k rezervní lince 110 kV. Pro zdroj SMR se úroveň zabezpečení nezmění, možnou změnou může být vyvedení do 110 kV místo 400 kV v případě malého výkonu elektrárny, tj. jeden blok SMR. Na straně rozvodny nicméně musí dojít k obdobným úpravám, hlavně osazení vypínačů, odpojovačů a signalizace na obou stranách vedení pro nadstandardní úroveň bezpečnosti.



Obrázek č. 22: Elektrické schéma jednoho bloku JE Temelín [65]

#### 4.4 Shrnutí požadavků

Z předchozích 3 podkapitol ve stručnosti vypíšu nutné procesy pro výběr lokality, schválení výběru, výstavby a provozu jaderného zařízení. Zpočátku dojde k vytvoření požadavku výstavby na základě záměru státu, aby byla jistota financování a využití zdroje. V tomto ohledu máme souhlas, ba dokonce urgenci k umístění a výstavbě JE pro zachování energetické stability a soběstačnosti státu. Konkrétní lokalita není vytyčená, jenže náhrada za uhelné zdroje má vyšší prioritu, předpokládá se tak výběr jedné z těchto lokalit pro optimální využití stávající infrastruktury.

Možné lokality aktuálně prochází procesem hodnocení stavu lokality dle AZ a Vyhl. 378, tj. přírodní vlastnosti a lidské činnosti v okruhu 25 km od zamýšleného umístění. S předběžným ověřením vhodnosti se může začít s procesem EIA, nejlépe již s vytipovaným záměrem lokality – instalovaný výkon, možné designy a harmonogram stavby. Designy si vybral ČEZ a.s. ze světově známých firem, které vyvíjí reaktory pro pozemní využití s lehkovodní technologií na souši. Harmonogram se zatím nachází v rané fázi s hrubými odhady termínů, přičemž v průběhu vyhotovení práce se plánované spuštění prvního bloku posunulo z roku 2032 na 2034. Dle úspěchu pilotního projektu se očekává výstavba v dalších lokalitách až do instalovaného výkonu 3 GW<sub>e</sub> do roku 2050.

Po několika letech terénních průzkumů, sloužících jako podklady u Vyhl. 378, a vydání stanoviska EIA, máme dostatečnou znalost lokality pro předložení Zadávací bezpečnostní zprávy, čímž začneme proces žádosti k výstavbě dle stavebního zákona a získání územního rozhodnutí v ÚP a ZÚR. Územní rozhodnutí může být jako EIA řešena s dostatečnou rezervou, neboť ještě není vybrán finální dodavatel designu. S úpravou stavebního zákona v roce 2023 se proces urychluje díky přímé komunikaci s MPO, které má více lidských zdrojů než místní úřady. Zároveň se může řešit připojitelnost do ES, studie dopravitelnosti nebo finanční strategie celého projektu, čímž se myslí například zdroj investičního kapitálu a dohoda o výkupu.

S územním rozhodnutím se může předložit lokalita formou veřejného tendru k dodavatelům designu. Jaderné zařízení má povinný dozor státu jakožto zdroj ovlivňující bezpečnost státu, tím pádem výběr dodavatele určuje vláda s podporou vlastníka lokality a SÚJB. Výherce tendru začne spolupracovat na úpravě projektového řešení ke splnění Vyhl. 329 a Předběžné bezpečnostní zprávy, která podmiňuje obdržení žádosti k výstavbě. V této chvíli se též

vybírání dodavatel jaderného paliva, výrobce klíčových komponent, stavební firmy nebo se podává žádost o připojení k ES. Při obdržení Povolení k výstavbě tak budou zajištěny zdroje pro splnění odhadnutého harmonogramu a nezbývá než doufat v jeho neměnnost. Samotná stavba se moc neliší od jiných energetických zdrojů, rozdílem je samozřejmě důkladný dozor SÚJB na správnost postupu dle projektového řešení. Postavený zdroj se ještě musí spustit, což zahrnuje v tomto pořadí: odzkoušení okruhu bez paliva, těsnost kontejnmentu, fyzikální spouštění, energetické spouštění, zkušební provoz a kolaudace.

Jak je vidět, tak příprava lokality pro umístění jaderného zařízení závisí na řadě subjektů, které celý proces prodlouží na několik let. Se záměrem výstavby v polovině 30. let tohoto století se tento proces musí nastartovat co nejdříve, pro pozdější projekty se využije úspěchu první lokality a proces se tak usnadní.

## 5 Zhodnocení potenciálu

V této kapitole chci uvést příklad, kdy do lokality Tušimice umístím zdroj RR SMR, viz závěry druhé a třetí kapitoly. Výběr lokality Tušimice jsem odůvodnil na konci třetí kapitoly – ČEZ a.s. zde potenciál zhodnotil jako prioritní pro výstavbu prvních bloků v nejaderné lokalitě a potvrzuje to pokračováním terénních průzkumů na vyšší úrovni oproti jiným lokalitám. Volba designu RR je subjektivní a neznamená to, že by byl jednoznačně lepší než například design od GEH nebo WEC. Pro jiné lokality a designy by postup byl obdobný, což se také může stát, finální rozhodnutí se uskuteční předběžně v druhé polovině roku 2024, takže až po vyhotovení této práce.

### 5.1 Technické provedení

Současný stav lokality Tušimice popisují v podkapitole 3.2, nicméně k uskutečnění výstavby zdroje SMR zde bude potřeba několika úprav, které jsem zmiňoval v kapitole 4. Technické úpravy se dále mohou rozdělit do následujících částí pro přehlednost:

- Splnění požadavků Vyhl. 378
- EIA
- Příprava výstavby a stavba
- Elektrické komponenty elektrárny
- Infrastruktura

#### 5.1.1 Příprava lokality – Vyhl. 378 a EIA

Lokalita Tušimice se od roku 2020 zkoumá pro potenciál umístění SMR místo současných bloků. Dosavadní postup z dostupných zdrojů od ČEZ a.s. zahrnuje a) archivní rešerše areálu, b) pilotní vrty na geologii a hydrologii, c) navazující vrty a terénní průzkumy okolí.

Z přírodních vlivů a vlastností můžeme odškrtnout 2 z 8 bodů jako splnitelné – povodně (vyloučeno archivními daty) a klima (meteorologická stanice v areálu), ostatní jsou podmíněné sběrem dat a vyhotovením modelů. Z těchto modelů se vytvoří projekční řešení vybraného designu RR SMR, který má vlastní projekční parametry a ty se v konkrétní lokalitě musí upravit. Možné úpravy popisují dále:

- a) V okruhu 5 km od současné elektrárny jsou z archivu dohledatelné možné zlomy. Jejich aktivnost se již začala zkoumat sondami a pro naplnění tohoto bodu musí lokalita projít detailnějším měřením, například dlouhodobý monitoring v hlubokých vrtech, posléze vytvořit model. Očekávám zde spoustu práce v následujících letech.
- b) Poddolování nebo svahové pohyby v areálu nejsou zaznamenány, oběh podzemní vody a pevnost základových půd (geodynamika a geofyzika) se zkoumá stejnými vrty jako seismicita. Vrty se rozmístí do areálu pro síť měřících stanovišť ještě za provozu uhelné elektrárny. Výsledná data se musí zpracovat do modelů, z nichž se vytyčí nevhodná místa k zakládání budov. Zkoumané parametry totiž ovlivní sílu a složení základových desek s pilíři – úprava projektu podle modelů.
- c) Pro hodnocení seismicity se aktuálně tvoří databáze geologických informací v okruhu 1 km, 5 km, 25 km a 300 km a zkoumání bude trvat 5 let. Data se získají z veřejných seismických stanic, ale v okolí elektrárny se ještě musí vybudovat jedna stálá – data 1 km a 5 km. Stejně jako body a) a b) se výsledky projeví na základové struktuře.
- d) Data na klimatické jevy jsou dostupné z měřící stanice, provoz bude potřeba prodloužit po celou životnost nového zdroje. Modely z dat se projeví v projekčním řešení, například odtok dešťové vody v extrémních hodnotách přívalů srážek, odolnost budov na silné větry a teplotní změny.
- e) Biologické vlastnosti a přírodní požáry jsou řešeny v rámci EIA, kde ještě není podané Oznámení. Neočekávám zde zásadní technické úpravy do projektu, požáry v okolí nejsou zaznamenány a ovlivnění z biosféry je minimální. Naproti tomu administrativně zde bude dlouhá diskuse s občany a organizacemi chránící přírodu.
- f) Ochranná přírodní pásma jsou v sousedství v podobě asanovaného území po těžbě nebo ochrana vodní nádrže Nechranice, samotný areál do pásma nezasahuje. U projektu bude potřeba zohlednit vliv zařízení na přírodu, což vyjde ze studie EIA, jinak jiné administrativní nebo technické řešení není potřeba. [66]

Lidské jevy v lokalitě jsou dominantní v těchto bodech: kolize pásem, produktovody, energetické vedení, provoz jiných zařízení, znečištění ovzduší a vod nebo projev dopravy. Jednotlivé vlivy a možné úpravy detailněji popisují zde:

- a) Pád letadla se hodnotí skrz návrhové letadlo s mechanickými a sekundárními účinky přímého nárazu. Jedná se o vliv, se kterým počítá každý dodavatel designu a po vystavění JE se zde zavede bezletová zóna v okruhu 2 km. Může být

zlepšeno administrativním opatřením – odklon letecké dopravy. Díky blízkosti vojenského újezdu Hradiště již částečně ošetřeno.

- b) Výbuchy a požáry se hodnotí z provozů v okolí 5 km od elektrárny. Zde bude potřebná rešerše typu provozu, objem nebezpečných látek a míra vlivu na JE. Možné omezení vlivu by šlo docílit zákazem plánů jiných provozů v okolí JE s možným vlivem a technicky se upraví klíčové budovy na stávající provozy, například z vlivu plynové kotelny a plynovodu k ní.
- c) Zásah do ochranných pásem se musí hodnotit po celou dobu životnosti elektrárny a podkladem jsou ZÚR příslušného kraje. Tušimice zde mají koridor E4a vyvedení elektrického výkonu s šířkou 100 m, což podporuje výstavbu dalšího venkovního vedení. Kolize se silnicí a železniční dráhou zde není a vhodnost lokality by se nevyloučila i kdyby tu byly.
- d) Vliv jiného jaderného zařízení v Ústeckém kraji bude hodnocen až v další lokalitě po Tušimicích, zde se neprojeví. Poté by se postupovalo dle NS-G-3.1 od IAEA pro radiační a neradiační vlivy provozu JE.
- e) Silné vibrace z technické a indukované seismicity se zde mohou projevit z důlní činnosti, nicméně v průběhu výstavby a provozu jaderného zařízení by důlní díla měly být plně odstavena na základě požadavků Fit for 55 – administrativní řešení. Pokud ne, což si nemyslím, nahlíží se na ně stejně jako na přírodní seismicitu.
- f) Elektromagnetická interference je spíše požadavek na projekt, kde vnější a vnitřní vlivy jsou z vysílačů, výkonové elektroniky nebo elektrického vedení. Při dbání na elektromagnetickou kompatibilitu (EMC) komponent v JE nebude potřeba dalších úprav.
- g) Vířivý elektrický proud se projeví jako bludný zemní proud s vlivem na korozi konstrukce. Tento vliv se dosud neměřil v lokalitě, tudíž to chce vybudovat dostatečné množství měřících míst pro zkoumání současného vlivu. Technické úpravy podloží mohou být navrženy na základě naměřených dat.
- h) Projevy dopravy se určují rešerší intenzity dopravních tras, charakter dopravních prostředků a možný výskyt nebezpečných látek. Pro Tušimice se silniční a železniční doprava neprojeví v silné míře, oproti jiným lokalitám zde nejsou významné dopravní koridory.
- i) Produktovody a vedení se v lokalitě nachází přímo v areálu – vyvedení výkonu a přívod plynu pro plynové hořáky. Plynovod zde bohužel zůstane pro plánovanou plynovou kotelnu napojenou na CZT, musí se tak zohlednit možná



havárie. Pro jistotu se zavádí monitoring vlivů po celou dobu výstavby a životnosti jaderného zařízení. U venkovního vedení jsou široká ochranná pásma stanovená energetickým zákonem, budovy tak budou na sever od rozvodny.

