

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra výkonové elektroniky a strojů

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Technologie SMR pro dálkové vytápění v ČR

Autor práce: **Jan Ullmann**
Vedoucí práce: **Ing. David Mašata**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jan ULLMANN**
Osobní číslo: **E19B0174P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **Technologie SMR pro dálkové vytápění v ČR**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Zpracujte přehled technologií malých modulárních reaktorů (SMR) s ohledem na jejich potenciál pro zapojení do systémů dálkového vytápění.
2. Analyzujte teplotenskou soustavu ČR, aktuální stav, přístupy k ekologizaci a dekarbonizaci a výhled do budoucnosti.
3. Definujte lokality vhodné pro umístění SMR s odpovídající poptávkou po tepelné energii.
4. Zhodnoťte možnosti aplikace SMR jako náhrady dosluhujících uhelných tepláren v ČR, případně dalších technologií současných teplotenských bloků.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. David Mašata**
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2022**


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



Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná práce se zabývá v první části zejména přehledem malých modulárních reaktorů pro využití v teplotní síti v ČR. Přehled reaktorů byl sestaven na základě výkonové diverzifikace, a také s ohledem na zemi vzniku prototypu. Součástí tohoto přehledu je historický pohled na první jaderné reaktory pro dálkové vytápění (reaktory Ågesta a Secure). Dále je analyzováno teplotnictví v ČR, teplotní mix a popisováno, jakým způsobem dochází v této oblasti k dekarbonizaci a modernizaci. Současně práce obsahuje přehled aktuálně problematických částí teplotnictví (cena emisních povolenek a plynu). Je přidán pohled k inovaci v rámci možnosti skladování energie. Práce zprostředkovává hlavní požadavky pro definování vhodných lokalit pro jaderný zdroj a popisuje v jakém stádiu se nacházejí historicky schválené, nerealizované, lokality pro tyto zdroje. Součástí práce je orientační výpočet tepelné energie, kterou dokážou jednotlivé reaktory dodat při různé regulaci výkonu během topné sezóny. Závěrem se práce snaží vyhodnotit všechna získaná data ohledně realizace SMR, a stanovit které lokality jsou z pohledu poptávky po tepelné energii pro umístění reaktoru nejvhodnější.

Klíčová slova

Teplotnictví v ČR, dekarbonizace, jaderná energetika, malé modulární reaktory

Abstract

In the first part, the presented work deals mainly with an overview of small modular reactors for district heating in the Czech Republic. The overview of reactors was compiled on the basis of power diversification, and also with regard to the country of origin of the prototype. Part of this overview is a historical view of the first nuclear reactors for district heating (Ågesta a Secure). Furthermore, the district heating in the Czech Republic, the district heating mix and the way for decarbonisation and modernization in this area are analyzed. The work contains an overview of currently problematic parts of the heating industry (the price of emission allowances and gas). An insight into Innovation in energy storage options is added. The work tries to mediate the main requirements for defining suitable sites for a nuclear source and describes at what stage are historically approved, unrealized, sites for these sources. Part of the work is an approximate calculation of thermal energy, which individual reactors can supply with different power control during the heating season. Finally, the work tries to evaluate all the data obtained regarding the implementation of SMR, and determine which sites are the most suitable in terms of thermal energy demand for the location of the reactor.

Key Words

Heating industry in the Czech Republic, decarbonization, nuclear energy, small modular reactors

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Davidovi Mašatovi za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích.

Obsah

Úvod.....	- 10 -
1 Přehled SMR pro dálkové vytápění	- 11 -
1.1 Přehled SMR bez přeměny energie.....	- 12 -
1.1.1 TEPLATOR (ZČU Plzeň, ČVUT Praha, Česká republika).....	- 12 -
1.1.2 DHR400 (CNNC, China).....	- 13 -
1.1.3 HAPPY200(SPIC, China).....	- 15 -
1.1.4 RUTA-70 (NIKIET, Rusko).....	- 16 -
1.2 Přehled SMR – Kogenerace	- 17 -
1.2.1 Akademik Lomonosov (KLT-40 S, Rusko)	- 17 -
1.2.2 SMART (KAERI, Korea, Saudská Arábie).....	- 18 -
1.2.3 BWRX-300 (USA and Hitachi-GE Nuclear Energy, Japonsko)	- 19 -
1.2.4 ACP100 (CNNC, China)	- 20 -
1.3 Porovnávací tabulky.....	- 21 -
2 Historické reaktory.....	- 22 -
2.1 Ågesta.....	- 22 -
2.2 Secure	- 23 -
3 Teplárenská soustava ČR	- 25 -
3.1 Aktuální stav	- 25 -
3.2 Teplárny, výtopny, elektrárny ČR.....	- 27 -
3.3 Aktuální ekonomická situace cen paliv.....	- 27 -
3.4 Ekologizace a dekarbonizace	- 29 -
3.5 Možnosti skladování elektrické a tepelné energie.....	- 30 -
3.6 Výhled do budoucna.....	- 31 -
3.7 Současná výstavba – aktuální stav největších tepláren v ČR.....	- 31 -
4 Definování vhodných lokalit pro jaderný zdroj	- 34 -
4.1 Historické lokality pro výstavbu nových JE	- 34 -
4.2 Hlavní požadavky na výstavbu nového jaderného zdroje.....	- 35 -
4.3 Potenciální lokality pro umístění SMR.....	- 36 -
4.3.1 Tetov/Opatovice nad Labem.....	- 36 -

4.3.2	Blahutovice	- 37 -
4.3.3	Řež	- 37 -
5	Poptávka po tepelné energii pro dálkové vytápění	- 38 -
5.1	Výroba tepla bez kogenerace	- 39 -
5.1.1	Regulovaná výroba	- 39 -
5.1.2	Vzorový výpočet pro TEPLATOR (50 MWt):.....	- 40 -
5.1.3	Neregulovaná výroba	- 41 -
5.1.4	Vzorový výpočet pro TEPLATOR (50MWt).....	- 42 -
5.2	Výroba tepla kogenerací.....	- 42 -
6	Zhodnocení lokalit	- 44 -
6.1	Jaderné lokality	- 45 -
7	Závěr	- 47 -
8	Citovaná literatura.....	- 49 -

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
Brutto	Celková výroba elektřiny na svorkách generátorů	-
<i>CIIRC</i>	Český institut informatiky, robotiky a kybernetiky, ČVUT Praha	-
<i>CNNC</i>	Čínská národní jaderná korporace	-
<i>ČEZ</i>	České energetické závody	-
<i>ČR</i>	Česká republika	-
<i>ČVUT</i>	České vysoké učení technické v Praze	-
<i>EU</i>	Evropská unie	-
<i>IMP</i>	Palivo s inertní maticí	-
<i>JE</i>	Jaderná elektrárna	-
<i>KVET</i>	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla	-
<i>MSK-64</i>	Medvěděvova-Sponheuerova-Kárníkova stupnice	-
<i>PE</i>	Parní elektrárna	-
<i>Q</i>	Vyrobené teplo	TJ
<i>SMR</i>	Malé modulární reaktory	-
<i>SPIC</i>	Státní energetická investiční společnost v Číně	-
<i>VVER</i>	Vodo-vodní energetický reaktor	-
<i>ZČU</i>	Západočeská univerzita v Plzni	-
α	Procentuální zatížení	%

Úvod

Teplárenská soustava v ČR se, díky nařízení Evropské unie, nachází na zásadním milníku. Energetický mix, složený z velké části z uhlí, se ukazuje jako dlouhodobě neudržitelný. Nejen v Evropě je snaha provádět dekarbonizaci a modernizaci energetického sektoru. Nyní stojíme před důležitou otázkou, které palivo bude udržitelné pro dálkové vytápění v ČR. Aktuálním dočasným řešením této krize mohou být přestavby na plynové zdroje, popřípadě můžeme uvažovat právě o malých modulárních reaktorech, které po dokončení vývoje mohou být zajímavou alternativou právě k dosluhujícím uhelným teplárnám.

V první části mé práce se zabývám přehledem malých modulárních reaktorů, hlavním rozdělením je možnost kogenerační výroby či výroba tepla pouze pro dálkové vytápění. Oblast SMR zůstává z velké části ve fázi vývoje, ale už se také nově objevují koncepty v komerčním provozu. Koncepty uvedené v práci byly vybrány s ohledem na výkonovou a geopolitickou diverzifikaci.

Dále analyzuji aktuální stav teplárenské sítě v ČR, zda už nyní dochází k ekologizaci a dekarbonizaci, nebo dokonce k výstavbě nových zdrojů. Zásadní proměnnou dnešního teplárenství je často skloňovaná cena emisních povolenek, a také některých paliv využívaných pro teplárenství, především zemního plynu. Nahrazení uhelných zdrojů bude velmi komplexní záležitost. Největší města (až na Brno) jsou dnes zásobovány především z uhelných zdrojů, pomocí kogenerační výroby.

Lokalita pro jaderný zdroj musí splňovat zásadní požadavky pro výstavbu, cíleně se v práci pokusím vyzdvihnout jen nejzásadnější nároky na finální lokalitu. V historii byly v rámci ČR vytipovány další lokality pro jaderné zdroje (nejen Temelín a Dukovany), a proto je cílem této části práce zprostředkovat aktuální situaci v těchto oblastech a jejich možné využití.

V další části práce se zabývám poměření regulace jaderného zdroje oproti vysokému stálému zatížení. Závěrem práce vyhodnotím získaná data, a také se snažím zprostředkovat můj pohled na budoucnost náhrady uhelných zdrojů, právě za SMR.

1 Přehled SMR pro dálkové vytápění

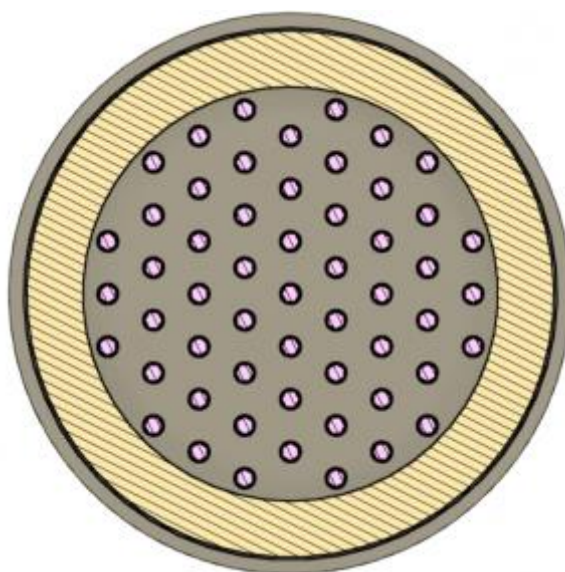
V roce 2020 bylo evidováno přes 70 konceptů malých modulárních reaktorů s tím, že pouze jeden v komerčním provozu. Menší škála projektů se nachází ve stavu výstavby, popřípadě v procesu posledních povolovacích jednání, ale stále jsou tyto malé modulární reaktory spíše ve stavu vývoje. Existují desítky návrhů, v mém přehledu reaktorů jsem tyto koncepty rozdělil podle možnosti výroby tepelné energie buďto s kogenerací (elektrická a tepelná energie) nebo pouze výroby tepla pro dálkové vytápění. Snažil jsem se vybrat projekty, které jsou blízko komerčnímu provozu v rámci následujících let, nebo dokonce se už v komerčním provozu nacházejí (Akademik Lomonosov). Tyto reaktory po licencování a častějším uvedení do komerčního provozu mohou být zajímavou alternativou pro restrukturalizaci energetického, a hlavně teplárenského mixu. Podle mého názoru se často v politických debatách zanedbává výroba tepla a spíše se vyhodnocuje budoucnost výroby elektrické energie. Proto jsem nejdříve do první poloviny přehledu přidal 4 projekty, které se zabývají pouze výrobou tepla. Druhá polovina umožňuje kogenerační provoz. Při výběru konceptů jsem se snažil o geografickou diverzifikaci. V přehledu proto zmiňuji ruské, čínské, japonské, a dokonce i český reaktor. Zároveň jsem se snažil i o rozmanitost výkonů reaktorů, aby byla možnost tyto reaktory instalovat nejen pro velká krajská města.

1.1 Přehled SMR bez přeměny energie

Reaktory určené pouze pro dodávku tepla a vytápění pomocí dálkového rozvodu pracují bez přeměny energie, tudíž zde nedochází k dalšímu využití páry, například pro roztočení generátoru a vytváření elektrické energie. Tyto reaktory mohou být zajímavou náhradou za stávající výtopy v městských částech.

1.1.1 TEPLATOR (ZČU Plzeň, ČVUT Praha, Česká republika)

Projekt TEPLATOR vznikl ze spolupráce výzkumného ústavu CIIRC ČVUT a fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni. Koncept je velmi zajímavý tím, že počítá s využitím použitého jaderného paliva z konvenčních lehkých vodních reaktorů (VVER 440).



Obrázek 1 - TEPLATOR – vizualizace aktivní zóny (44)

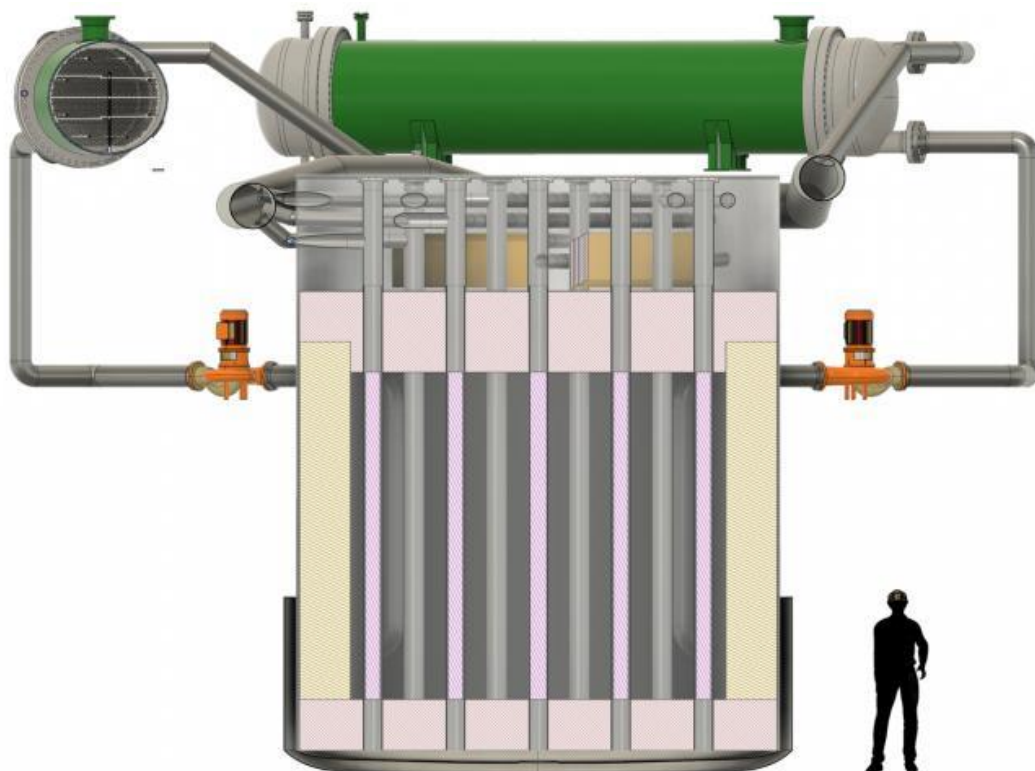
U velkých jaderných elektráren spotřebujeme pouze 5 % a zbylých 95 % paliva nijak nevyužíváme.

Cena systému se v roce 2019 odhadovala na 1 miliardu Kč. Projekt slibuje významně nižší cenu výroby tepla oproti zemnímu plynu, zhruba na třetinu. (1)

Využití vyhořelého paliva se realizuje bez jakékoliv úpravy. Reaktor je velký 6x6 m a využívá 55 kanálů. Součástí jsou také podpůrné provozy (čistění vody, zabezpečení apod.). Odhadovaná plocha objektu je 2000 m², což vede k výraznému zmenšení oproti uhelným teplárnám.

V plánu je výstavba prototypu TEPLATOR DEMO o výkonu 50 MWt z důvodu mírnějších legislativních procesů. Prototyp bude pracovat při atmosférickém tlaku a teplotě 98 °C. Pokud všechny technické a bezpečnostní procesy budou schopny komerčnímu provozu, design bude umožňovat zvýšení výkonu až na 150 MWt. (2)

Jako moderátor je použita těžká voda, na obvodu reaktoru jsou 3 chladicí okruhy reaktor je rozdělen na třetiny po 120°. Toto rozdělení vede k použití 3 cirkulačních čerpadel a 3 trubkových výměníků.



Obrázek 2 - TEPLATOR (2)

Součástí vývoje na tepelném reaktoru je také experiment pro ukládání tepla do dusičnanových solí. Tato technologie je součástí projektu a slouží jako bezpečnostní pojistka systému. V případě poruchy na teplovodu je možnost vygenerované teplo akumulovat do soli. Další užitečnou funkci může tento koncept splňovat pro vyhlazování tepelných špiček v denním diagramu spotřeby tepla. Uprostřed noci nabijeme zásobník a můžeme ho následně použít ráno pro vyhlazení špičky. Tyto dusičnanové soli jsou již dnes běžně používány jako hnojivo. Prvotní princip tohoto systému vzešel ze solárních elektráren.

1.1.2 DHR400 (CNNC, China)

CNNC uvedla na trh nízkoteplotní topný reaktor bazénového typu. Demo projekt pracuje s tepelným výkonem 400 MWt. Je primárně určen pro zásobování teplem severní města v Číně. Projekt byl spuštěn v listopadu 2017 v Pekingu. Po více jak půlročním testování měla CNNC podobu pilotního projektu. (3)

V srdci reaktoru DHR400 se nachází 69 palivových souborů. Palivem je UO_2 (oxid uranický) s vyhořívajícím absorbátorem Gd (Gadolinium). Systém pracuje při nízkých

teplotách a atmosférickém tlaku. Součástí reaktoru jsou tři vnitřní bazény, kde se zadržuje 5000 t vody. Toto množství může být využito v případě abnormálních stavů (například zemětřesení), aby nedošlo k vypaření vody. Velká zásoba vody zvyšuje odolnost vůči systémovým přechodovým jevům. Extrémně nízká možnost roztavení aktivní zóny minimalizuje pravděpodobnost úniku velkého množství radioaktivity. Díky těmto extrémním opatřením se DHR400 může instalovat v bezprostřední blízkosti cílové oblasti dodávky tepla.

Primární úkolem systému je využití tepla, o tento aspekt se stará 8 dekových výměníků. Mají za úkol dostat teplo do sekundárního okruhu. Jedná se o výměníky beze změny fáze, což znamená, že nedochází ke změně skupenství (výměníky voda-voda).

V roce 2019 dostalo CNNC stavební povolení a v roce 2024 se očekává přechod na komerční provoz. Ve svém prohlášení uvádějí možnou životnost reaktoru až 60 let.

Výzkum a design SMR v Číně roste hlavně z důvodu problematického znečišťování ovzduší, hlavně v zimních měsících. (1)



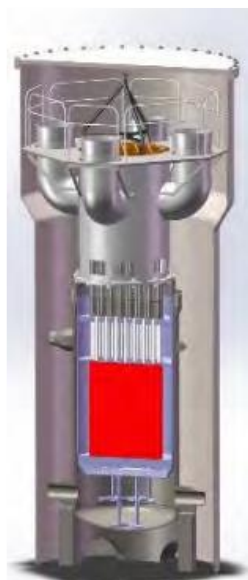
Obrázek 3 - DHR400 (45)

1.1.3 HAPPY200(SPIC, China)

State Power Investment Corporation Limited (SPIC) je jednou z pěti hlavních společností vyrábějící elektřinu v Číně. Jedná se o velmi podobný reaktor jako DHR400, přičemž tento reaktor pracuje pouze s polovičním výkonem 200 MWt. Systém je navržen pro umístění do vnitrozemí v blízkosti zásobování teplem (v našem případě u krajského města). V roce 2016 byl dokončen návrh konceptu, v letošním roce 2022 se očekává zahájení výstavby prvního prototypu přímo v Číně. V roce 2024 se předpokládá uvedení do provozu a následný komerční provoz. (4)

Reaktor HAPPY200 se skládá z 37 palivových souborů, kde každý soubor měří 2,1 m. Komponenty jsou velmi podobné jako u DHR400, nalezneme zde deskové výměníky.