- j) U znečištění ovzduší a vod se zkoumá současný stav a havarijní plány v okolí. Největším zdrojem u Tušimic je samozřejmě důlní činnost a okolní elektrárny, ty se ale odstaví. Opatření lze obecně vytvořit investicí u zdroje znečištění nebo u výstavby JE.
- k) Souběh provozů s látkami schopných ohrozit jadernou bezpečnost zařízení se hodnotí v okolí minimálně 5 km. Největší vliv bude mít plynová kotelná v areálu, která zvýší požadavky na bezpečnost provozu obou zařízení.

Splnitelné jsou aktuálně jen vlivy dalších jaderných zařízení, ostatní vyžadují detailní hodnocení v následujících letech. Administrativně lze vyřešit část rizika a technickými úpravami docílit stavu odpovídajícímu úrovni jaderné bezpečnosti dle SÚJB. Hodnocení stavu lokality dle AZ a Vyhl. 378 tudíž začalo postupnými kroky a bez výsledků jednotlivých vlivů nelze postupovat v projektu.

Po prvotním zkoumání vhodnosti se může začít s procesem EIA. Tuto studii vyhotovují firmy za účasti objednatele, úřadů a občanů. S jadernou energetikou má zkušenosti firma Energoprojekt Praha (spadající pod ÚJV Řež, a tedy pod ČEZ a.s.) nebo Jacobs Clean Energy s.r.o, která se podílela na EIA pro Temelín 1 a 2, hodnocení vlivu zvýšení výkonu JE Dukovany a EIA pro NJZ v Dukovanech. Předběžné zhodnocení potenciálu Tušimic již proběhlo a pro splnění harmonogramu bude potřeba vytvořit Oznámení na EIA co nejdříve, ale na webových stránkách [68] zatím nic není. Oznámení je prvním krokem EIA, kde se již uvažuje vize záměru – instalovaný výkon lokality, uvažované designy a možné vlivy jednotlivých designů na životní prostředí. Díky volbě jednoho dodavatele se proces značně zjednoduší a nevznikne tak nadbytečná rezerva jako třeba u EDU. Rezerva je vhodná u designů s potenciálem na zvýšení výkonu, protože při každé změně nad zkoumaný limit by se musela tvořit nová studie EIA. Design RR s instalovaným výkonem 500 MW<sub>e</sub> by tak mohl mít studii na 550 MW<sub>e</sub> místo 650 MW<sub>e</sub> pro dvojblok jiných designů s rezervou. Proces k vyhotovení studie se skládá ze sběru dat terénními průzkumy, posouzení záměru projektu, charakteristiky složek životního prostředí, výběr variant a shrnutí na závěr. [67][69]

S obdržetím posudku EIA, což může trvat přibližně 5 let od podání oznámení, se zpřístupní územní řízení. Pro NJZ EDU se územní řízení tvořilo pro čistý elektrický výkon do 2400 MW<sub>e</sub>, včetně všech souvisejících, podmiňujících a vyvolaných investic, což se podalo na stavební úřad města Třebíč. V případě Tušimic by se záměr podával na město Kadaň, ale změna stavebního zákona převedla zodpovědnost na MPO. Související investice staveb se předkládají formou dokumentací pro vydání územních rozhodnutí (DÚR), navíc je důležité dbát na předložení těchto dokumentací ještě za procesu EIA, byť se jedná o navazující práci. Příkladem DÚR jsou napojení na infrastrukturu – doprava, vyvedení výkonu, odvod srážkových a odpadních vod – a soubor staveb v areálu a staveništi. V případě NJZ EDU proces trval 2 roky, u Tušimic můžeme očekávat obdobný rozsah prací. Hotové dokumentace se poté předávají na stavební úřad a MPO, kde proces může trvat další 2 roky. Výsledek se projeví v povolení pro výstavbu a změnou využití plochy v ÚP obce Tušimice. Po vzoru elektrárny Temelín se ÚP upraví na tuto podobu:

- VS. Plochy výroby a skladování
  - o VSZ. Plochy výroby a skladování – zemědělské
  - o VS.ETE Plochy výroby a skladování – areál ETE
  - o ZSVS.ETE Dočasně zastavitelné plochy pro ZS ETE [70] [71]

Než se začne stavět, musí se vyřešit současný provoz, kde se očekávaná doba odstavení pohybuje na přelomu 2029-2030, jenže politika a ekonomika provozu tento termín může posunout na oba směry. Pro přípravu lokality to má silný vliv, jelikož nelze stavět zdroj SMR a přidruženou infrastrukturu na stejné ploše. Demolice původní elektrárny navíc vyžaduje určité časové období – nedaleká elektrárna Prunéřov I se demolovala v letech 2022 a 2023, přitom odstavení provozu proběhlo již v červnu 2020. Časová osa EIA a územního řízení zatím činí 7 let, takže s podáním v roce 2024/2025 by nemuselo dojít ke kolizi se současným provozem, ba naopak by demolice rovnou přešla ve stavbu nového zdroje. [72]

Modulární přístup designu RR může urychlit proces stavby, nicméně s realistickými předpoklady se začne stavět nejdříve v roce 2033. Do té doby se navíc musí vyřešit dopravitelnost nadrozměrných a těžkých komponent (NTK), což bude reaktorová nádoba, parogenerátory, hlavní cirkulační čerpadla, dieselagregáty, transformátory a alternátor. Při výrobě v plzeňské ŠKODA JS a.s. má trasa délku více než 95 km, při dopravě z nejbližšího přístavu Lovosice pak více než 70 km. Pomocí studie dopravitelnosti se zhodnotí nejefektivnější trasa s minimálními náklady na přestavbu komunikací a omezení provozu.

### 5.1.2 Elektrická část

V současném areálu je rozvodna elektrárny s 5 (4 bloky + 1 rezerva) blokovými transformátory 15,75/420 kV, 4 odbočkové transformátory VS 15,75/6,3 kV, dvojitě venkovní vedení s vypínači a odpojovači 400 kV do rozvodny Hradec, záložní dvojitě vedení 110 kV z rozvodny Verněřov s 2 transformátory 110/6,3 kV, reaktor na vývodech elektrické energie pro důlní techniku, záložní napájení dozorny a řídicích systémů z akubaterie, najížděcí a havarijní napájení z dieselaagregátů a baterie 4 MW<sub>e</sub> o kapacitě 2,8 MWh pro vyrovnávání změn frekvence v ES.



Obrázek č. 23: Současná rozvodna Tušimice [38]

Zajistit napájení VS jaderného bloku vyžaduje několik změn, protože JE má tři stupně důležitosti napájení. Největšími změnami oproti klasickým tepelným elektrárnám je zahrnutí druhé nezávislé linky vedení výkonu, čímž se zaručí 2x 100 % záloha systému VS. Pro design RR bude zapotřebí zvýšit výkon dieselaagregátů, protože dosavadní využití bylo jen pro najíždění turbíny a případný zdroj v havarijních stavech. U JE jsou dieselaagregáty určeny k napájení systémů důležitých z hlediska jaderné bezpečnosti a dochlazování reaktoru, kde ke každému bloku patří 3 dieselaagregáty (200 % rezerva). V případě EDU mají výkon 2,8 MW<sub>e</sub> na hladině 6,3 kV, RR má podobný výkon a lze použít stejné. Důležité u návrhu záloh je elektrické a prostorové oddělení zdrojů, kde každý má nezávislou schopnost udržet napájení bez vlivu poruchy v jiném systému a bez potřeby odstavení bloku. [73]

Jaderné elektrárny spotřebují na vlastní spotřebě přibližně 5-7 % vyrobené elektrické energie a při projektovém čistém výkonu 470 MW<sub>e</sub> se na VS využije okolo 24-30 MW<sub>e</sub>, kde nejvíce energie využijí HCČ a další systémy chlazení reaktoru. Alternátor tudíž zaokrouhlím na výstup 500 MW<sub>e</sub> a napětí vhodně zvýším z 15,75 kV například na 20 nebo 24 kV.

Alternátory velkých bloků pracují běžně s účinnkem  $\cos \varphi = 0,85$  až  $0,9$ , zdánlivý výkon v tomto případě odpovídá přibližně 550 MVA bez projektové rezervy. Pokud zde dojde ke zvýšení vyrobeného výkonu v průběhu života elektrárny jako u designů VVER 400 a VVER 1000 o 10 %, úměrně se musí zvýšit výkon alternátoru a transformátorů. Omezení u alternátoru můžeme najít v jeho dopravitelnosti – očekávaná hmotnost je 400 tun.

Na vývodu alternátoru poté musíme osadit generátorový vypínač a skrz zapouzdřené vodiče vyvést výkon na blokový transformátor a 2 odbočkové transformátory VS (2x 100 %, zachování provozu při opravě a poruše). Schéma napájení se může změnit pro zvýšení zálohy osazením dalších vypínačů mezi blokové a odbočkové transformátory. V případě dvojbloku jsou přípojnice rezervního napájení a přípojnice pracovního napájení VS spojené mezi bloky, díky čemuž se může najíždět druhý blok z energie prvního bloku.

Temelín disponuje variantou 2 odbočkových 3f trojvlnut'ových transformátorů pro VS a 3x 1f blokové transformátory na jeden alternátor. Pro design RR je na zvážení, zda jít variantou velkého 3f transformátoru s výkonem úměrným alternátoru nebo rozdělit na 3x 1f prostorově oddělené transformátory – rozhodujícím kritériem je dopravitelnost těžkého 3f transformátoru (více než 300 tun). U RR bych doporučil 3x 1f s převodem  $24 / 420/\sqrt{3}$  kV, s výkonem 3x 200 MVA. Blokové transformátory jsou z principu trojúhelník – hvězda s uzemněnou nulou, kde trojúhelník na straně generátoru omezí nulovou složku a násobky třetí harmonické z nesymetrie soustavy a hvězda s nulou pro napojení na PS.

Výkon odbočkového transformátoru se určí z příkonu vlastní spotřeby, pro RR by odpovídal hodnotě alespoň 30 MVA. Transformátory rezervního napájení se volí na VS jednoho bloku nebo rozjezd druhého bloku + polovina VS dvojbloku v případě uspořádání dvojblok. Výkon tudíž může být 31,5 MVA ale také 40 nebo 50 MVA. Rezervní napájení Tušimic se upraví umístěním vypínačů, odpojovačů a 2 trojvlnut'ových transformátorů. [74][75][76]

Ze současné elektrárny zde nakonec může zůstat jen externí baterie pro pokrytí kmitů frekvence a venkovní dvojité vedení 400 kV. V sousedství tohoto vedení je zapotřebí vybudovat jednoduché vedení 400 kV pro zajištění zálohy vyvedení výkonu v případě poškození první řady stožárů. Běžný přenášený výkon vodiče je  $1\,580\text{ MW}_e$  (3 x Al/St 435/55), což je schopné vyvést výkon dvojbloku RR SMR. [62]

### 5.1.3 Ostatní infrastruktura

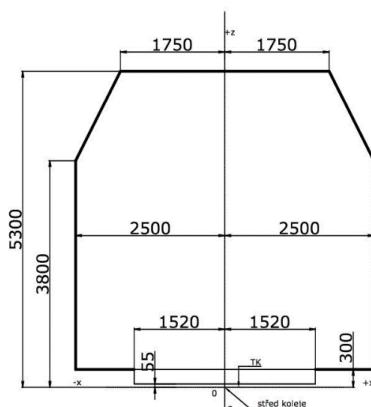
Kromě elektrického vedení vyžaduje elektrárna další infrastrukturu, konkrétně železnice, silnice, plynovod, vodovod a v případě Tušimic také horkovody pro CZT.