Předpokládaná doba provozu je 4-8 měsíců v roce, přičemž provozní personál čítá 80 lidí. Existuje také možnost využití vyráběné tepelné energie pro chlazení domů v létě. Systém podobně jako DHR400 vyžaduje vnější napájení. (1)



Obrázek 4 - HAPPY200 (1)

1.1.4 RUTA-70 (NIKIET, Rusko)

Ruský koncepční design bazénového reaktoru o jmenovitém výkonu 70 MWt. Je navržen pro dálkové vytápění v odlehlých oblastech. Největší doménou tohoto projektu je jednoduchost konstrukce a vysoká bezpečnost.

Koncept RUTA pro dálkové vytápění začal v roce 1990. Dále v roce 2003 NIKIET uvedla technickoekonomické posudky pro regionální využití RUTA pro zlepšení dálkového vytápění v Rusku. Avšak až do dnes je koncept bez výhledu ke komerčnímu provozu.

Reaktorové jádro se skládá z 91 palivových souborů. Zásadní změnou oproti českému prototypu (TEPLATOR) je nutnost přepracování paliva z komerčních reaktorů. Zvláštností reaktoru je palivo s inertní maticí (IMP, inert matrix fuel), tato matice má stejnou úlohu jako ^{238}U v klasickém reaktoru. V rámci heterogenních IMP rozlišujeme uspořádání keramika v keramice (cercer) nebo zde použitá keramika v kovu (cermet). Toto cermetové palivo není celistvé jako peletky, ale je ve formě malých kuliček. (5)

Simulace pracuje s možností přenosu tepla z aktivní zóny přirozenou cirkulací až 30 % výkonu. Nejmenším personálním obsazení provozní směny jsou 4 osoby, avšak celkový počet zaměstnanců včetně běžných inženýrů techniků a administrativních pracovníků počítá až se 40 osobami.

Celý projekt je prozatím pouze na bázi simulace a není dokončen jediný prototyp. (1)

1.2 Přehled SMR – Kogenerace

Ve většině případů vznikají elektrická a tepelná energie odděleně. Princip kogenerace využívá přebytečné teplo, které je při výrobě elektrické energie vypouštěné do ovzduší. Díky tomuto principu můžeme vyrábět elektrickou a tepelnou energii v jednom provozu, což vede k razantnímu zvýšení účinnosti elektrárny. Elektrická energie se poměrně lehce dá distribuovat po elektrickém vedení do větší vzdálenosti, avšak tepelnou energii se snažíme využít v lokálních oblastech okolo výroby. Díky SMR s využitím kogenerace máme možnost naplnit poptávku jak po elektrické, tak tepelné energii.

1.2.1 Akademik Lomonosov (KLT-40 S, Rusko)

Společnost zabývající se jaderným inženýrstvím OKBM Afrikantov sestrojila a uvedla do provozu plovoucí jadernou elektrárnu s výkonem 35 MWe. Reaktor je nyní v plném komerčním provozu v Peveku. KLT-40 S vyčnívá svou kogenerační schopností dodávat elektřinu a teplo do velmi odlehlých oblastí. Díky uložení reaktoru na lodi nemusí být provoz centralizován pouze na jednu lokalitu během svého provozu. Není tedy potřeba budovat vedení pro přenos elektřiny a případnou infrastrukturu. (6)

Plavidlo Akademik Lomonosov nemá svůj vlastní pohon a musí být doprovázen remorkéry. Na palubě najdeme dva tlakovodní reaktory KLT-40 S každý s výkonem



Obrázek 5 - Akademik Lomonosov (6)

35 MWe a 150 MWt. Jedna z velkých výhod je dlouhodobý nezávislý provoz. KLT-40 S vyžaduje výměnu paliva jednou za 2-3 roky provozu.

Akademik Lomonosov čelí velké kritice kvůli vysoké pořizovací ceně a možné havárii. Projekt měl totiž obrovské náklady na výstavbu a není cenově konkurenceschopný. Odhadovaná cena projektu byla 2,5 miliardy korun, avšak díky prodlevám a schvalovacím procesům cena přerostla hranici 10 miliard korun. Další výše zmiňovanou kritikou je bezpečnost dodávky jaderné energie na plovoucím zařízení. Ruští inženýři se ale údajně poučili z historických jaderných havárií a plavidlo je podle nich odolné podobně tsunami jako bylo příčinou tragédie ve Fukušimě. (7) (8)

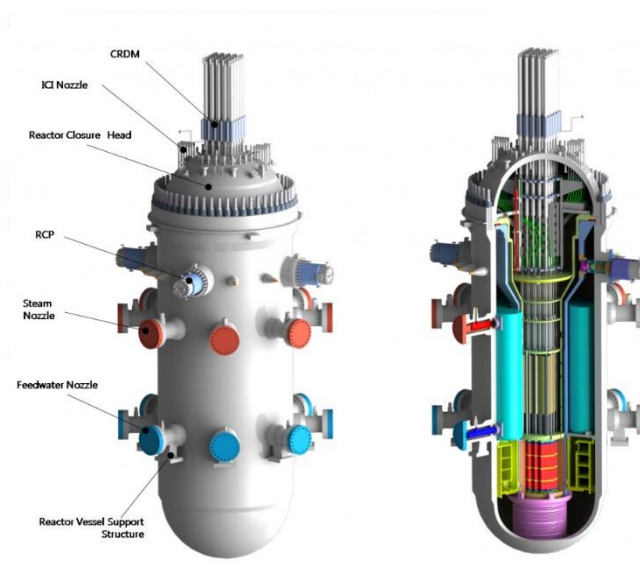
1.2.2 SMART (KAERI, Korea, Saudská Arábie)

SMART je víceúčelový reaktor pro výrobu elektřiny a tepla. Jaderný reaktor pracuje s 107 MWe a 365 MWt. Tento reaktor má integrované parogenerátory a je tvořen pokročilými bezpečnostními prvky. Projekt pracuje s možností provozu až 60 let a tříletým cyklem doplňování paliva. (1)

V roce 2015 došlo k dohodě mezi Koreou a Královstvím Saudské Arábie pro nasazení SMART v zemi Perského zálivu. Spolupráce těchto dvou zemí je výsledkem snahy, o co největší bezpečnost a součinnost. Díky tomu by měla být jednodušší finální jednání.

Saudská Arábie se snažila vybudovat projekty s jadernými palivy, avšak díky nižší ceně ropy se tento projekt dost prodlužuje. USA také po Saudské Arábii chce, aby s nimi uzavřela smlouvu o jaderných zbraních, k čemuž také zatím nedošlo. (9)

V roce 2020 byl schválen design SMART100.



Obrázek 6 - SMART100 (9)

1.2.3 BWRX-300 (USA and Hitachi-GE Nuclear Energy, Japonsko)

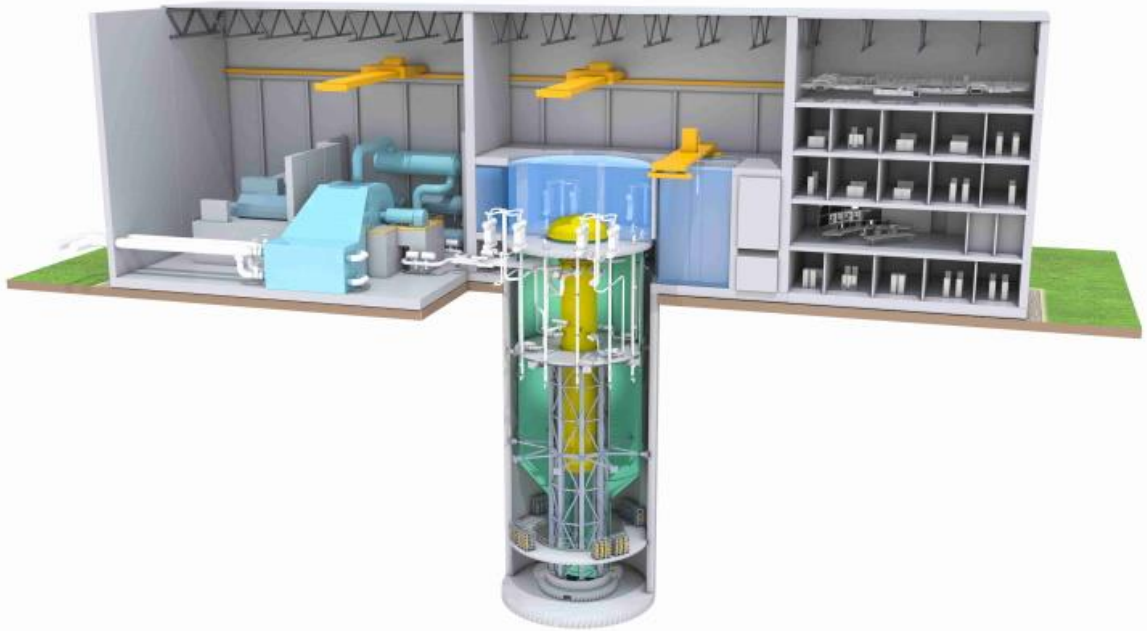
BWRX-300 je vodou chlazený SMR s přirozenou cirkulací, který má možnost kogenerační výroby energie. Jedná se o 10. generaci varného vodního reaktoru. Systém pracuje s výkonem 300 MWe a 870 MWt.