Železniční spojení má nejlepší přenosovou kapacitu materiálu do lokality a díky husté železniční síti ČR lze využít vyčleněné koridory pro nákladní dopravu. Do areálu Tušimic vede vlečka z tratí 140 (Cheb – Chomutov, 25 kV AC) a 124 (Žatec – Chomutov, 3 kV DC) na Kadaňsko-tušimickou dráhu (3 kV DC), významným koridorem pro vývoz uhlí z lomu Nástup-Tušimice do Prunéřova. Přeprava modulů RR se může vyřešit podle místa výroby z Plzně nebo ze zahraničí následovně:

- a) z Plzně pomocí dieselových lokomotiv tratí 160 do Žatce (osobní doprava), poté stejnosměrnou tratí 124 a vlečkou do Tušimic
- b) z Plzně elektrickými lokomotivami 25 kV AC tratěmi 178 a 140 (významné koridory osobní dopravy) do Prunéřova, poté 3 kV DC vlečkou do Tušimic
- c) z přístavu v Ústí nad Labem nebo Lovosice (traťový úsek 090 do Ústí) přes tratě 131 a 130 do Prunéřova a do Tušimic. Výhoda této volby je neměnnost napájení na 3 kV DC.
- d) z přístavu v Ústí nad Labem nebo Lovosice (traťový úsek 090 do Ústí) přes tratě 131 do Mostu, odbočka na Postoloprty tratí 114/123 do Žatce, poté trať 124 a vlečka do Tušimic

Velikost modulů, tj. prostorová průchodnost tratě k převozu kontejnerů / modulů se řídí vyhláškou [77] Správy Železnic (SŽ). Výše vypsání varianty disponují rozměry EP 2,5, v následujících 10 letech se nepředpokládá zvýšení rozměrů na EP 3 (1 m výšky a 1 m šířky navíc) v těchto koridorech. Tyto rozměry zahrnují vozy, tím pádem samotný kontejner se ještě musí vypočítat dle nosnosti a tvaru nákladního vozu – délka například omezená na 45 stop neboli 13,7 m. Možnou změnou může být změna elektrifikace z DC na AC na úseku Ústí nad Labem – Prunéřov v rámci modernizace napájení železniční trakce v ČR.

## EP 2,5



Obrázek č. 24: Profil prostorové průchodnosti vagónu EP 2.5 [77]

Úpravy železnice přímo v areálu se tak podřídí okolním záměrům a může se tak změnit na 25 kV AC. Během demolice se zruší necelých 10 km kolejnic přímo v areálu a následně bude vhodné vystavět obdobnou délku pro transport modulů podle projekčního řešení budov. Změna silniční komunikace bude součástí Studie dopravitelnosti NTK, k běžnému provozu pracovníků a stavebních materiálů je silnice druhé třídy dostatečná. Dále zde platí stejná myšlenka jako kolejnice v areálu – po demolici vytvořit místní síť mezi budovami JE.

Plynovod pro potřeby uhelných bloků je přiveden do areálu, kde se nachází regulační stanice k redukci tlaku plynu z 1,8 MPa na 240 kPa. Provoz plánované plynové kotelny by měl využít stávající plynovod, výstavba SMR v areálu bude v souběhu s provozem plynové kotelny a nejspíš dojde k přebudování potrubí, do projektu se s tím ale musí počítat. Obdobně na tom budou výměňkové stanice a horkovody pro CZT Kadaň, které se přetvoří s demolicí uhelné elektrárny.

Přívod surové vody z výtlačných řádů (dvojité potrubí a dva vodojemy) na Ohři prošel modernizací spolu s uhelnou elektrárnou, SMR tohoto přívodu může využít s minimálními změnami pro terciární okruh JE. Limity odběru jsou stanoveny v integrovaném povolení vydaném krajským úřadem Ústeckého kraje, kde jsou také určeny hodnoty výpustí odpadních vod a jiných znečišťujících látek vyrobených v provozu elektrárny. [78]

## 5.2 Ekonomika SMR

Pro přehled předpokládaných ekonomických nákladů a výnosů jsem tuto kapitolu též rozdělil na několik částí: a) Příprava lokality, b) Elektrická část, c) Ostatní infrastruktura, d) Cena technologie dle CAPEX, e) Analýza výkupu elektřiny a tepla.

### 5.2.1 Příprava lokality

Náklady na přípravu lokality se podle [5] pohybují v řádu desítek milionů Kč v závislosti na konkrétním místě. Lokality spadající pod majetek ČEZ a.s. se zkoumají z financí společnosti, ostatní firmy nemusí mít pro takové náklady místo v rozpočtu a zkoumají další cesty financování. Sokolovská uhelná a.s. šla cestou mezinárodního grantu Phoenix, který zaštituje ministerstvo zahraničí USA, pro pokrytí nákladů na geologické studie v lokalitách Tisová a Vřesová.

Dle MPO v současnosti neexistuje žádný vhodný nástroj z veřejných fondů a Evropská komise zakazuje finanční podporu státu, aby podpora nenarušila hospodářskou soutěž vnitřního a evropského trhu. Nicméně pro výzkum lze vytvořit výjimky skrz „Sdělení Komise: Rámec pro státní podporu výzkumu, vývoje a inovací 2022/C 414/01“ (NUWARD takto obdržel od státu 300 milionů EUR pro výzkum SMR do roku 2027) a dále využít fondů pro rozvoj průmyslu EU, kde se vytvořila „European Industrial Alliance on SMRs“. Komise zároveň chce modernizovat platformu Evropský výzkumný prostor (EVP) s ambicí zvýšit každoroční financování z 2 % na 3 % HDP EU do roku 2030. Z této platformy a průmyslové aliance by se mohly v budoucnu využít zdroje pro přípravu designu nebo lokalit SMR. [79]

Co se týče nákladů přímo v lokalitě Tušimice, tak největší položkou bude vytvoření vrtů a dlouhodobé měřicí stanice. Dobrou referencí jsou ceníky od ČGS [80] nebo projekt podobného rozsahu – vliv dolu Turów na geologii a hydrologii [81]. Dle druhé reference se jednalo o 27 nových geologických, z toho 16 hydrogeologických, a obnova 18 starých vrtů. Tušimice mohou také mít několik starých vrtů z dob výstavby uhelné elektrárny a k tomu pár pilotních vrtů z předběžného hodnocení. Dataloggery s měřením vlastností vody a země se osadí na přibližně 20 vrtů, kde některé vrty dosáhnou hloubky až 80 m. Cena těchto prací se pohybuje v jednotkách milionů Kč, samotné zpracování dat do modelů a výstupních zpráv je poté dáno sazbou projektové firmy, což mohou být další statisíce Kč.

### 5.2.2 Elektrická část

Jak jsem zmiňoval v kapitole 5.1.2, tak JE se zdrojem RR SMR si vyžádá náhradu celé elektrické části elektrárny. Cenově nákladné položky budou největší komponenty vyvedení výkonu – alternátor, transformátory a venkovní vedení. Charakterem velkých zdrojů je výroba dílů na míru s vysokým požadavkem na spolehlivost výroby a dodávky. Výkon 500 MW<sub>e</sub> je hranicí produktových řad dodavatelských firem, vyšší výkony jsou na objednávku a vyráběné v omezeném počtu. Pro ČR se nabízí využít místních dodavatelů – ETD TRANSFORMÁTORY a.s., ŠKODA JS a.s., BRUSH SEM s.r.o., případně se poohlédnout po zahraničních, například Siemens Energy AG nebo ABB s.r.o.

Produktové listy výrobců jsou na vyžádání nebo naceněné dle zakázky, konkrétní ceník tudíž není dostupný a cenu odhaduji z podobných projektů. S vyšším výkonem se hmotnost a cena za kW<sub>e</sub> snižuje se čtvrtou odmocninou, proto se třeba vyplatí jeden větší alternátor nebo blokový transformátor. Toto ale platí jen do určitých výkonů, kde se projeví práce na zakázku. Alternátor a blokový transformátor pro 500 MW<sub>e</sub> mají pořizovací náklady ve okolo sta milionů Kč a provozní náklady nejsou zanedbatelné, kde za životnost 30 let s uvažováním diskontu dosáhne stovek milionů Kč na zařízení. Trojvinuťové odbočkové transformátory pro výkon 40 MVA se investičně pohybují v nižších desítkách milionů Kč za kus. Zapouzdřené vodiče na 10 kA se budou též pohybovat v jednotkách milionů Kč. [87]

Pro SMR v Tušimicích jsem navrhl vystavět jednoduché vedení 400 kV do rozvodny Hradec, což dle měření z map činí 4 km. Investiční náklady dle ČEPS a.s. [62] na výstavbu jednoduchého vedení 400 kV jsou cca 20 milionů Kč/km, kde cenu může ovlivnit okolní terén a klimatické podmínky. V ceně by měly být zahrnuté náklady na výkup pozemku, materiál na vodiče a stožáry nebo práce. K tomu je potřeba zahrnout přípojnice na obou koncích, ochrany a automatiku, proto určím cenu 100 milionů Kč za vyvedení výkonu. Uvnitř elektrárny navíc máme značný počet přípojníc a vedení VS, ať už na 6,3 kV nebo 0,4 kV, systémy kontroly a řízení (SKŘ), pohony HCC, podpůrné pohony a další. Výčet všech komponent VS a jejich umístění je obsáhlé téma, které není náplní této práce.

Pro elektrickou část elektrárny o výkonu 500 MW<sub>e</sub> odhaduji, že se náklady mohou vyšplhat na jednotky miliard Kč. Po nákladech na primární okruh (reaktorová nádoba, parogenerátor, kompenzátor objemu, HCC, potrubí, kontejnment) a samotné stavbě budov zaujímá elektrická část elektrárny třetí místo v nákladech na výstavbu.



### 5.2.3 Ostatní infrastruktura

Stejně jako v kapitole 5.1.3 zde zohledním silnice, železnice, plynovod, vodovod a horkovod. Pro stanovení ceny využiji Cenové databáze [88] od Ministerstva dopravy se záměrem výpočtu nákladů na komunikaci na území areálu elektrárny a připojení na okolní dopravní infrastrukturu pro potřeby NTK.

Silnice v areálu se může vytvořit s postranními chodníky nebo bez, kde druhá varianta je preferovanější. Pozemní komunikace musí spojit důležité budovy pro zásobování a převoz materiálu, tudíž silnice II. třídy zde bude stačit. Na jednotky kilometrů v území areálu vychází cena průměrně 45 milionů Kč / km. Cena z databáze zahrnuje přípravu stavenišť, zemní práce, vývoz materiálu, odvodnění, značení nebo přejezdy. Mimo lokalitu jsou náklady vyšší pro zajištění přepravy NTK – komunikace se musí uzpůsobit průjezdu těžkých a dlouhých komponent, takže kruhové objezdy, křižovatky a mosty jsou rizikovými místy vyžadující přestavbu nebo modifikace. Zde se náklady dostanou na vyšší stovky milionů podle zvolené trasy dopravitelnosti.

Dalším nákladnou položkou bude železniční komunikace, kde je výstavba naceněna na 22 milionů Kč / 1 km. V areálu bude zapotřebí několik výhybek, kde každá vyjde na 5 milionů, a křížení se silnicí, tj. přejezdy. Pokud tedy v areálu vystavíme 5 km tratí s několika přejezdy a výhybkami, můžeme se dostat přes 100 milionů korun.

Plynovod, vodovod a horkovod se přímo v areálu změní minimálně. Přeložka plynovodu do plynové kotelny se zahrne do nákladů kotelny, pro potřeby SMR se s plynovodem nepočítá. V areálu se náklady na vodovody projeví výstavbou přívodu surové vody, stanice s čiřením surové vody, napojením pitné vody, odvodem kanalizace a dešťové vody. Surová voda se nemusí řešit v případě projektu se suchým chlazením, jenže tento princip chlazení snižuje účinnost výroby elektrické energie. Horkovody budou nákladnější, jelikož se bude muset vybudovat nová výměňková stanice.

Umístěním na brownfieldu Tušimic se ušetřilo za nákup pozemků v řádech desítek milionů Kč. Na základě výstupů z příprav lokality se ale může stát, že bude nutné vykoupit pozemky v sousedství elektrárny, což přinese další náklady na vybudování bloku. Příprava veškeré infrastruktury pro lokalitu se tím pádem prodraží na stovky milionů Kč. Při stavbě více bloků v lokalitě se náklady na infrastrukturu rozpočítají na jeden blok.

#### 5.2.4 Náklady na výstavbu

Dostupným parametrem pro zhodnocení celkových investičních nákladů na výstavbu jsou kapitálové náklady (CAPEX – capital expenditures) vztažené na instalovaný výkon a hodnota LCOE, která udává náklady na vyrobenou elektrickou energii. Firma RR udává CAPEX v hodnotě 52 miliard Kč / blok neboli 112 milionů Kč / MW<sub>e</sub>, jenže to platí pro n-tý blok (n = 5+), pro první (FOAK) a druhý blok (např. SMR v Temelíně) se očekává cena o 10-20 % vyšší. Počátek výroby je vždy nákladnější a až zlepšení výrobních postupů nebo sériová výroba snižuje cenu dalších bloků SMR. U RR se navíc hledá partner pro spolupráci při vývoji a výrobě, financování projektu dosud probíhalo z vlastních zdrojů a z podpory vlády Velké Británie. Právě cena vývoje se rozpočítá do ceny prvních bloků SMR spolu s náklady na licencování u regulátora GNC nebo SÚJB.