Podle vývojářů BWRX-300 bude nejbezpečnější a nejrychleji dostupný na trhu. Systém počítá se 7denním pasivním pohotovostním chlazením. Projekt pracuje s přirozenou cirkulací a má pasivní izolační kondenzátorové systémy.

Byl navržen tak, aby svými konstrukčními a provozními náklady byl výhodnější než jiné jaderné zdroje. V letošním roce by mělo dojít k zhotovení všech stavebních povolení, následně v 2024 k začátku výstavby a finální komerční provoz prvního bloku se plánuje na rok 2027.

GE se pokouší být konkurencí svými náklady pro plyné elektrárny, čímž ukazuje výhled na snížení kapitálových nákladů až o 60 % na MW.

Jako u většiny západních konceptů SMR se prvně licencuje v Kanadě a následně je možnost rozšíření do dalších lokalit. První tímto schváleným místem v Kanadě se stal Darlington. (10)



Obrázek 7 - BWRX-300 (1)

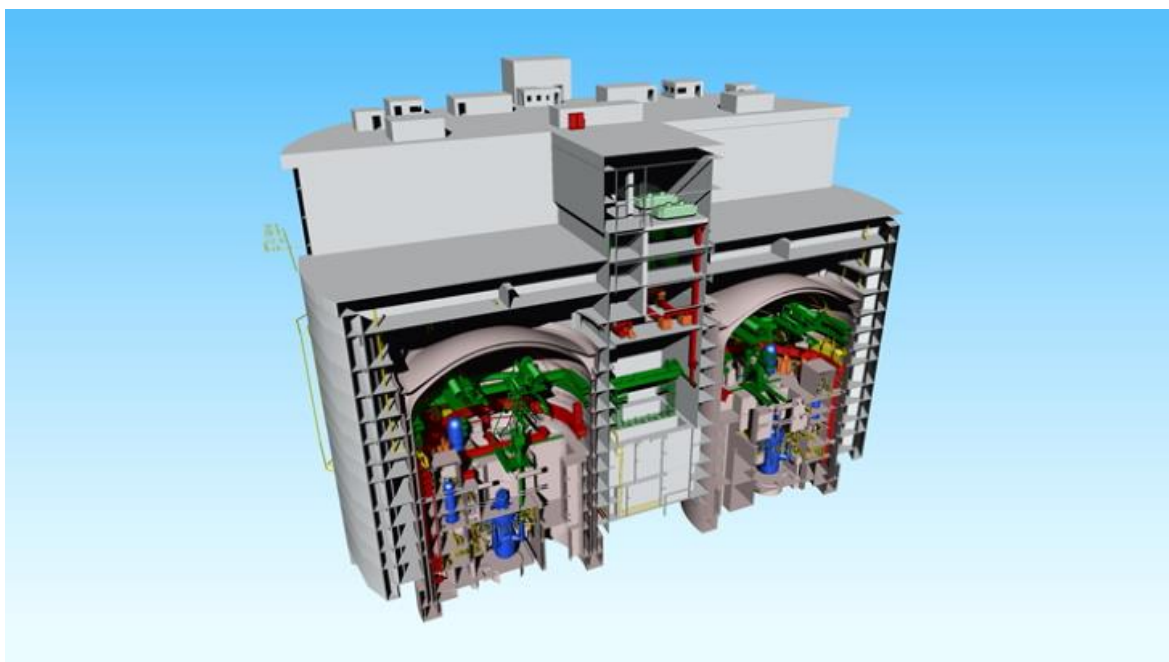
1.2.4 ACP100 (CNNC, China)

Reaktor vyvinutý China National Nuclear Corporation bude dalším v pořadí s výše uvedeným DHR400, avšak zde se jedná o tlakovodní reaktor s možností kombinované výroby elektřiny a tepla. Projekt pracuje s výkonem 385 MWt a 125 MWe. (1)

ACP100 je založen na stávající technologii PWR s bezpečnostními pasivními systémy. Systém pracuje s 57 palivovými soubory dlouhými 2,15 m. Potřebné obohacení ^{235}U je 1,9-4,95 %. Reaktor pracuje ve 24měsíčním cyklu pro výměnu paliva. Zajímavostí tohoto projektu je fakt, že při výstavbě se předpokládá uložení reaktoru pod zem. (11)

Pro projekt bylo zvoleno prvotní místo v Changjiangu, podle čínského ministerstva pro ekologii a životní prostředí by tento projekt měl být dostaven v roce 2026. Podle CNNC bude schopen reaktor dodávat elektrickou energii pro 526 000 domácností.

CNNC nyní vede jednání o další výstavbě 2 až 6 dalších reaktorů ACP100 na čínském území. (12)



Obrázek 8 - ACP100 (12)

1.3 Porovnávající tabulky

Tabulka 1 - Porovnání reaktorů

Název	MWt	MWe	Sídlo vývoje	Stav
TEPLATOR	150	-	Česká republika	Prototyp
DHR400	400	-	Čína	2024 do provozu
HAPPY200	200	-	Čína	2024 do provozu
RUTA-70	70	-	Rusko	Simulace
KLT-40 S	150	30	Rusko	Komerční provoz
SMART	365	107	Korea/SA	Schválen design
BWRX-300	870	300	Japonsko	2027 do provozu
ACP100	385	125	Čína	2026 do provozu

Tabulka 2 - Technické parametry

Název	Palivo (obohacení)	Moderátor /chladičí kapalina	Vstupní teplota (°C)	Výstupní teplota (°C)
TEPLATOR	VVER 440 (použité/čerstvé 1,1 %)	Těžká voda	45	98
DHR400	UO ₂ (<5 %)	Lehká voda	68	98
HAPPY200	UO ₂ (2,76-4,45 %)	Lehká voda	80	120
RUTA-70	Cermet (<3 %)	Lehká voda	75	102
KLT-40 S	UO ₂ (18,6 %)	Lehká voda	280	316
SMART	UO ₂ (<5 %)	Lehká voda	296	322
BWRX-300	UO ₂ (3,4-4,95 %)	Lehká voda	270	287
ACP100	UO ₂ (<4,95 %)	Lehká voda	286,5	319,5

2 Historické reaktory

Během posledních let se vede velmi seriózní debata o využívání jaderných zdrojů k výrobě tepla pro dálkové vytápění. Původ této myšlenky vede na začátek 70. let, kdy vznikaly první koncepty reaktorových technologií. Důvodem řešení této problematiky byla ropná krize, která vyvolala obavy z dostupnosti levných paliv. Zejména v Rusku se začala vyvíjet kogenerace tepla s elektrinou pomocí jaderných zdrojů.

Teploty relevantní pro dálkové vytápění lze dosáhnout i pod tlakem 1 MPa. K udržení tohoto pracovního tlaku se v této době odhadovala tloušťka nádoby z nerezové oceli 10–11 mm dimenzována na maximální přetlak až 1,6 MPa. Což je výrazné snížení výrobních nákladů a rozšíření průmyslových nabídek na tyto nádoby. Díky nižšímu množství produkované energie, jsou reaktory určené pro výrobu tepla až 10x menší než typické velké energetické reaktory. Tyto faktory vedou k větší inherentní bezpečnosti a menšímu množství potřebných bezpečnostních systémů oproti velkým energetickým reaktorům, čímž se také snižují celkové stavební náklady.

Nedostupnost levných topných zdrojů během ropné krize v roce 1973 vyvolala v mnoha zemích přehodnocení národní energetické strategie. Jednalo se zejména o Skandinávské země. Tento vývoj bohužel zastavili jaderné havárie ve světě. Jako první havárie elektrárny Three Mile Island, kde došlo k částečnému roztavení druhého jaderného reaktoru a následně v roce 1986 havárie v Černobylu. Tyto dvě havárie vedly k rapidnímu zpřísnění veškerých provozů s jaderným palivem. Součástí bylo také to, že v této době cena uhlí stále klesala a nebyl důvod budovat dále alternativy k jiným topným palivům.

2.1 Ågesta

Těžkovodní reaktor uvedený do komerčního provozu v roce 1964 ve Stockholmu byl první komerční jaderný reaktor ve Švédsku. Reaktor byl provozován po dobu 10 let, kdy produkoval 10–12 MWe a 55–68 MWt pro dálkové vytápění. Systém byl navržen pro kogeneraci a jeho provozní teplota byla nad 200 °C. Jaderná elektrárna měla možnost pracovat po celý rok, protože byla vybavena přímým odvodem přebytečného tepla do chladicí věže. V letních měsících, kdy poptávka po dálkovém vytápění klesla, byla využívána právě výše zmiňovaná chladicí věž. Ågesta byl první koncept vytápění pomocí jaderného paliva. Tento desetiletý provoz ukázal světu, že je technicky proveditelný a schopný. Bohužel ekonomický rozpočet tohoto projektu byl 4x překročen, takže nemohl vést konkurenční boj s ostatními topnými palivy. Ve Finsku vznikaly studie spojené

s vysokými náklady na vybudování jaderné elektrárny pro dálkové vytápění vzhledem k nízké ceně jaderného paliva v té době. (13)

Vlastník jaderné elektrárny Vattenfall musel 1. března 1969 řešit závažný incident, kdy díky chybné manipulaci s ventily došlo k velkému úniku chladicí vody. Tato voda se dostala do řízení nouzového chladicího systému. Došlo k odstavení reaktoru a po vysušení a opravení nedokonalosti s ventily se provoz znovu vrátil do plného zatížení. (14)



Obrázek 9 - Pohled na JE Ågesta (14)

2.2 Secure

Secure byl nízkotlaký a nízkoteplotní koncept vodního reaktoru vyvinut ve spolupráci Švédska s Finskem v letech 1976-1977. Secure nabídl alternativu pro využití paliva z velkých jaderných elektráren pro dálkové vytápění. Zároveň díky své velikosti měl být umístěn blíže obydlených městských částí. Pracoval měl s výkonem 200 MWt a při teplotě 95 °C.