Ze zdroje [83] se dodavatelský řetězec velkého bloku, pro SMR předpokládám zůstane ve stejném poměru, dělí na dílčí položky následovně:

Tabulka č. 14: Rozdělení nákladů CAPEX na výstavbu

Návrh, architektura, licencování	5 %
Projektování, pořizování, management výstavby	7 %
Jaderný ostrov (primární okruh)	28 %
Turbínový ostrov (sekundární + terciární okruh + generátor)	15 %
Ostatní technologie	18 %
Příprava lokality a staveniště	20 %
Doprava	2 %
Spouštění a první palivo	5 %

Pokud budeme v Tušimicích zamýšlet dvojblok RR SMR, ušetříme až 15 % CAPEX na instalovanou MW<sub>e</sub>, převážně v oblasti výstavby společných budov, nákladů připojení na vnější infrastrukturu, příprava lokality, přípravy staveniště, zisk zkušeností nebo doprava NTK. Rozlohou se oba bloky do areálu Tušimic umístí bez omezení, na druhou stranu komplikací může být vhodnost podloží pro zakládání druhé sady důležitých budov, tj. reaktorové haly a strojovny. Výhody dvoubloku jsou větší flexibilita výroby energie, nepřetržitost dodávky tepla v době odstávky, záložní napájení pro najíždění druhého bloku po odstávce, využití společných budov, společné vedení výkonu, přívod vody a další. [83]

Srovnání nákladů SMR s velkým blokem nevypadá příznivě: z nabídek pro první polskou jadernou elektrárnu, kde jsou stejní 3 dodavatelé jako v případě Dukovan, se cena 1 MW<sub>e</sub> výkonu pohybovala od 61 milionů po 104 milionů Kč, kde nejlevnější byl korejský APR1400, poté WEC AP1000 a nejdražší EPR od EDF [86]. Jenže ceny jsou vztažené k výstavbě v roce 2026 a optimisticky navržené – kvůli několika zdržením ve výstavbě se blok EPR v Hinkley Point C dostal na hodnotu 208 milionů Kč / MW<sub>e</sub>. Plánované bloky v Dukovanech se tedy kvůli inflaci postaví s většími náklady, ale to také platí pro RR SMR.

### 5.2.5 Návratnost výroby

S provozem 60 let RR odhaduje, že se hodnota LCOE může dostat do rozmezí 45-65 EUR / MWh, což činí 1200-1600 Kč / MWh. To může být problém v rámci konkurence OZE s velmi nízkou cenou výroby (srovnání jádra s OZE rozepisují v kapitole 5.3), ba dokonce se současnými velkými bloky Temelína a budoucích bloků Dukovan, kde se garantovaná výkupní cena pohybuje na podobné úrovni. Před krizí roku 2022 se závěrná cena elektřiny pohybovala okolo 60 EUR / MWh, po ustálení je nyní 80 EUR / MWh a odstup od fosilních zdrojů může cenu opět zvýšit. Důvod vysoké ceny LCOE jsou zmiňované CAPEX náklady a úroky vzniklé v době výstavby, na výsledné ceně se tak propíší z 60-80 %. Zbylým nákladům, tj. provozním, pak dominuje cena paliva a údržba elektrárny. [84]

Palivová kampaň v délce 18 měsíců a bezproblémový provoz vyrobí 5,5 TWh elektrické energie v jedné kampani (s odstávkou 2 měsíců – může být kratší), v roce bez odstavení tedy 4,11 TWh na blok. S výkupní cenou 50-60 EUR / MWh (odhad pro NJZ EDU 5 a 6) může mít jeden blok RR SMR zisk 5-6 miliard Kč. Návratnost elektrárny se nicméně musí zhodnotit diskontem, odhadnutou úrokovou sazbou, odhadnutou inflací a započítat náklady na provoz. Podle těchto parametrů se návratnosti výstavby může dosáhnout mezi 15 až 30 lety provozu, což analyzují dále.

Pro stanovení ceny LCOE jakékoliv elektrárny je dostupná kalkulačka [85], kde jsou referenční data z postavených elektráren ve světě, takže můžeme srovnat nejnovější jaderné bloky. Na velikost LCOE se projeví úroková sazba, kde při 7 % se blok postavený na Slovensku nemůže zaplatit se současnými cenami elektřiny – výstavba elektrárny Mochovce se značně prodloužila a tedy prodražila. Když ale nastavíme velice výhodnou půjčku s 3 % úrokem, například díky podpoře státu pro docílení energetické soběstačnosti, se dostává slovenská elektrárna na 58 USD / MWh a je již rentabilní. Úrok ovlivní jen CAPEX,

provozní a palivové náklady se s inflací mění minimálně a nejsou tak citlivé na změny ekonomiky, například změna ceny surového uranu, která v ceně paliva tvoří 50 %, se na LCOE projeví v jednotkách dolarů na vyrobenou MWh.

Tabulka č. 15: Poslední postavené jaderné bloky ve světě a jejich náklady

<b>Stát</b>	<b>Výkon (MW<sub>e</sub>)</b>	<b>CAPEX (USD / MWh)</b>	<b>Provoz a údržba (USD / MWh)</b>	<b>Palivo (USD / MWh)</b>	<b>LCOE (USD / MWh)</b>
Indie	950	32.89	5.43	9.33	47.64
Korea	1377	25.54	18.44	9.33	53.30
Čína	950	29.60	26.42	10.00	66.01
Francie	1650	47.51	14.26	9.33	71.10
USA	1100	50.32	11.60	9.33	71.25
Japonsko	1152	46.92	25.84	13.92	86.67
Slovensko	1004	82.80	9.71	9.33	101.84

Předchozí tabulka vůbec neuvažuje výrobu tepla pro CZT, pro splacení nákladů se tak dodávka tepla jeví jako lukrativní záležitost, kde v Kadani pro rok 2023 činila cena tepla 600-700 Kč / GJ a do budoucna se může zvýšit. Jestli se roční dodávka pro Kadaň pohybuje okolo 500 TJ tepla, za rok může elektrárna získat až 350 milionů Kč. S propojením sítě CZT Prunéřov (Klášteřec nad Ohří, Chomutov a Jirkov) se odběr zvýší o dalších 900 TJ, tj. 650 milionů Kč při současných cenách (za rok 2022 se dodalo celkem 1345 TJ). Dohromady je zde potenciál pro 1 miliardu Kč v jedné topné sezóně, což je 1/5 zisku elektrické energie (teoretické maximum výroby elektřiny bez kogenerace). Kogenerační režim v elektrárně bohužel sníží vyrobenou elektrickou energii, návratnost kogenerace se musí posoudit v souladu s vývojem cen za energii a rozlehlost CZT.

Výhoda kogenerace spočívá ve zlepšení využití vyrobeného tepla, kde se nyní 65 % získaného tepla z jaderného reaktoru ztrácí na kondenzaci bez přeměny na elektřinu. U kogenerace se celková účinnost elektrárny může dostat až na 90 %, což pro potřeby malé sítě CZT není potřeba. Odběr je řešen vyvedením části vysokoenergetické páry před přívodem na vysokotlaký díl turbíny, čímž se sníží účinnost přeměny na elektřinu a VS se zvýší o provoz výměňkové stanice. V případě Temelína s dodávkou 950 TJ / sezónu pro České Budějovice a Týn nad Vltavou dochází k poklesu výkonu elektrárny o půl procenta, tj. ztráta

11 MW<sub>e</sub> při plném vytížení horkovodů. Pokud by RR v Tušimicích využíval teplo pro horkovody se stejnou účinností (parametry páry jsou totožné) do sítě o odběru 1400 TJ / sezónu, klesl by čistý elektrický výkon jednoho bloku maximálně o 15-16 MW<sub>e</sub>. V proměnlivé topné sezóně trvající 270 dní by šlo o ztrátu 30-60 GWh elektrické energie, kde ekonomičnost takové výroby se současnými cenami za teplo je jasná a rozhodně by se měl projekt zamýšlet s kogenerací. [82]

### 5.2.6 Zjednodušený výpočet LCOE RR:

Využijeme vzorec pro LCOE s diskontní sazbou, do kterého vložíme předpokládané hodnoty nákladů  $I$ ,  $M$ ,  $P$  a výrobu za životnost elektrárny  $E$  bez jakýchkoliv změn ve výrobě (výkonová rezerva nebo poškození vyvedení výkonu). Náklady na modernizaci  $M$  můžou být různorodé a dle mého názoru jsou spíše jednorázového nahodilého charakteru než aby to byla každoroční záležitost. Pro výpočty jsem uvažoval zjednodušení ve formě 10 miliard Kč rozdělených úměrně po dobu životnosti elektrárny. Investiční náklady  $I$  se během výstavby začnou diskontovat, pro detailnější výpočet jsem zvolil úrok 5. roku – člen  $I_5$ . Stav bez úroku během výstavby nabízí například EXIM banka USA, ale tam mohou být vyšší úrokové sazby během provozu.

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^{60} \frac{P_t + M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{60} \frac{E_t}{(1+r)^t}} \left( \frac{\text{Kč}}{\text{MWh}} \right) \quad (9)$$

$$LCOE_5 = \frac{I_5 + \sum_{t=5}^{64} \frac{P_t + M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=5}^{64} \frac{E_t}{(1+r)^t}} \left( \frac{\text{Kč}}{\text{MWh}} \right) \quad (10)$$

kde investice  $I_0$  je jednorázová pro stavbu,  $I_5$  zahrnuje úrok investic během stavby, diskontní sazba  $r$  - volba diskontních sazeb vychází ze stavu v ČR za posledních 5 let, kde a) před 2020 – 1%, b) před krizí 2022 – 3 %, c) květen 2024 – 4 %, d) maximum 2022 – 6 %, provozní náklad  $P_t$  (provoz, údržba, palivo) převzato z velkých bloků, modernizace s diskontem  $M_t$ , životnost  $t = 60$  let, výroba  $E_t = 5,5$  TWh každých 18 měsíců, celkem 220 TWh / 60 let a průměr 3,67 TWh / rok.

Tabulka č. 16: Vypočtené hodnoty LCOE

Diskontní sazba $r$	CAPEX $I$ (mld. Kč)	Náklady $P$ (Kč / MWh)	LCOE (Kč / MWh)	CAPEX $I_5$ (mld. Kč)	LCOE <sub>5</sub> (Kč / MWh)
1 %	52	570	931	54,65	960
3 %	52	570	1127	60,28	1283
4 %	52	570	1242	63,27	1507
6 %	52	570	1492	69,59	2097
<b>Změna <math>P +10\%</math></b>					
1 %	52	627	988	54,65	1017
3 %	52	627	1184	60,28	1340
4 %	52	627	1299	63,27	1564
6 %	52	627	1549	69,59	2154
<b>Změna <math>I +10\%</math></b>					
1 %	57	570	961	59,91	993
3 %	57	570	1177	66,08	1348
4 %	57	570	1302	69,35	1593
6 %	57	570	1576	76,28	2239

Dle předpokladů má hodnota LCOE vyšší citlivost na změnu investice  $I$  než na provozní náklad  $P$  s převažujícím vlivem investičních nákladů od úrokové sazby přibližně 3 %. Zvýšením množství vyrobené energie  $E$ , ať už modernizací nebo kratší odstávkou (2 týdny kratší odstávka může vyprodukovat dalších 158 GWh / odstávku, v průběhu životnosti elektrárny 6,3 TWh), se sníží hodnota LCOE, ale jen v řádu procenta. Negativně se zde projeví provozování SMR v režimu regulace sítě s proměnlivou výrobou OZE, tj. SMR pracuje níže než na plný výkon. Zavedení výnosů ze zásobování tepla do LCOE jsem docílil úpravou vzorce do podoby (11) a (12). Kvůli tomu, že každá druhá odstávka zasáhne do topné sezóny, jsem zvolil 80 % naplnění požadavku 1400 TJ / sezónu po dobu 60 let.

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^{60} \frac{P_t + M_t - Z_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{60} \frac{E_t}{(1+r)^t}} \left( \frac{\text{Kč}}{\text{MWh}} \right) \quad (9)$$

$$LCOE_5 = \frac{I_5 + \sum_{t=5}^{64} \frac{P_t + M_t - Z_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=5}^{64} \frac{E_t}{(1+r)^t}} \left( \frac{\text{Kč}}{\text{MWh}} \right) \quad (10)$$

kde člen  $Z_t$  respektuje zisky z tepla v daném roce a  $E_t$  se sníží na 3,56 TWh / rok.

Tabulka č. 17: Vypočtené hodnoty LCOE s uvážením zisku z tepla

Diskontní sazba $r$	CAPEX $I$ (mld. Kč)	Náklady $P$ (Kč / MWh)	LCOE (Kč / MWh)	CAPEX $I_5$ (mld. Kč)	LCOE <sub>5</sub> (Kč / MWh)
1 %	52	570	765	54,65	808
3 %	52	570	1017	60,28	1193
4 %	52	570	1144	63,27	1435
6 %	52	570	1410	69,59	2057
<b>Změna <math>P +10\%</math></b>					
1 %	52	627	822	54,65	865
3 %	52	627	1074	60,28	1250
4 %	52	627	1201	63,27	1492
6 %	52	627	1467	69,59	2114
<b>Změna <math>I +10\%</math></b>					
1 %	57	570	796	59,91	842
3 %	57	570	1068	66,08	1259
4 %	57	570	1206	69,35	1523
6 %	57	570	1498	76,28	2203

Předpoklad každoroční potřeby 1400 TJ tepla je optimistický vzhledem k růstu globálního oteplování a pro přesnější výpočty bych rozhodně neměl opomenout inflaci a další externí vlivy. U dvojbloku RR by nehrozilo nenaplnění dodávky tepla, tj. další snížení hodnoty LCOE, ale výstavba dvou výrobních bloků přináší vyšší investiční náklady.

Porovnáním tabulek 17 a 18 mohu stanovit závěr: Prodej tepla je ekonomicky efektivní, kde efektivnost roste s nižší úrokovou sazbou. Snížení LCOE se pohybuje v rozmezí 2-17 % dle zvolené úrokové sazby. Pro investora se tak zdroj s kogenerací stává rychleji návratový. Určená hodnota LCOE v obou tabulkách je minimální pro návratnost investice za dobu životnosti elektrárny, vyšší výkupní cena znamená rychlejší splacení. S výkupní cenou 60 EUR / MWh  $\cong$  1500 Kč / MWh a při úrokové sazbě vyšší než 4 % není výhodné zdroj SMR vůbec stavět, protože nedosáhneme návratnosti investice. S dodávkou tepla a výstavbou dvojbloku se situace o něco zlepšuje, nicméně je zde vidět problém prvních bloků SMR – jsou dražší než velké bloky.

V čem je tedy lepší postavit dražší SMR oproti velkým blokům? V ČR jsme omezení dvěma faktory: a) dostupnou plochou pro výstavbu velkých elektráren, b) investiční kapitál. Temelín a Dukovany s 2 GW<sub>e</sub> stojí na ploše 120 ha splňující Vyhl. 378. Takových ploch lze v ČR identifikovat jen několik a s vybudovanou infrastrukturou jsou jen v sousedství zmíněných JE, proto se zde plánují další bloky. Stavba jednoho bloku 1 GW<sub>e</sub> je sice přijatelná z hlediska plochy, bohužel přináší jiné nedostatky velkého bloku, např. vliv odstávek na ES a cena investice. Navíc dlouhá doba výstavby (7+ let velký blok, 4 roky SMR) je o to náchylnější na změny úrokové sazby a tím na ceně zaručeného výkupu elektřiny pro rentabilitu výrobního zdroje.

### 5.3 Ovlivnění ES

Nahrazení současné elektrárny o výkonu 800 MW<sub>e</sub> jedním blokem SMR 470 MW<sub>e</sub> (940 MW<sub>e</sub> v případě dvojbloku), s prostojem na výstavbu až 10 let (odstavení – demolice – výstavba – spuštění) se negativně projeví na vyrobené energii České republiky, což také varuje dokument MAF. Jelikož tušimická elektrárna vyrobí 5,7 TWh / rok, přibližně 6,7 % roční výroby v ČR, vliv na ES bude značný. S odstávkou dalších uhelných elektráren v okolí – Pruněřov, Ledvice, Počeradý – se jedná o ztrátu 20 TWh / rok a 3200 MW<sub>e</sub> instalovaného výkonu. Přenosová kapacita linek a kritérium N-1 se reorganizuje a posun výroby bude směrem na jih republiky, kde nejsou významní odběratelé energie. Částečně se tento deficit ve výrobě energie pokryje ze změny provozu paroplynových elektráren Vřesová a Počeradý (kvůli ekonomice nyní provozované jen špičkově) nebo výstavbou nových – Mělník, Dětmárovice a další. Jiné zdroje pro základní zatížení – vodní, VTE, ZEVO a biomasa, nejsou vybudované nebo plánované v dostatečné kapacitě pro pokrytí deficitu v základním zatížení. [89]

Spuštění SMR v Tušimicích bude znamenat obnovu výroby a využití přenosové kapacity v západních Čechách, kde kromě Počerad a Vřesové nebude významný zdroj elektrické energie. Současné JE dodávají systémové služby automatické sekundární regulace napětí, čímž regulují napětí v pilotním uzlu – v mém případě rozvodna Hradec. Zde vidím největší potenciál k výběru této lokality, ostatní nároky – Vyhl. 378, EIA, výstavba, infrastruktura – se mohou s dostatkem financování a času vyřešit v jakékoliv jiné lokalitě, ale pro rychlé nahrazení by se měl výběr lokalit řídit záměrem státu ve zlepšení energetiky a ekonomiky regionu. S odstavenými elektrárnami zde zůstane nadbytek vyučených techniků a lidské



zdroje v oblasti energetiky jsou jedním z kritických bodů budoucího rozvoje SMR v ČR a Evropě.

Podpora místních obyvatel spíše schválí rekonstrukci současné elektrárny před výstavbou na zelené louce, protože obnova krajiny po těžební činnosti nabývá na významu a probíhají zde projekty podporující znovuvyužití krajiny k rekreaci, zemědělství, lesnictví nebo k vytvoření umělých vodních nádrží. Možné VTE a FVE (největší podíl v zamýšlených OZE dle scénářů NKEP) se dají rozložit po malých částech na větší ploše, kdežto jádro je koncentrovaný zdroj vyžadující velkou elektrárnu.

Záměru výstavby FVE odpovídá již podané oznámení EIA ze dne 16.4.2024 [90] v rekultivované ploše lomu Nástup o vyvedení výkonu FVE s rezervovaným výkonem 73 MW<sub>e</sub> na ploše 63 ha. Dle ČEZ Obnovitelné zdroje a.s. se celkový záměr v lokalitě pohybuje na 400 MW<sub>e</sub> instalovaného výkonu ve FVE, což ještě musí projít skrz ZÚR, EIA a dotační program. Z dotačního programu již firma obdržela přes 2,3 miliardy Kč na lokality Odkaliště, Pruněrov I, Tušimice II a Vysočany – Plató, na instalovaný 1 MW<sub>e</sub> tak vychází dotace více než 5 milionů korun [91].

Vliv FVE na stabilitu sítě jsem zhodnotil již v kapitole 1, kdy využití FVE je vhodné pro decentralizovanou výrobu přímo u spotřebitele, jenže v případě přenosu z velkých farem, což se v této lokalitě plánuje, se jedná o silný zdroj nestability ES. Odstavený výkon z uhelných elektráren sice uvolní přenosovou kapacitu v regionu pro jiné zdroje a přeshraniční přetoky, nicméně se bude jednat o nepravidelné toky a během nočních hodin zde bude kapacitní odběr, takže je nutné investovat do zařízení na kompenzaci jalového výkonu. Řízení soustavy se dále zhorší snížením primární a sekundární regulace, tj. úbytkem rotujících hmot hřídelí u klasických elektráren.

## 5.4 Budoucí rozvoj SMR v ČR

Touto kapitolou shrnu strategické dokumenty, potenciál lokalit a požadavek na instalovaný výkon v jádře. Volba designu je spíše manažerskou a politickou záležitostí, důležité je zvolit takového dodavatele, aby se začalo co nejdříve s výrobou komponent a nejlépe aby se jednalo již o n-tý blok pro ekonomiku a hladší průběh certifikace u SÚJB, ať už pro Vyhl. 378, EIA nebo stavební povolení.

Záměry strategických dokumentů státu a nařízení EU jsou v souladu plánů na odstavování fosilních zdrojů a nahrazování klimaticky přijatelnějších zdrojů – OZE a jádro. Jelikož ČR má omezenou dostupnost energie ze Slunce, větru a vody, je cesta jádra téměř nutností. Stát tak má ambice zapojit český průmysl do trhu SMR, vytvořit flotilu zdrojů a vyškolit technické experty, čímž se podpoří energetika, průmysl, ekonomika, věda a vzdělávání. Nutnost priority jádra vychází z předpokladů úrovně importu / exportu elektrické energie, kdy v roce 2030 může být až 20 % elektrické energie ČR importováno – SEK uvažuje maximálně 10 %. Energetická soběstačnost nebude naplněna ani po výstavbě EDU 5 a 6, ba dokonce bude potřeba dodatečných 3 GWe stabilního instalovaného výkonu do roku 2050. Tato potřeba se ze zdrojů na zemní plyn, vodík, ZEVO, vodu nebo biomasu nepokryje. Záměr NKEP pro rok 2050 u VTE a FVE sice dosahuje 3-5 GWe a 21-26 GWe respektive, jenže ani jeden zdroj není dostatečně stabilní pro spolehlivý a bezpečný provoz ES.

Nebezpečí velkých výkonů ve FVE nebo VTE je volatilita výroby, což s problémem závislosti na importu zvýší hodnotu LOLE, kdy se můžeme dostat na stovky hodin v roce bez dostatku elektrické energie. To se nepříjemně projeví na ceně elektrické a tepelné energie pro domácnosti. Stát skrz MPO zamýšlí nahrazení současných provozů a výstavbu na brownfield se zálohou na greenfield. Největší iniciativu vyvíjí ČEZ a.s. s instalovaným výkonem 3 GWe v SMR do roku 2050, kde první uplatnění SMR zamýšlí v Temelíně a dále místo svých uhelných lokalit: Tušimice, Pruněřov, Ledvice, Dětmrovice, Mělník. Dalším v pořadí je Sokolovská uhelná a.s. s jedním SMR v lokalitě Tisová nebo Vřesová. Ostatní provozovatelé uhelných zdrojů dosud neuvažují SMR jako náhradu svých elektráren, jelikož investice do SMR budou vysoké. Po výstavbě pilotního SMR v Temelíně by se mohla tato situace změnit.

Na základě mého hodnocení potenciálu SMR v Tušimicích, ať už jeden nebo dva bloky, se naplní požadavky státu definované ve strategických dokumentech jen z části. S uvážením 1 bloku SMR v Temelíně a 2 bloků v Tušimicích se dostáváme nanejvýše na polovinu záměru 3 GWe, výběr dalších lokalit je tudíž nezbytný. Předběžné hodnocení lokalit Dětmarovice, Pruněrov a Ledvice tak navazuje na tento záměr k využití potenciálu jednotlivých lokalit.

Stavba zdroje v Dětmarovicích může být stěžejní pro rozvoj Moravskoslezského kraje po odstupu od těžby uhlí, jelikož se jedná o místo s hustou aglomerací a těžkým průmyslem. Vodíková strategie vytyčila tento kraj jako vodíkové údolí, čímž by se využil budoucí SMR pro další účely. Případné SMR v Pruněrově a Ledvicích navazuje na hodnocení Tušimic z bodu 5.3, kde Ústecký kraj s dostupnými lidskými zdroji a lokalitami s vybudovanou infrastrukturou nebude mít významné zdroje elektrické a tepelné energie. Elektrárny v Mělníku, Tisové nebo Chvaleticích jsou klíčové zdroje ve svých regionech a nějaká forma náhrady bude taktéž nezbytná. Teplárenské sítě měst jsou nyní také ve velké míře provozovány z fosilních zdrojů a postupně se začínají transformovat na jiné zdroje, například v Plzni vzniklo ZEVO Chotíkov a biomasa nahrazuje uhlí. Pro Brno s plynovými zdroji tepla se uvažuje ekonomičnost výstavby horkovodů z Dukovan, což už proběhlo mezi Českými Budějovicemi a Temelínem.