Hlavním kritériem vývoje bylo umístění do městských částí, což vedlo ke spolehnutí se pouze na vlastní bezpečnostní prvky a pasivní chlazení. Fyzickou ochranou reaktoru a pomocí systému bylo umístění do skalní jeskyně v podzemí. Sekundární systémy byly umístěny na povrchu a celý projekt byl ovládán dálkově a systém nevyžadoval personál přímo na místě.

Cyklus paliva byl dvouletý, kdy se vyměnila čtvrtina paliva za čerstvé. Chladicí cirkulace byla realizována pomocí čerpadel. Zajímavostí je, že řídicí systém neobsahoval tyče, ale malé kuličky z borové oceli, které se sypaly do trubek moderátoru.

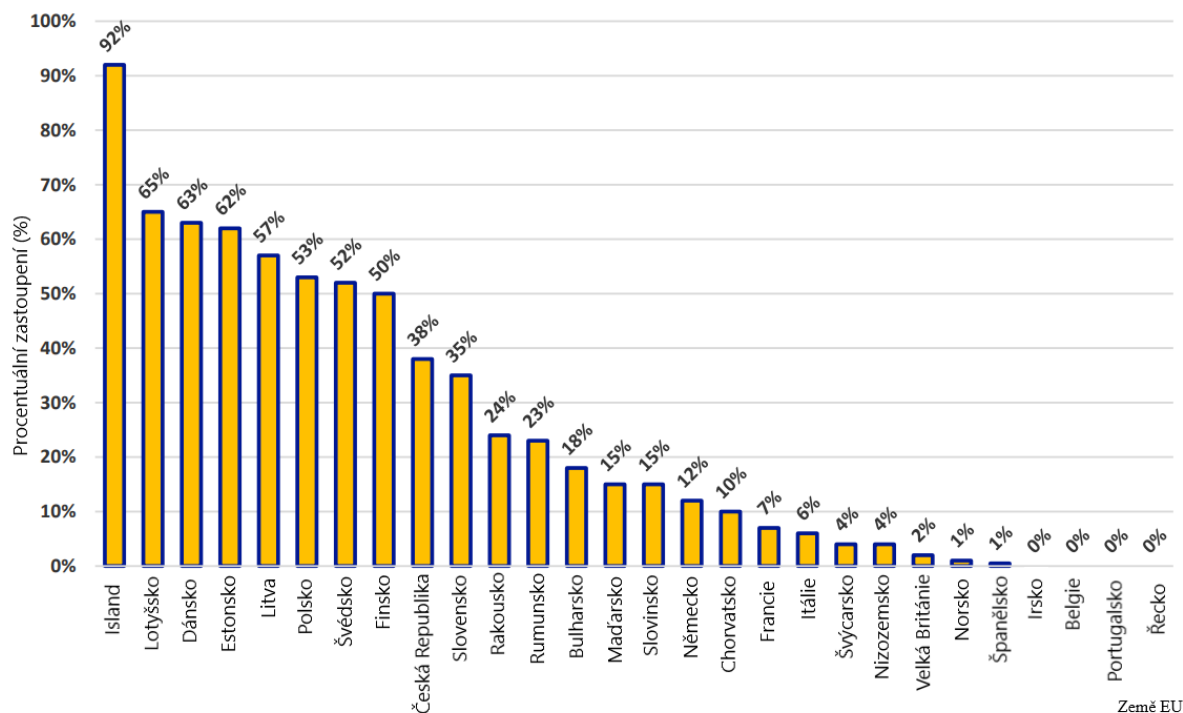
Reaktor měl dva primární chladicí okruhy poháněné čerpadlem a další pasivní smyčku, která cirkulovala přirozenou konvekcí. Přirozená cirkulace měla dostatečnou kapacitu pro zastoupení chlazení za výpadek čerpadel. Přičemž nadbytečné teplo bylo vyvedeno do chladicí věže. Další výhodou bylo chlazení ze skály, kde měl být reaktor uložen.

Některé prvky jsou použity i u dnešních moderních reaktorů, avšak Secure nebyl nikdy zrealizován. (13)

3 Teplárenská soustava ČR

3.1 Aktuální stav

V České republice máme velmi rozvinuté teplárenské rozvody pro dálkové vytápění, více než 1,5 milionu domácností čerpá teplo přímo z teplárenské sítě.

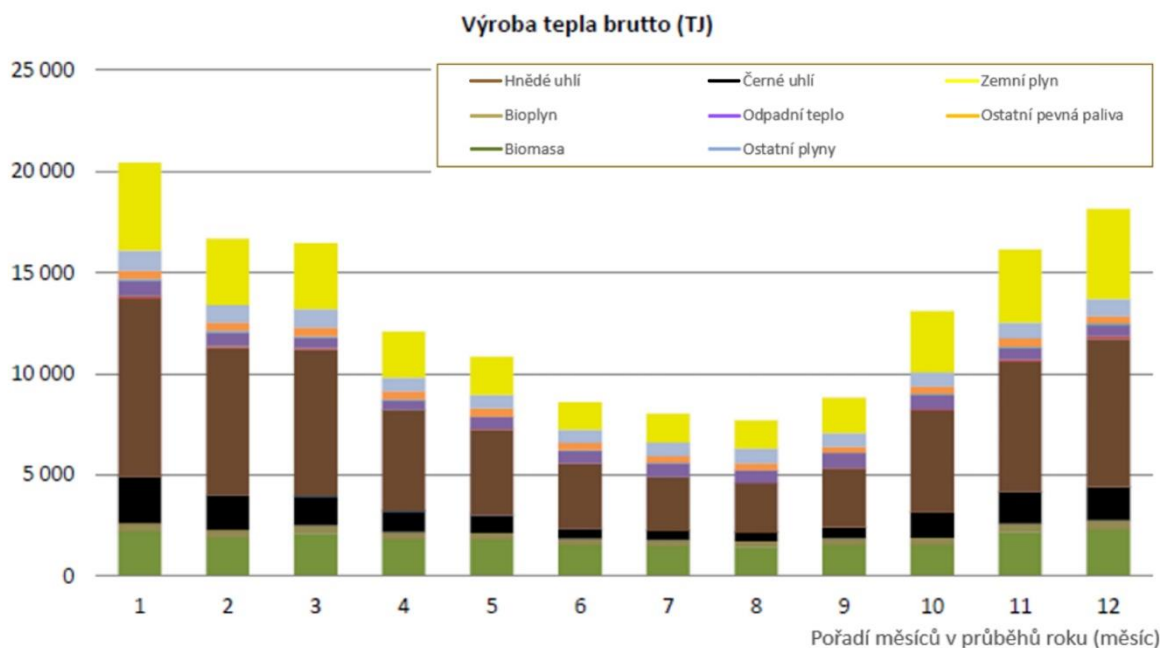


Obrázek 10 - Procentuální zastoupení dálkového vytápění v EU (15)

Dle Obrázku 10 je zřejmé, že tak velký podíl obyvatelstva zásobovaného teplem z dálkového vytápění je spíše běžný u severních zemí, které zažívají chladnější zimní období než ČR. Legislativa uvádí maximální délku topné sezóny 9 měsíců, podle grafu výroby tepla (obr. 11) se jedná především o 6 měsíců hlavní topné sezóny. (15)

Podle Energetického regulačního úřadu se v roce 2020 hnědé uhlí podílelo na výrobě tepla až 40 % celkového výkonu. Druhým nejrozsáhlejším palivem v ČR byl v roce 2020 zemní plyn, následně biomasa se 14 %. Mezi menší zdroje tepla řadíme černé uhlí a ostatní plyny. Celková výroba tepla byla necelých 157 000 TJ.

Spotřeba tepla dlouhodobě klesá kvůli zmírnění teplot v zimních měsících. Přispívá také renovace objektů a celková snaha o energetickou úspornost.



Obrázek 11 - Roční výroba tepla (16)

Největší problém aktuálního stavu teplárenství v ČR je snaha Evropské unie o omezení emisních zdrojů. Samozřejmě, že s vidinou omezené právní i technologické životnosti těchto tepláren nedochází k dostatečné obnově systémů a spíše se majitelé zařízení pokouší tuto situaci jen přežít. Díky extrémním cenám emisních povolenek se celý teplárenský systém nachází na hraně ekonomické udržitelnosti a žádá o pomoc. Z uvedených důvodů také nezbyvají teplárnám žádné prostředky pro inovaci, popřípadě růst.

Využití jaderných zdrojů pro výrobu tepla v ČR zůstává prozatím minimální, jedná se pouze o vytápění Týna nad Vltavou z JE Temelín (jaderným palivem bylo dodáno 156,6 TJ v Jihočeském kraji). Díky pohledu Evropské unie na jaderné zdroje dává smysl vybudovat teplovody z našich dvou jaderných elektráren do blízkých velkých měst. Horkovod pro České Budějovice z JE Temelín má už 2leté zpoždění. Původní výherce tendru postavil pouze 15 km horkovodu a vedl loňský rok právní spory s ČEZ. Nyní má ČEZ nového výherce výběrového řízení, který snad tento projekt dokončí. Temelín by se měl podílet 30 % spotřeby tepla v Českých Budějovicích. (16)

Další variantou a debatou aktuální situace se stává teplovod z Dukovan do Brna. Tento zhruba 40 km dlouhý přivaděč se nachází v pozici vyjednávání všech stran. Magistrát města Brna zatím nechce zahajovat plánování, dokud ČEZ se státem nepodepíše zajišťovací smlouvu o výstavbě nových jaderných bloků. Samozřejmě, že jen s dalšími novými bloky by teplovod dával smysl. (17)

3.2 Teplárny, výtopny, elektrárny ČR

Teplárna je průmyslový objekt, který funguje na principu kogenerace, tedy vyrábí jak elektřinu, tak teplo pro technologické účely. Pomocí parních kotlů se produkuje vodní pára a ta je následně vedena do parní turbíny, která pohání elektrický generátor. Vyrobená elektrická energie se částečně spotřebuje pro vlastní spotřebu a je dodávána do místní sítě. V podstatě každé krajské město v ČR má teplárnu, větší česká města mají pak dokonce i více tepláren na svém území.