Potenciál pro SMR v lokalitách mimo větší města je větší pro výrobu elektrické energie, kdežto potenciál pro teplárenské účely v blízkosti měst závisí na faktoru, zda nová technologie skutečně splní očekávanou oblast zóny havarijního plánování na hranici areálu JE. Odstávka pro výměnu paliva během topné sezóny může být další překážkou k volbě jiného zdroje SMR, protože náklady na více bloků se u menších sítí CZT nemusí vyplatit.

## Závěr

Rešerší zvažovaných lokalit, designů SMR a záměru státu jsem hledal lokalitu s největším potenciálem umístění jaderného bloku mimo současné jaderné lokality Temelín a Dukovany. Na základě umístění, dostupnosti infrastruktury, vlivu na elektrizační soustavu a současné znalosti vlivů (přírodních a lidských) v lokalitě jsem zvolil Tušimice. Volba designu RR SMR je subjektivní a neodráží nadřazenost nad dalšími vhodnými designy jako například BWRX-300 nebo AP300, jelikož každý design má své klady a zápory. Pro účel této práce jsem mohl zvolit obě alternativy a přepočítat ekonomickou návratnost, ale proces výběru a přípravy lokality by zůstal neměnný.

Pro lokalitu Tušimice jsem navrhnul proces přechodu z nejaderné na jadernou lokalitu podle Atomového zákona a k němu navazujících vyhlášek a nálezů. První kroky tohoto procesu začaly v roce 2020 a dle mého předpokladu mohou trvat alespoň dalších 5 let, což je dáno obsáhlým sběrem dat z terénních průzkumů, dlouhým řízením studie EIA, vyhotovením modelů přírodních vlastností, posouzením všech vlivů na výstavbu jaderné elektrárny a administrativním procesem získání územního rozhodnutí. Kromě přípravy lokality jsem nastínil některé části stavby – vyvedení elektrického výkonu a připojení na infrastrukturu. Celá stavba by zahrnovala popis komponent reaktorové haly, strojní části, provedení terciárního okruhu, systému kontroly a řízení, skladiště paliva nebo administrativních a dalších budov. Detailní popis už je mimo záměr této práce, kde jsem řešil vliv na ES a uvažoval dostupná data o očekávaných nákladech na kompletní výstavbu SMR.

Potenciál lokality jsem následně zhodnotil po ekonomické stránce, tj. nacenil přípravné práce lokality, elektrické stroje, připojení k veřejné infrastruktuře a srovnal projektové odhady CAPEX a LCOE bloku RR SMR s velkými jadernými bloky. Při srovnání jsem pracoval s několika zjednodušujícími předpoklady jako například n-tý blok, současný odhad CAPEX, výstavba dvojbloku nebo změna úrokové sazby. Ekonomické srovnání nakonec navzdory všem zjednodušujícím předpokladům vyšlo v neprospěch SMR, kde velké bloky jsou na instalovaný výkon  $MW_e$  výhodnější. Zlepšení LCOE u SMR lze dosáhnout využitím tepla pro horkovodní síť CZT, jenže vliv je nízký a hodnota LCOE zůstane na úrovni větších bloků.

Možný protiargument se nabízí po stránce technické a strategické, kde menší lokality jsou v ČR dostupné a umožní tak výstavbu menších bloků SMR na místech, kde by se jeden velký blok nemohl umístit. Dalším kladem rozmístění SMR ve více lokalitách je pozitivní vliv na chod ES, kde bude zapotřebí regulace napětí rotujícími setrvačnostmi. Energetická stabilita a soběstačnost je ohrožena s odstavováním uhelných bloků, které se pomalu ekonomicky nevyplatí provozovat s rostoucími cenami emisních povolenek. Rychlejší stavba bloku SMR oproti klasickým by mohla rychleji kompenzovat deficit ve výrobě ČR a záměr transformace uhelných lokalit je v souladu s plány ČR a EU.

Pro představu vlivu úroku, změny investičních a provozních nákladů nebo vliv dodávky tepla jsem vytvořil zjednodušený výpočet LCOE a citlivost této hodnoty na změnu vstupních parametrů. Zjištěné vlivy jsou následující: úrok do 4 % se současnými cenami výkupu elektřiny a tepla je hraniční pro návratnost jednoho bloku RR SMR v lokalitě Tušimice. Od úrokové sazby 3 % a výš má změna CAPEX vyšší váhu než změna provozních nákladů a prodej tepla by zlepšil ekonomiku elektrárny přibližně o 5 % při úrokové míře 3 %. Provedené výpočty LCOE vychází z projektované ceny CAPEX a jsou značně zjednodušené. Přesnější řešení by zahrnulo vývoj – inflace, klimatu, ceny tepla, ceny elektřiny a úrokových sazeb, dále přepočtení nákladů na počátek výstavby v roce 2030 nebo výpočet vlivu druhého bloku v lokalitě. Úspěšná výstavba prvního SMR v Temelíně by měla pravděpodobně vliv na ekonomickou náročnost druhé stavby v Tušimicích.

Na první pohled se SMR jeví jako neekonomické zdroje v porovnání s OZE nebo velkými bloky, jenže jejich přínos pro energetiku, průmysl, ekonomiku a vědu je nutné hodnotit komplexně, nikoliv jen z pohledu ekonomiky samotné výroby elektřiny. Další slabinou této technologie je absence zkušeností z provozu kvůli její novosti a nespočet designů v různých fázích vývoje. S uvedením prvního bloku BWRX-300 do provozu v roce 2028 a podporou vývoje SMR pro naplnění klimatických cílů EU se nejistota technologie sníží, čímž by se mohla stát dostupnější pro ekonomicky méně rozvinuté státy.

## Literatura

- [1] GALETKA, Martin. *Vznik a vývoj přenosové soustavy elektrické energie*. Online. *TZB-info*. 2016, roč. 2016. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/13645-vznik-a-vyvoj-prenosove-soustavy-elektricke-energie>. [cit. 2024-01-05].
- [2] *Přenosová soustava*. Online. ČEPS a.s. © 2023. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/prenosova-soustava>. [cit. 2024-01-05].
- [3] HAVLÍČEK, Karel. *Řízení, regulace a měření elektrizačních soustav: část I.*, 1. vyd., Plzeň: VŠSE, 1985
- [4] HAVLÍČEK, Karel. *Řízení, regulace a měření elektrizačních soustav: část II.*, 1. vyd., Plzeň: VŠSE, 1985
- [5] *Vláda schválila cestovní mapu pro rozvoj malých a středních reaktorů v Česku*. Online. Ministerstvo průmyslu a obchodu. 2023. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/vlada-schvalila-cestovni-mapu-pro-rozvoj-malych-a-strednich-reaktoru-v-cesku--277820/>. [cit. 2023-12-01].
- [6] *Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040 (MAF CZ 2022)*. Online. ČEPS a.s., 2023. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/elektroenergetika/2023/5/Hodnoceni-zdrojove-primerenosti-elektrizacni-soustavy-CR-2022.pdf>. [cit. 2024-04-02].
- [7] *Vláda schválila klimaticko-energetický plán. Nastíní cestu dekarbonizace české ekonomiky*. Online. Ministerstvo průmyslu a obchodu. 2023. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/vlada-schvalila-klimaticko-energeticky-plan--nastini-cestu-dekarbonizace-ceske-ekonomiky--277443/>. [cit. 2024-04-02].
- [8] *Emise skleníkových plynů*. Online. Český hydrometeorologický ústav. © 2024. Dostupné z: [https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/21groc/gr21cz/21\\_10\\_sklenikove\\_plyny\\_cz\\_v2.pdf](https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/21groc/gr21cz/21_10_sklenikove_plyny_cz_v2.pdf). [cit. 2024-04-16].
- [9] *Aktualizace Vnitrostátního plánu České republiky v oblasti energetiky a klimatu*. Online. Ministerstvo průmyslu a obchodu. 2023. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/aktualizace-vnitrostatniho-planu-ceske-republiky-v-oblasti-energetiky-a-klimatu--277532/>. [cit. 2024-04-02].

- [10] *Aktualizace Státní energetické koncepce (SEK)*. Online. Ministerstvo průmyslu a obchodu. 2023. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/aktualizace-statni-energeticke-koncepce-sek--279668/>. [cit. 2024-03-23].
- [11] *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. Online. 2022, roč. 2022, č. 8. Vídeň: IAEA, 2022. Dostupné z: <https://nucleus.iaea.org/sites/smr/Shared%20Documents/2022%20IAEA%20SMR%20ARIS%20Booklet.pdf>. [cit. 2023-11-17].
- [12] *Corporate Overview*. Online. Holtec International. 2023. Dostupné z: <https://holtecinternational.com/company/corporate-overview/>. [cit. 2023-11-17].
- [13] *GE Hitachi Nuclear*. Online. GE Hitachi Nuclear Energy. 2023. Dostupné z: <https://www.gevernova.com/nuclear>. [cit. 2023-11-17].
- [14] *Small Modular Reactor Nuclear Technology*. Online. NuScale Power. 2023. Dostupné z: <https://www.nuscalepower.com/en>. [cit. 2023-11-17].
- [15] *V USA odpískali projekt první jaderné elektrárny s malým modulární reaktorem. Nevyplatí se*. Online. *E15*. 2023, roč. 4, č. 4. ISSN 2694-9229. Dostupné z: <https://www.e15.cz/byznys/prumysl-a-energetika/v-usa-odpiskali-projekt-prvni-jaderne-elektrarny-s-malym-modularni-reaktorem-nevyplati-se-1411564>. [cit. 2023-11-17].
- [16] *Innovation – Small Modular Reactors*. Online. Rolls-Royce. 2023. Dostupné z: [https://www.rolls-royce.com/innovation/small-modular-reactors.aspx#](https://www.rolls-royce.com/innovation/small-modular-reactors.aspx#/). [cit. 2023-11-18].
- [17] *Our SMR solution NUWARD*. Online. EDF GROUP: NUWARD. 2023. Dostupné z: <https://www.nuward.com/en/our-smr-solution>. [cit. 2023-11-18].
- [18] *SMART Technology*. Online. SMART Power Company. 2023. Dostupné z: [http://smart-nuclear.com/tech/d\\_history.php](http://smart-nuclear.com/tech/d_history.php). [cit. 2023-11-18].
- [19] *AP300 Small Modular Reactor*. Online. Westinghouse Nuclear. 2023. Dostupné z: <https://www.westinghousenuclear.com/energy-systems/ap300-smr>. [cit. 2023-11-18].
- [20] *Nuclear energy and climate change*. Online. World Nuclear Association. 2018. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/nuclear-essentials/how-can-nuclear-combat-climate-change.aspx>. [cit. 2023-12-02].
- [21] *Levelized Cost of Energy (LCOE)*. Online. Corporate Finance Institute. 2023. Dostupné z: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/valuation/levelized-cost-of-energy-lcoe/>. [cit. 2023-12-02].

- [22] *Malé modulární reaktory – Spolupráce a partnerství*. Online. ČEZ a.s. 2023. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/nove-jaderne-zdroje/male-modularni-reaktory/spoluprace-a-partnerstvi>. [cit. 2023-12-02].
- [23] *SMR Holtec design*. Online. In: Neutron Bytes. 2021. Dostupné z: <https://neutronbytes.files.wordpress.com/2021/01/holtec-design.jpg>. [cit. 2023-11-17].
- [24] *Province of Ontario to deploy additional GE Hitachi BWRX-300 Small Modular Reactors*. Online. General Electric. 2023. Dostupné z: <https://www.ge.com/news/press-releases/province-of-ontario-to-deploy-additional-ge-hitachi-bwrx-300-small-modular-reactors>. [cit. 2023-11-17].
- [25] *SMR Fact sheet*. Online. NuScale Power. 2022. Dostupné z: <https://www.nuscalepower.com/-/media/nuscale/pdf/fact-sheets/smr-fact-sheet.pdf>. [cit. 2023-11-17].
- [26] *E3S Case Chapter 4: Reactor (Fuel & Core)*. PDF. Rolls-Royce SMR Ltd, 2023. Dostupné také z: [https://gda.rolls-royce-smr.com/assets/documents/documents/rr-smr-e3s-case-chapter-4---reactor-\(fuel-&-core\)-issue-1-gda-publication.pdf](https://gda.rolls-royce-smr.com/assets/documents/documents/rr-smr-e3s-case-chapter-4---reactor-(fuel-&-core)-issue-1-gda-publication.pdf). [cit. 2023-12-30].
- [27] *Evropský malý modulární reaktor pro českou energetiku a teplárenství: Nuward SMR*. Online. *Technický týdeník*. 2023. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/energetika-teplo/evropsky-maly-modularni-reaktor-pro-ceskou-energetiku-a-teplarenstvi-nuward-smr\\_58741.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/energetika-teplo/evropsky-maly-modularni-reaktor-pro-ceskou-energetiku-a-teplarenstvi-nuward-smr_58741.html). [cit. 2024-03-26].
- [28] *SMART Reactor vessel assembly*. Online. In: Research gate. 2018. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/270673350/figure/fig1/AS:1088618844172301@1636558366499/SMART-reactor-vessel-assembly.jpg>. [cit. 2023-11-18].
- [29] *Westinghouse Advanced Safety of AP300*. Online. Westinghouse Česká republika. 2023. Dostupné z: <https://www.westinghousenuclear.com/portals/20/ap300/Advanced-Safety-524x419-CZ.jpg?ver=it-KxWUWKujCCkhGpRYYIw%3d%3d>. [cit. 2023-12-30].
- [30] *Westinghouse Wins a Deal to Build Four AP300s in UK*. Online. Neutron Bytes. 2024. Dostupné z: <https://neutronbytes.com/2024/02/10/westinghouse-wins-a-deal-to-build-four-ap300s-in-uk/>. [cit. 2024-02-25].