Výtopna je zařízení, která se stará o zabezpečení vytápění objektů v blízkém okolí tohoto zařízení, bez přidružené výroby elektrické energie. Jedná se o samostatně umístění zdroj tepla pro určitou obytnou část, například obec nebo průmyslový objekt. (18)

Elektrárny mají primární cíl vyrobit elektrickou energii. Výroba elektrické energie je svázána nejdříve s mechanickou energií, kterou je následně poháněn elektrický generátor. Mezi největší tepelné elektrárny v ČR řadíme Pruněrov, zároveň dodává teplo do Chomutova, Jirkova a Klášterce nad Ohří. Největším dodavatelem v Karlovarském kraji je Sokolovská uhelná, která provozuje tepelnou elektrárnu Vřesová. Zhruba 1500 TJ tepelné energie dodá převážně do domácností a firem v Karlových Varech, Chodově, Nejdku a Novém Sedle. (19)



Obrázek 12 - Elektrárna Vřesová (46)

3.3 Aktuální ekonomická situace cen paliv

Aktuální ekonomická stránka zemního plynu se ukazuje jako velmi problematická. Za poslední dva roky cena šplhá až na 2-3x úroveň z roku 2020. Díky této cenové krizi se provoz

plynových elektráren značně nevyplácí a s postupným odstavováním uhelných elektráren se cena tepla/elektriny také zvyšuje. Na rozdíl od ceny uranu, který dlouhodobě, už skoro 10 let, klesá. Samozřejmě u jaderných zdrojů musíme uvažovat vyšší ekonomické stavební náklady. Problémem zapojení většího množství jaderných zdrojů je dlouhá výstavba a obrovská počáteční investice. Plyné zdroje jsou tedy zatím záložním, ale také drahým palivem.



Obrázek 13 - Cena zemního plynu (50)



Obrázek 14 - Vývoj ceny emisní povolenky (51)

Emisní povolenky jsou dnes nedílnou součástí ekonomiky provozu všech výroben s tepelným výkonem nad 20 MW, který znečišťuje životní prostředí. Povolenky vznikly

proto, aby zamezili hrozbě globálnímu oteplování a změny klimatu. Jedna povolenka odpovídá jedné tuně oxidu uhličitého, případně ekvivalentnímu vlivu dalších znečišťujících látek (oxidu dusného nebo perfluorovaných uhlovodíků) vypuštěných do ovzduší. Díky tomu, že uhelná výroba, i přes svou snahu o ekologizaci, je zdrojem těchto plynů, tak musí nakupovat tyto povolenky. Oproti bezemisním zdrojům, které za emisní povolenky platit nemusí. Emisní povolenky jsou také zajímavým investičním nástrojem mnoha spekulantů a velkých fondů. Skutečnost, že emisní povolenky jsou obchodovatelné vedlo k rapidnímu nárůstu jejich ceny. Cena za jednu tunu odpadních plynů se nyní pohybuje na úrovni 80 €. Například v roce 2019 se cena pohybovala okolo 20 €. (20)

3.4 Ekologizace a dekarbonizace

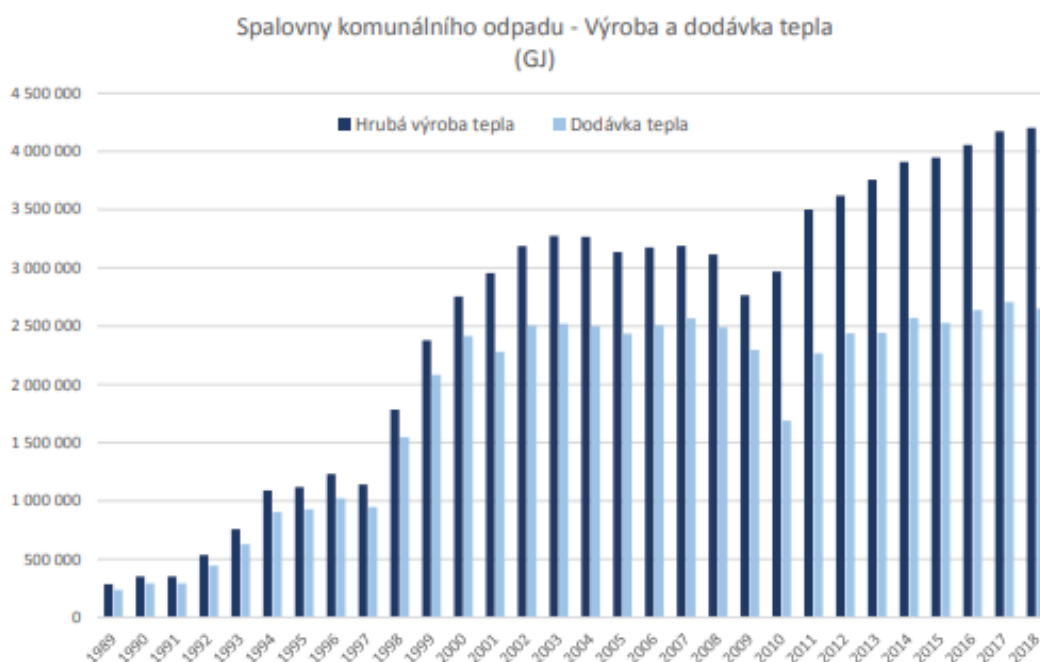
Teplárenství v ČR se potýká s rychlými změnami podmínek pro dekarbonizaci a možnosti eliminace uhlíkových plynů. Česká republika zatím nemá jasnou a speciální strategii pro transformaci výroby tepla. Majitelé uhelných tepláren zatím nemají jinou možnost než přechod na přechodnou fázi jiného paliva. Taxonomie Evropské unie dovoluje a zohledňuje, že přechod na uhlíkovou neutralitu není přímočarý. Také Energetický regulační úřad musí zohlednit možný vývoj obnovitelných zdrojů a nových technologií, například možností akumulace tepla, například do dusičnanových solí.

Možnost přechodu z uhlí na zemní plyn využila například teplárna Otrokovice, kde proběhla výměna jednoho ze tří kotlů na plynový zdroj a systém už je v provozu. Další změnou prošla teplárna v Příbrami, kde nový majitel nechal vybudovat nový systém na dřevní štěpku. Teplárna na dřevní štěpku byla zrekonstruována velmi rychle a slibuje si snížení ceny dodávky tepla o řádově desítky procent. (21) (22)

Dalším důležitým aspektem zlepšení situace je snížení ztrát na vedení pro dálkové vytápění, díky nimž bude snížena celková bilance nutnosti výroby. Členům Teplárenského sdružení ČR se podařilo zvýšit tempo náhrady parních rozvodů tepla. Za posledních 5 let došlo k výměně 100 km parních rozvodů. Vylepšením jsou také modernizace ze systému pára/voda na systém voda/voda a renovace předávacích stanic. Tyto nové rozvody a předávací stanice vedou k snížení ztrát, kdy spotřeba paliva může klesnout až o osminu. (23)

Dalším aspektem a nedílnou součástí je spalování odpadu. Dochází k výstavbě nových lokálních spaloven, nyní v ČR pracují v provozu 4 spalovny (podílí se na výrobě tepla 5 %). Posledním realizovaným projektem se stala spalovna v Chotíkově u Plzně. Společnost Plzeňská teplárenská vybuodovala spalovnu s roštovým topeništěm, která nabízí kogenerační výrobu elektřiny a tepla. Pracuje s elektrickým výkonem 10,5 MW a tepelným výkonem

31,7 MW. Celková kapacita je 95 tisíc tun komunálního odpadu za rok. Na grafu vidíme, že trend spalování komunálního odpadu na výrobě a dodávce tepla výrazně roste. (24)



Obrázek 13 - Trend spaloven kom. odpadu (24)

3.5 Možnosti skladování elektrické a tepelné energie

Vývoj akumulace energie je velmi zásadní pro rozvoj energetického mixu. Postupem času se objevují technologie a plány, jakým způsobem by to do budoucna mohlo fungovat. Vývoj v této oblasti zajišťuje akumulaci energie a využití po určité době. Díky této skutečnosti můžeme překonat časové rozdíly mezi spotřebou a výrobou.

V případě tepelné energie se jedná o krátkodobé uskladnění, kdy naakumulujeme tepelnou energii (například v nočních hodinách) a následně ji využijeme v potřebných ranních špičkách. Realizace takové akumulace má různé směry:

- Podzemní uskladnění tepelné energie, kdy čerpadlem systém ukládá ohřátou vodu do podzemního zásobníku. Největší možnost akumulace má společnost Teplárny Brno v provozu Červený mlýn. Nacházejí se zde dvě velké akumulární nádrže s objemem 9 900 m³, které dokážou nashromáždit tepelnou energii 345 MWh (denní spotřeba pro zhruba 17 000 domácností).
- Akumulace do roztavených solí, které při normálních teplotách a atmosférickém tlaku mají pevné skupenství. Po zahřátí se roztavená sůl zpětně využívá k produkci vodní páry, nebo je uskladněna pro pozdější využití v kapalném stavu.

- Další možností je akumulace do materiálu se změnou fáze, což představuje uskladnění latentního tepla a na základě změn skupenství systém buďto přijímá nebo odevzdává energii. (25)

3.6 Výhled do budoucna

Otázkou zůstává, jak tyto přechodné systémy budou moci být využívány do budoucna. Samozřejmě dojde k vývoji obnovitelných zdrojů a akumulace tepla. Například zmiňovaný projekt TEPLATOR pracuje s inovací akumulace tepla do dusičnanových solí, které jsou v ČR dostupné.

Jedinou momentální možností u uhelných tepláren nad 300 MWt zůstává možnost rekonstrukce na zemní plyn, popřípadě kombinace spolu spalování biomasy. U obou paliv se dostáváme k problému dostupnosti a skladování. V ČR jsme nuceni plyn nakupovat a v dnešní době kolísání cen se můžeme dostat znovu k problému, kdy majitelé tepláren budou na hranici bankrotu.

Alternativou k plyným elektrárnám můžou do budoucna být SMR pro dálkové vytápění. Problémem zatím zůstává, že není dokončen skoro žádný prototyp a nelze se spoléhat v oblasti teplárenství pouze na zatím ve většině případů nelicencované reaktory. Výhodou SMR TEPLATOR může být využití použitého jaderného paliva z VVER 440. Střední Evropa má zásobu více než 40 000 ks, přičemž jeden TEPLATOR využije na svůj roční provoz pouze 55 těchto palivových souborů. (26)

Finálním výhledem pro transformaci teplárenství bude diverzifikace a flexibilita paliva k optimalizaci provozu teplárny a snížení nákladů.

Další příležitost vidím v maximální využitelnosti geotermálních elektráren. V ČR máme zkušenosti s vytápěním městských částí v Ústí nad Labem a v Děčíně. Momentálně procentuální zastoupení v dodávce tepla pomocí geotermální energie je minimální. Výzkumná infrastruktura Ringen reaguje na nevyužití tohoto zdroje k výrobě elektřiny. Tato infrastruktura se pokouší o zvýšení efektivity a bezpečnosti získávání energie tímto způsobem. (27) (28)

3.7 Současná výstavba – aktuální stav největších tepláren v ČR

Většina velkých tepláren a elektráren v ČR momentálně vyvíjí snahu modernizovat a dekarbonizovat výrobu elektrické energie a s tím spojenou kogeneraci.

Současný plán skupiny ČEZ stojí na zachování uhelných elektráren, které jsou přímo napojené na uhelné lomy. Ostatní uhelné zdroje jsou v plánu odstavit do roku 2030, popřípadě změnit primární palivo.

Společnost ČEZ se rozhodla odstavit elektrárnu Mělník III a další dva kotle postupně změnit na využití plynu a spalování odpadu. Další lokalitou, kde se ČEZ rozhoduje o možné přestavbě na plyný zdroj jsou Dětmárovice a Počerady. Zda, a hlavně kdy dojde k přeměně se skupina ČEZ rozhodne podle vývoje situace ohledně ústupu uhlí z energetického mixu. Průměrná doba přestavby uhelného zdroje není tak časově náročná, proto je zde prostor čekat na vývoj situace.

Dále ČEZ zvažuje výstavbu nové velké plynové elektrárny. Mezi užší výběr lokalit spadají Počerady, Tušimice, Pruněrov a středočeský Mělník. Pokud by dopadla volba na Tušimice, byla by zde možnost vybudovat největší zdroj (2x850 MWe). Hlavní výhodou možné lokality Počerady může být kratší plynová přípojka a fakt, že zde už jeden plynový zdroj stojí.

Nepovedená modernizace v tepelné elektrárně Chvaletice (820 MW) měla za následek, že už během rekonstrukce bylo jasné, že provoz nebude schopen splňovat požadavky a nároky na uhelný zdroj. Dopředu bylo jasné, že společnost Sev.en EC nedokáže ustát vlnu ekologizace, a přesto se rozhodla dokončit modernizaci. Nyní Chvaletice doufají, že dostanou výjimku pro provoz. (29)



Obrázek 14 - Elektrárna Chvaletice (47)

Počerady (1000 MW) vlastní také společnost Sev.en EC a mají zde podobný přístup k modernizaci jako u druhé elektrárny Chvaletice. (30)

Další velkou hnědouhelnou elektrárnou jsou Opatovice (363 MW), které taky žádají o výjimku pro odložení přesunu z uhlého na plynový zdroj. Dosud Opatovice čelí kritice, že dlouhodobě spalují uhlí z Německa, proto se vyvíjí tlak, aby Opatovice, co nejdříve přešli na zemní plyn. Součástí modernizace Opatovic je projektování plynové přípojky pro 2 nezmodernizované zdroje. Dalším krokem modernizace mohlo být spolu spalování odpadu, ale díky referendu k realizaci zatím nedošlo. (31)

Společnost Sokolovská uhelná a.s. zatím nevydala oficiální prohlášení o dalším vývoji na své teplárně Vřesová (220 MW).

Uhelná elektrárna Třebovice (174 MW) a její majitel Veolia se pokouší o odstup od uhlí do roku 2030. V první řadě by měla být do budoucna biomasa. Modernizací všech kotlů dokázala Veolia snížit produkci více než o 70 % oxidu dusíku a oxidu siřičitého do ovzduší. (32)

4 Definování vhodných lokalit pro jaderný zdroj

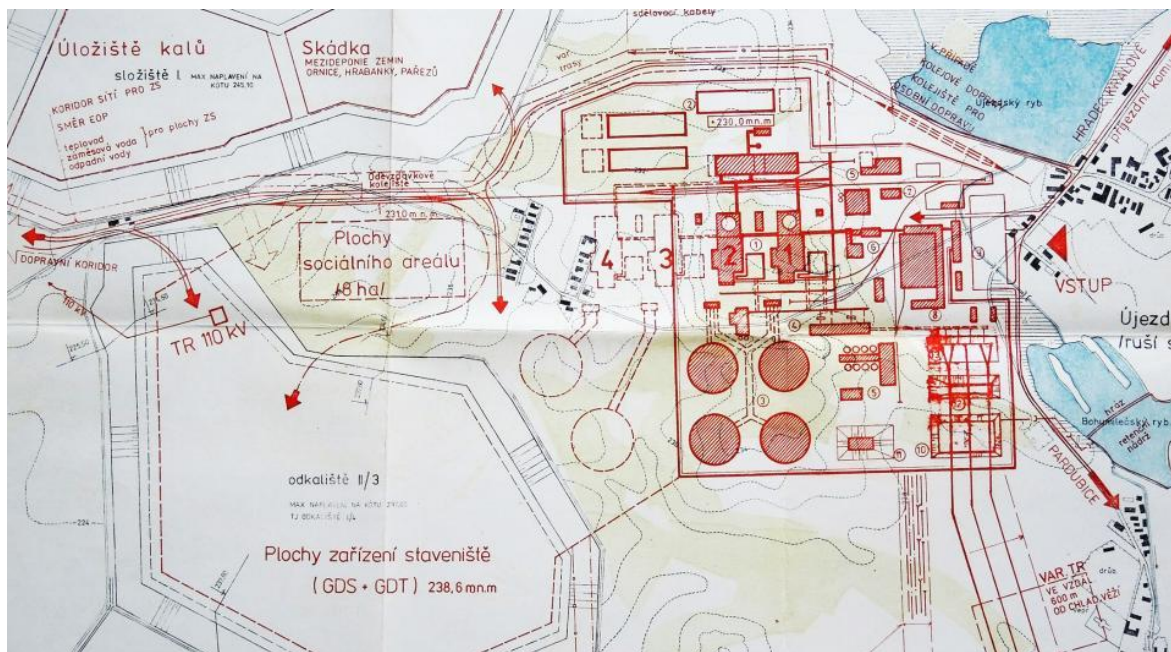
4.1 Historické lokality pro výstavbu nových JE

Výběr vhodné lokality pro jaderný zdroj je velmi komplexní záležitost. Požadavky pro výstavbu jaderného zdroje se velmi zpřísnily po havárii reaktoru v Černobylu v roce 1986. V době Československé socialistické republiky bylo vytvořeno několik studií pro definování lokalit jaderných zdrojů. Realizovány byly však pouze dvě lokality, dnešní velké jaderné elektrárny Temelín a Dukovany.

Třetí zvažovanou lokalitou pro jadernou elektrárnu byly Blahutovice, kde se neobjevuje seismická aktivita a je zde možnost dobrého chlazení (díky řece Luha a existenci velkých rybníků Dolní a Prostřední Polom). Pro Moravskoslezský kraj by to mohl být kvalitní impulz pro podporu průmyslu, díky postupnému konci těžby černého uhlí v oblasti. (33)

Mezi další navrhované oblasti se dostaly Opatovice nad Labem, které se nachází mezi městy Pardubice a Hradec Králové. Díky blízkosti dvou velkých krajských měst se dá uvažovat o možné dodávce tepla horkovody přímo do centra měst. Lokalita Opatovice nad Labem byla, právě po výše zmiňované jaderné havárii v Černobylu, smazána ze seznamu možných míst pro výstavbu nového jaderného reaktoru. Dalším důvodem odstranění Opatovic nad Labem bylo nutné odstranění tří okolních vesnic Bohumileč, Újezd a Zástava.

Tato událost měla za příčinu návrh další lokality na území obce Tetov. Znovu se nacházíme v Pardubickém kraji, nyní však zhruba 30-40 km od velkých krajských měst. (34)



Obrázek 15 - Plán JE Tetov (48)

Výstavba třetí jaderné elektrárny měla začít hned po dostavbě Temelína, avšak k vybudování dvou reaktorů VVER 1000 MW nikdy nedošlo.

Po roce 1989 však díky haváriím ve světě a vývoji energetické koncepce v ČR došlo k zastavení nových projektů na dobu neurčitou, pouze byla v této době dokončena a spuštěna rozestavěná elektrárna Temelín. Po roce 2006 byla odstraněna z energetické koncepce lokalita Tetov. (35)

Nyní energetická koncepce počítá pouze do roku 2040 a neuvažuje výstavbu jaderných zdrojů v nových lokalitách. Nejbližším cílem jaderné energetiky je dostavba bloků v lokalitách Dukovany a Temelín. Díky tomu, že zatím nejsou licencovány žádné SMR v ČR, tak není součástí energetické koncepce potřeba definovat finální lokality.

4.2 Hlavní požadavky na výstavbu nového jaderného zdroje

Definování nové lokality kromě zmiňovaných historických oblastí musí projít nespočet hodnocení, které překračují rozsah této práce, a proto se budu snažit vyzdvihnout pouze několik základních požadavků na budoucí lokalitu.