- [31] *Six SMR power plants approved in Poland*. Online. World Nuclear News. 2023. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Six-SMR-power-plants-approved-in-Poland>. [cit. 2024-02-25].
- [32] *Holtec and Hyundai E&C partner with British firms to advance UK SMR bid*. Online. World Nuclear News. 2024. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Team-Holtec-partners-with-British-firms-to-advance>. [cit. 2024-04-05].
- [33] *ČEZ chce vybrat dodavatele pro první modulární reaktor v ČR do konce roku*. Online. *Oenergetice.cz*. 2024. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrarny-cr/cez-chce-vybrat-dodavatele-pro-prvni-modularni-reaktor-v-cr-do-konce-roku>. [cit. 2024-04-12].
- [34] *ČEZ po předběžném posouzení vytipoval další dvě preferované lokality pro malé modulární reaktory*. Online. ČEZ a.s. 2023. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/promedia/tiskove-zpravy/cez-po-predbeznem-posouzeni-vytipoval-dalsi-dve-preferovane-lokality-pro-male-modularni-reaktory-vedle-pilotniho-temelina-by-mohly-vzniknout-v-detmarovicich-a-t-173388>. [cit. 2024-04-12].
- [35] *Posuzování vlivu na životní prostředí*. Online. ČEZ a.s. 2021. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/nove-jaderne-zdroje/novy-temelin/zivotni-prostredi>. [cit. 2024-04-12].
- [36] *Jihočeský kraj chystá podmínky pro malý reaktor v temelínské elektrárně*. Online. *Idnes.cz*. 2024. Dostupné z: [https://www.idnes.cz/ceske-budejovice/zpravy/temelin-elektrarna-jadro-janoch-hejtman-rozvoj-reaktor.A240209\\_776336\\_budejovice-zpravy\\_epet](https://www.idnes.cz/ceske-budejovice/zpravy/temelin-elektrarna-jadro-janoch-hejtman-rozvoj-reaktor.A240209_776336_budejovice-zpravy_epet). [cit. 2024-04-12].
- [37] *Nový jaderný zdroj v lokalitě Temelín: Dokumentace vlivů záměru na životní prostředí*. PDF. ČEZ a.s., Temelín, 2021. Dostupné z: [https://www.cez.cz/webpublic/file/edec/2021/05/eia\\_njz\\_ete\\_komplet.pdf](https://www.cez.cz/webpublic/file/edec/2021/05/eia_njz_ete_komplet.pdf).
- [38] *Mapy.cz*. Online. Seznam.cz, a.s. © 2024. Dostupné z: [mapy.cz](https://www.mapy.cz). [cit. 2024-04-12].
- [39] *Elektrárny Tušimice*. Online. ČEZ a.s. © 2024. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/uhelne-elektrarny-a-teplarny/uhelne-elektrarny-a-teplarny-cez-v-cr/elektrarny-tusimice-58175>. [cit. 2024-04-14].
- [40] *Integrované povolení: Elektrárna Dětmárovice, zařízení pro výrobu elektrické energie a tepla*. PDF. Krajský úřad Moravskoslezského kraje, 2023, s. 15.

- Dostupné z: [https://www.msk.cz/assets/temata/zivotni\\_prostredi/elektrarna-detmarovice.pdf](https://www.msk.cz/assets/temata/zivotni_prostredi/elektrarna-detmarovice.pdf). [cit. 2024-04-14].
- [41] SVOBODA, Petr. *S plynem počítáme, dlouhodobě ho bude dost*. Online. *Allforpower*. 2022, roč. 14, č. 1. ISSN 1802-8535. Dostupné z: <https://allforpower.cz/plynarenstvi/s-plynem-pocitame-dlouhodobě-ho-bude-dost-655>. [cit. 2024-04-14].
- [42] *Elektrárna Dětmarovice*. Online. ČEZ a.s. © 2024. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/uhelne-elektrarny-a-teplarny/uhelne-elektrarny-a-teplarny-cez-v-cr/elektrarna-detmarovice-58185>. [cit. 2024-04-14].
- [43] *Elektrárny Pruněřov*. Online. ČEZ a.s. © 2024. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/uhelne-elektrarny-a-teplarny/uhelne-elektrarny-a-teplarny-cez-v-cr/elektrarny-prunerov-58176>. [cit. 2024-04-17].
- [44] *Výroční zpráva za rok 2022*. PDF. 1. 2022. ČEZ TEPLÁRENSKÁ, a.s. Dostupné z: [https://www.cezteplarenska.cz/file/edee/2023/06/vz\\_cez\\_teplarenska\\_2022.pdf](https://www.cezteplarenska.cz/file/edee/2023/06/vz_cez_teplarenska_2022.pdf).
- [45] *Výroční zpráva 2021*. PDF. 1. 2021. Energotrans, a.s. Dostupné z: [https://www.cez.cz/webpublic/file/edee/2022/04/energotrans\\_vz-2021\\_final.pdf](https://www.cez.cz/webpublic/file/edee/2022/04/energotrans_vz-2021_final.pdf).
- [46] *Elektrárna Ledvice*. Online. ČEZ a.s. © 2024. 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>. [cit. 2024-04-17].
- [47] *Provozované paroplynové a plynové elektrárny a teplárny*. Online. ČEZ a.s. © 2024. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/paroplynové-a-plynové-zdroje/provozovane-paroplynové-elektrarny>. [cit. 2024-04-19].
- [48] *Tykač zvažuje, že zavře elektrárny Počerady a Chvaletice, píše portál*. Online. *Idnes.cz*. 2024, roč. 1.3.2024. Dostupné z: [https://www.idnes.cz/ekonomika/domaci/tykac-uhli-pocerady-chvaletice.A240301\\_090928\\_ekonomika\\_klak](https://www.idnes.cz/ekonomika/domaci/tykac-uhli-pocerady-chvaletice.A240301_090928_ekonomika_klak). [cit. 2024-04-19].
- [49] *Elektrárna Chvaletice – Virtuální prohlídka*. Online. Energy Tour. © 2024. Dostupné z: [https://energytour.cz/cz/o\\_elektrarne/virtualni-prohlidka/](https://energytour.cz/cz/o_elektrarne/virtualni-prohlidka/). [cit. 2024-04-19].
- [50] *Sokolovská uhelná získala americký grant na přípravu malých modulárních reaktorů*. Online. *Oenergetice.cz*. 2023, 8.9.2023. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/sokolovska-uhelna-ziskala-americky-grant-na-pripravu-malych-modularnich-reaktoru>. [cit. 2024-04-19].

- [51] *Příběh paroplynové elektrárny Vřesová*. Online. *Nová Energie*. roč. 2021, č. 2, s. 4. Dostupné z: [https://issuu.com/suasgroup/docs/suas.mag\\_02.230mm\\_300mm-issue/s/14262767](https://issuu.com/suasgroup/docs/suas.mag_02.230mm_300mm-issue/s/14262767). [cit. 2024-04-19].
- [52] BŘEŠŤAN, Robert. *Třetí jaderná elektrárna v Česku*. Online. *Hlídací pes*. 2021. Dostupné z: <https://hlidacipes.org/treti-jaderna-elektrarna-v-cesku-misto-je-vybrane-uz-desitky-let-jen-dostavba-dukovan-nejstaci/>. [cit. 2024-04-19].
- [53] *Územní plán Jeseník nad Odrou*: Úplné znění po změně č. 1., Jeseník nad Odrou, 2018, s. 28. Dostupné z: [https://www.jeseniknadodrou.cz/e\\_download.php?file=data/multipage/editor/editor-40-174-cs\\_2.pdf&original=Textova cast UP po zmene 1.pdf](https://www.jeseniknadodrou.cz/e_download.php?file=data/multipage/editor/editor-40-174-cs_2.pdf&original=Textova%20cast%20UP%20po%20zmene%201.pdf). [cit. 2024-04-19].
- [54] *Místo uhlí chtěli soudruzi do Opatovic vozit uran, připomíná výstava*. Online. *Idnes.cz*. 2013. Dostupné z: [https://www.idnes.cz/pardubice/zpravy/jaderna-elektrarna-u-opatovic-nad-labem-mela-zacit-vyrabet-energii-uz-pred-lety.A131121\\_2002654\\_pardubice-zpravy\\_jah](https://www.idnes.cz/pardubice/zpravy/jaderna-elektrarna-u-opatovic-nad-labem-mela-zacit-vyrabet-energii-uz-pred-lety.A131121_2002654_pardubice-zpravy_jah). [cit. 2024-04-19].
- [55] *Záměr zajištění monitorování výpustí z jaderného zařízení*. PDF. ČEZ a.s. Dukovany, 2021. Dostupné z: <https://www.cez.cz/webpublic/file/edee/2023/04/zamer-zajisteni-monitorovani-vypusti-z-jaderneho-zarizeni-1-20230403-122142.pdf>. [cit. 2024-04-21].
- [56] *Atomové právo*. Online. Státní úřad pro jadernou bezpečnost. © 2024. Dostupné z: <https://sujb.gov.cz/legislativa/atomove-pravo>. [cit. 2024-04-22].
- [57] *Posuzování vlivu na životní prostředí*. Online. ČEZ a.s. © 2024. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/nove-jaderne-zdroje/novy-temelin/zivotni-prostredi>. [cit. 2024-04-22].
- [58] KLÍMOVÁ, Jana. *ČEZ má povolení pro další bloky v Dukovanech. Mohou přibýt až dva*. Online. *IROzhlás*. roč. 2023, č. 1, s. 2. Dostupné z: [https://www.irozhlás.cz/ekonomika/dukovany-uzemni-rozhodnuti-dva-nove-jaderne-bloky-ministerstvo\\_2310301214\\_kac](https://www.irozhlás.cz/ekonomika/dukovany-uzemni-rozhodnuti-dva-nove-jaderne-bloky-ministerstvo_2310301214_kac). [cit. 2024-04-27].
- [59] *Umístění stavby jaderného zařízení*. Online. Svět Energie. © 2024. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/zivotni-cyklus-elektrarny/umisteni-stavby-jaderneho-zarizeni>. [cit. 2024-04-27].
- [60] *Výstavba jaderné elektrárny*. Online. Svět Energie. © 2024. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna->

- [elektrarna-podrobne/zivotni-cyklus-elektrarny/vystavba-jaderne-elektrarny](#). [cit. 2024-04-27].
- [61] *Postup při připojování výroben elektřiny*. Online. Energetický regulační úřad. 2023. Dostupné z: <https://eru.gov.cz/postup-pri-pripojovani-vyroben-elektriny>. [cit. 2024-04-27].
- [62] *Kodex PS*. Online. ČEPS a.s. © 2024. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>. [cit. 2024-04-27].
- [63] IBLER, Zbyněk, BERAN, Miloš. *Elektrárny 2*, VŠSE 1982. Dostupné z: [https://home.zcu.cz/~nohac/E2/Skripta\\_Elektrarny\\_II.PDF](https://home.zcu.cz/~nohac/E2/Skripta_Elektrarny_II.PDF) [cit. 2024-04-27].
- [64] Vyhláška č. 16/2016 Sb. o podmínkách připojení k elektrizační soustavě. Online. 2016, poslední změna 01.01.2022. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-16> [cit. 2024-04-27].
- [65] KOUT, Pavel, HÁJEK, Roman. *Elektrická část JE VVER 1000 I. a II. Část*, Temelín 1996, [cit. 2024-04-27]
- [66] *Webové služby*. Online. Česká geologická služba. © 2024. Dostupné z: <https://cgs.gov.cz/mapy-a-data/webove-sluzby>. [cit. 2024-05-03].
- [67] *EIA, SEA posudky*. Online. EIA posudek. © 2024. Dostupné z: <http://www.eia-posudek.cz/>. [cit. 2024-05-03].
- [68] *Informační systém EIA*. Online. EIA. © 2024. Dostupné z: [https://portal.cenia.cz/eiasea/view/eia100\\_cr?lang=cs](https://portal.cenia.cz/eiasea/view/eia100_cr?lang=cs). [cit. 2024-05-03].
- [69] *Jaderná energetika – konzultace, analýzy, poradenství*. Online. Jacobs Clean Energy. © 2024. Dostupné z: <https://www.jacobs.cz/nase-sluzby/jaderna-energetika-konzultace-analyzy-poradenstvi/>. [cit. 2024-05-03].
- [70] *Územní plán Temelín*. PDF. Obec Temelín. 2021, s. 39. Dostupné z: [https://www.tnv.cz/assets/File.ashx?id\\_org=17212&id\\_dokumenty=22836](https://www.tnv.cz/assets/File.ashx?id_org=17212&id_dokumenty=22836). [cit. 2024-05-03].
- [71] *Územní řízení Dukovany II*. Online. ČEZ a.s. © 2024. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/nove-jaderne-zdroje/nove-dukovany/uzemni-rizeni>. [cit. 2024-05-03].
- [72] *Demolice uhelné elektrárny Prunéřov I*. Online. ČEZ Energetické produkty s.r.o. 2023. Dostupné z: <https://www.cezep.cz/cs/aktuality/demolice-uhelne-elektrarny-prunerov-i-190090>. [cit. 2024-05-03].

- [73] *Vstupní školení do Jaderné elektrárny Temelín*. ČEZ a.s. 2018. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/skoleni/revize skripta a1 ete 2018.pdf>.
- [74] *Blokový transformátor*. Online. Svět Energie. © 2024. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/blokovy-transformator/vyklad>. [cit. 2024-05-04].
- [75] *Elektrický generátor*. Online. Svět Energie. © 2024. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/elektricky-generator/vyklad>. [cit. 2024-05-04].
- [76] DOLEŽAL, Jaroslav; ŠŤASTNÝ, Jiří; ŠPETLÍK, Jan; BOUČEK, Stanislav a BRETTSCHEIDER, Zbyněk. *Jaderné a klasické elektrárny*. PDF. ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5. Dostupné také z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/cvut-1-elektrarny.pdf>.
- [77] *SŽ S11 Prostorová průchodnost tratí*. PDF. Správa Železnic. 2021. Dostupné z: [https://www.spravazeleznic.cz/documents/50004227/139626480/SZ\\_S11+ve+zn%C4%9Bn%C3%AD+1.+opravy.pdf/886940ff-0288-4626-9094-446fd956879c?version=10.0](https://www.spravazeleznic.cz/documents/50004227/139626480/SZ_S11+ve+zn%C4%9Bn%C3%AD+1.+opravy.pdf/886940ff-0288-4626-9094-446fd956879c?version=10.0). [cit. 2024-05-05].
- [78] *Integrované povolení: Elektrárna Tušimice II – Výroba a dodávka elektrické energie a tepla*. Online. 26. vydání. Městský úřad Ústeckého kraje, 2023. Dostupné také z: [https://ippc.mzp.cz/ippc/ippc.nsf/\\$pid/MZPPRHV1UUT2](https://ippc.mzp.cz/ippc/ippc.nsf/$pid/MZPPRHV1UUT2).
- [79] *European Industrial Alliance on SMRs*. Online. Evropská komise. 2024. Dostupné z: [https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/industrial-alliances/european-industrial-alliance-small-modular-reactors\\_en?prefLang=cs](https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/industrial-alliances/european-industrial-alliance-small-modular-reactors_en?prefLang=cs). [cit. 2024-05-08].
- [80] *Ceník laboratorních prací*. Online. Česká geologická služba. © 2024. Dostupné z: <https://cgs.gov.cz/laboratore/cenik-laboratornich-praci>. [cit. 2024-05-08].
- [81] *Projektová dokumentace průzkumných vrtných prací projekt Turów: II. etapa průzkumná*. Příloha 3. Česká geologická služba. 2019. Dostupné také z: [https://smlouvy.gov.cz/smlouva/soubor/13686134/3.0\\_zdCGS-TUROW-Vrty-Priloha3\\_Technick%C3%A1%20specifikace.pdf](https://smlouvy.gov.cz/smlouva/soubor/13686134/3.0_zdCGS-TUROW-Vrty-Priloha3_Technick%C3%A1%20specifikace.pdf)
- [82] *Loni Temelín do Českých Budějovic dodal 258 terajoulů tepla*. Online. ČEZ a.s. 2024. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/loni-temelin-do-ceskych-budejovic-dodal-258-terajoulu-tepla-187580> [cit. 2024-05-09].

- [83] *Economics of Nuclear Power*. Online. World Nuclear. 2023. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/Information-Library/Economic-Aspects/Economics-of-Nuclear-Power> [cit. 2024-05-09].
- [84] *Rolls-Royce on track for 2030 delivery of UK SMR*. Online. World Nuclear News. 2021. Dostupné z: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Rolls-Royce-on-track-for-2030-delivery-of-UK-SMR>. [cit. 2024-05-08].
- [85] *Levelised Cost of Electricity Calculator*. Online. Nuclear Energy Agency. © 2024. Dostupné z: <https://www.oecd-nea.org/lcoe/>. [cit. 2024-05-08].
- [86] TRAMBA, David. *V Polsku unikla čísla, za kolik Američané, Korejci a Francouzi nabízejí své reaktory*. Online. *Ekonomický deník*. 2022, č. 23.10., s. 2. Dostupné z: <https://ekonomickydenik.cz/uz-je-to-venku-v-polsku-unikla-cisla-za-kolik-americane-korejci-a-francouzi-nabizeji-sve-reaktory/>. [cit. 2024-05-08].
- [87] *Power transformers: Machine and network transformers from 30 to over 1,300 MVA*. PDF. Siemens Energy Global GmbH & Co., 2024. Dostupné z: [https://p3.aprimocdn.net/siemensenergy/6813d44e-8a11-47a5-bef3-b13a00f783df/Power-Transformers-Brochure\\_SE-Final-pdf\\_Original%20file.pdf](https://p3.aprimocdn.net/siemensenergy/6813d44e-8a11-47a5-bef3-b13a00f783df/Power-Transformers-Brochure_SE-Final-pdf_Original%20file.pdf).
- [88] *Cenové databáze*. Online. Státní fond dopravní infrastruktury. © 2024. Dostupné z: <https://www.sfdi.cz/pravidla-metodiky-a-ceniky/cenove-databaze/>. [cit. 2024-05-08].
- [89] *Bilance energetické energie 2022*. Online. Český statistický úřad ČSÚ. © 2024. Dostupné z: [https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/index.jsf?page=vystup-objekt&pvo=ENE04&z=T&f=TABULKA&katalog=33415&c=v3~8\\_RP2022](https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/index.jsf?page=vystup-objekt&pvo=ENE04&z=T&f=TABULKA&katalog=33415&c=v3~8_RP2022). [cit. 2024-05-05].
- [90] *Informační systém EIA: Vrchní vedení pro vyvedení výkonu z FVE Tušimice II a Tušimice III*. Online. EIA. 2024. Dostupné z: [https://portal.cenia.cz/eiasea/detail/EIA\\_ULK1264?lang=cs](https://portal.cenia.cz/eiasea/detail/EIA_ULK1264?lang=cs). [cit. 2024-05-05].
- [91] TRAMBA, David. *Výkon až 88 megawattů*. Online. *Ekonomický deník*. roč. 2023 19.6. Dostupné z: <https://ekonomickydenik.cz/vykon-az-876-megawattu-cez-pozadal-krajsky-urad-o-schvaleni-nejvetsi-solarni-elektrarny-v-cesku/>. [cit. 2024-05-05].

## Seznam tabulek

Tabulka č. 1: Koridor 2030 z verze SEK 2024.....	- 10 -
Tabulka č. 2: Koridor 2040 předpokládané výroby elektřiny z roku 2015 a 2024*.....	- 11 -
Tabulka č. 3: Srovnání instalovaného výkonu $GW_e$ ve scénáři WEM / WAM3 .....	- 13 -
Tabulka č. 4: Základní technické parametry SMR-160 [11].....	- 20 -
Tabulka č. 5: Základní technické parametry BWRX-300 [11] .....	- 22 -
Tabulka č. 6: Základní technické parametry modulu NuScale [11].....	- 24 -
Tabulka č. 7: Základní technické parametry RR SMR [11].....	- 26 -
Tabulka č. 8: Základní technické parametry NUWARD SMR [11] .....	- 28 -
Tabulka č. 9: Základní technické parametry SMART a i-SMR [11] .....	- 30 -
Tabulka č. 10: Základní technické parametry AP300 [11].....	- 32 -
Tabulka č. 11: Základní technické parametry zvažovaných designů [11] .....	- 35 -
Tabulka č. 12: Výňatek lokalit ze seznamu zdrojů uvažovaných dokumentem od MPO-	36 -
Tabulka č. 13: Shrnutí možných lokalit s uhelnou elektrárnou.....	- 49 -
Tabulka č. 14: Rozdělení nákladů CAPEX na výstavbu.....	- 71 -
Tabulka č. 15: Poslední postavené jaderné bloky ve světě a jejich náklady .....	- 73 -
Tabulka č. 16: Vypočtené hodnoty LCOE .....	- 75 -
Tabulka č. 17: Vypočtené hodnoty LCOE s uvážením zisku z tepla .....	- 76 -

## Seznam obrázků

Obrázek č. 1: Stav přenosové soustavy k roku 2023 [2] .....	- 3 -
Obrázek č. 2: Plánované úpravy přenosové soustavy v letech 2023-2032 [2] .....	- 3 -
Obrázek č. 3: Koridor 2040 podílu výroby elektřiny ze SEK – rozsah min a max .....	- 11 -
Obrázek č. 4: Vývoj emisí CO <sub>2</sub> v ČR mezi lety 1990 a 2020 [8].....	- 13 -
Obrázek č. 5: Příčný řez reaktorem SMR-160 [23].....	- 20 -
Obrázek č. 6: Schéma elektrárny s reaktorem BWRX-300 [11] .....	- 22 -
Obrázek č. 7: Rozložení reaktorové haly NuScale VOYGR [25] .....	- 24 -
Obrázek č. 8: Reaktorová nádoba Rolls-Royce SMR [26].....	- 26 -
Obrázek č. 9: Reaktorový blok NUWARD [27] .....	- 28 -
Obrázek č. 10: Pohled na integrovaný reaktor SMART [28].....	- 30 -
Obrázek č. 11: Popis kontejnmentu AP300 [29] .....	- 32 -
Obrázek č. 12: Časová osa vývoje, licencování a stavby FOAK .....	- 33 -
Obrázek č. 13: Mapa současných provozů a greenfieldů Blahutovice (11) a Tetov (12)-	37 -
Obrázek č. 14: Letecký snímek jaderné elektrárny Temelín a rozvodny Kočín [38].....	- 38 -
Obrázek č. 15: Letecký snímek hnědouhelné elektrárny Tušimice II [38] .....	- 39 -
Obrázek č. 16: Letecký snímek černouhelné elektrárny Dětmárovice [38] .....	- 40 -
Obrázek č. 17: Letecký snímek hnědouhelné elektrárny Pruněřov II [38].....	- 42 -
Obrázek č. 18: Letecký snímek hnědouhelné elektrárny Mělník [38] .....	- 43 -
Obrázek č. 19: Letecký snímek hnědouhelné elektrárny Ledvice [38] .....	- 44 -
Obrázek č. 20: Letecká mapa elektrárny Počerady [38].....	- 45 -
Obrázek č. 21: Letecká mapa elektrárny Chvaletice [38] .....	- 46 -
Obrázek č. 22: Elektrické schéma jednoho bloku JE Temelín [65] .....	- 56 -
Obrázek č. 23: Současná rozvodna Tušimice [38] .....	- 64 -
Obrázek č. 24: Profil prostorové průchodnosti vagónu EP 2.5 [77].....	- 67 -