- Musí být provedeno rozsáhlé seismické měření. Nesmí dojít k ohrožení hodnoty intenzity maximálního výpočtového zemětřesení 8 ° MSK-64 na území vzniku nového jaderného zdroje.
- Nesmí se projevovat postvulkanické činnosti, do který zapadají výrony termálních, minerálních a mineralizovaných vod.
- Dalším kritériem je neexistence výskytu těžby surovin v užší blízkosti výstavby (staré důlní činnost jsou součástí).
- Samozřejmě díky rozsáhlé ploše jaderného zařízení musí být oblast vybavena dostatečným prostorem pro celý provoz jaderné elektrárny. Dále se v okolí nesmí objevovat zalesněná oblast z důvodu případného požáru, který by se mohl rozvinout až do provozu blízko JE.
- Součástí výstavby nového jaderného zdroje je potřeba brát v úvahu převoz nadměrných a těžkých komponent celého provozu a s tím spojenou dopravní kompatibilitu pro tyto účely převozu. (36)

Další kritéria nejsou spojeny přímo s jaderným zdrojem, ale jedná se spíše o ukazatele, které také mohou být rozhodující při výběru lokality.

- Pokud dojde k licencování nějakého SMR a jeho přechodu do komerčního provozu, bude záležet, jakým výkonem bude tento reaktor disponovat. Na základě schváleného výkonu se dále může zúžit výběr lokalit.
- Dalším důležitým kritériem musí být stávající stav v oblasti, zda je například uhelná elektrárna už po renovaci na plyný zdroj nebo ji tento proces teprve čeká, nebo dokonce nebude v lokalitě docházet k obnově dodávky tepelné energie pomocí dálkového hromadného vytápění.
- S postupným odklonem Evropské unie od uhelných zdrojů bude docházet v řadě našich regionů k velkému úpadku průmyslu, díky související končící těžbě. Vybudování SMR v dané oblasti, například v kombinaci s plyným zdrojem, může dost pomoci k obnově průmyslového rozvoje.

4.3 Potenciální lokality pro umístění SMR

Dalším pozitivní přísun by mohl nastat v definování lokality pro SMR díky menším nárokům na lokalitu. Výše zmiňované lokality byly víceméně zavrhnuty pro velké jaderné elektrárny o výkonech 1000 MW. Seznam konceptů SMR, ale počítá s mnohem menším výkonem. Například koncept SMART počítá jen se 107 MWe. Tyto menší možné nároky by mohli vézt k znovuotevření diskuse k historickým lokalitám jako je Tetov, či Blahutovice, případně nová lokalita Řež u Prahy.

4.3.1 Tetov/Opatovice nad Labem

Momentálně kogenerační uhelná elektrárna Opatovice nad Labem dodává teplo do domácností v Hradci Králové, Pardubicích a Chrudimi. Elektrárna disponuje výkonem 363 MWe a zhruba 700 MWt, avšak podle výroční zprávy elektrárny dodá zdroj průměrně okolo 3200 TJ tepla za rok. (37)

Další elektrárnou v okolí Tetova je stávající tepelná elektrárna Chvaletice spalující hnědé uhlí, která disponuje výkonem 820 MW. Zdroj také dodává tepelnou energii 200 TJ ročně do sousedních vesnic. Plánovaná výstavba horkovodu do Kolína byla zrušena, díky dodávce tepla v páře by byl přenos velmi neefektivní. Provoz uhelné elektrárny měl být v roce 2020 ukončen, avšak došlo k prodloužení možného provozu o dalších 10 let, zůstává otázkou, jakým způsobem bude tento zdroj nahrazen. (38)

Pokud do budoucna bude provoz těchto uhelných elektráren ohrožen dá se uvažovat nad SMR v kombinaci s plyným zdrojem.

4.3.2 Blahutovice

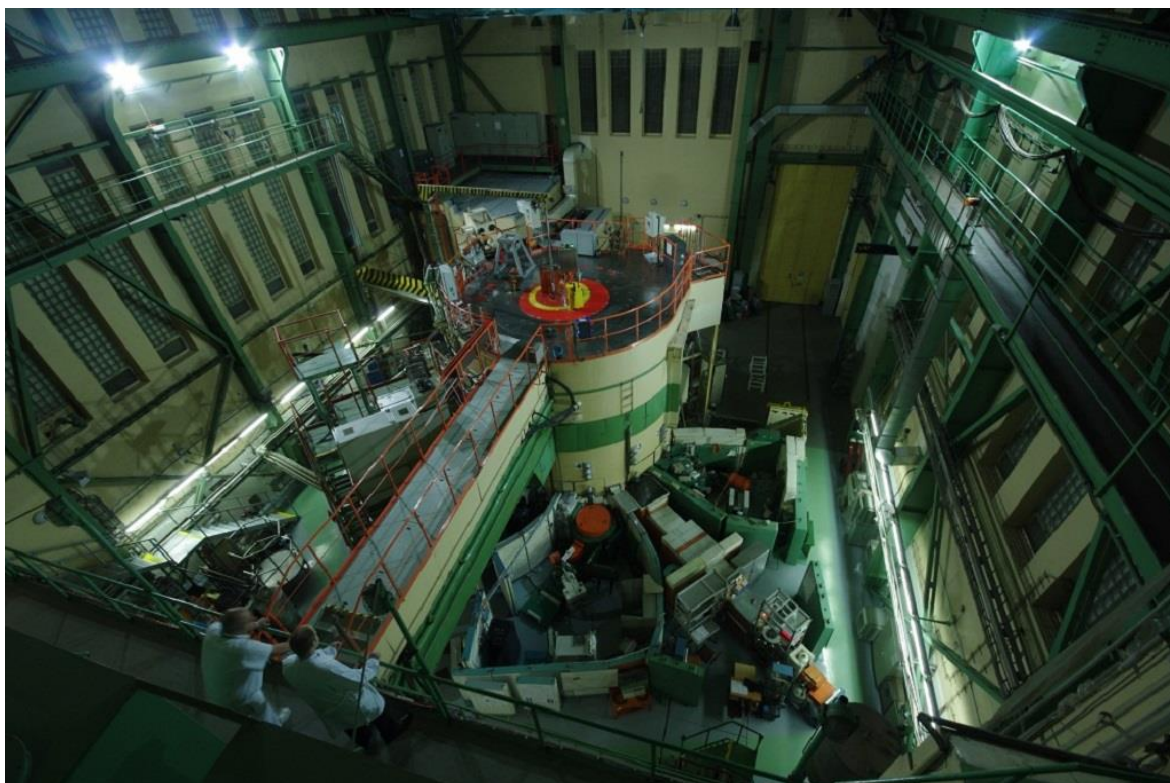
Obec Blahutovice se nachází v Moravskoslezském kraji, avšak je v blízkosti hranice s krajem Olomouckým a Zlínským. V okolí 20 km od lokality se nachází hned několik měst (Valašské Meziříčí, Nový Jičín, Odry), do kterých by se dala tepelná energie rozvést. Stávající stav v Novém Jičíně probíhá odebíráním tepelné energie z městských kotelen.

Problematickým faktorem pro výstavbu SMR právě v této oblasti může být Chráněná krajinná oblast Poodří, které se nachází 5 km východně od obce Blahutovice.

4.3.3 Řež

Pokud by se v budoucnu povedlo licencovat a uvést do provozu malé modulární reaktory ve světě, tak by první českou lokalitou mohl být Řež, kde se už nyní nachází výzkumné reaktory LR-0 a LVR-15. Řež by se mohl podílet na dodávce tepla do oblasti Prahy, návrh počítá s možností vybudování více jaderných reaktorů právě u řeky Vltavy.

(39)



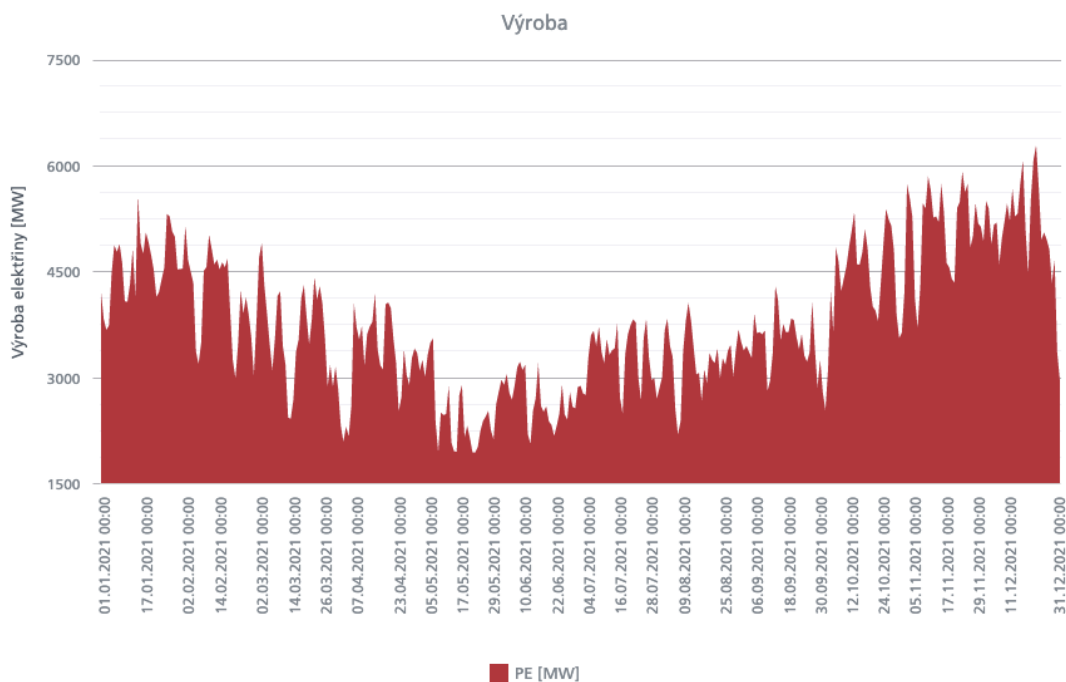
Obrázek 16 - Hala reaktoru LVR-15 (39)

5 Poptávka po tepelné energii pro dálkové vytápění

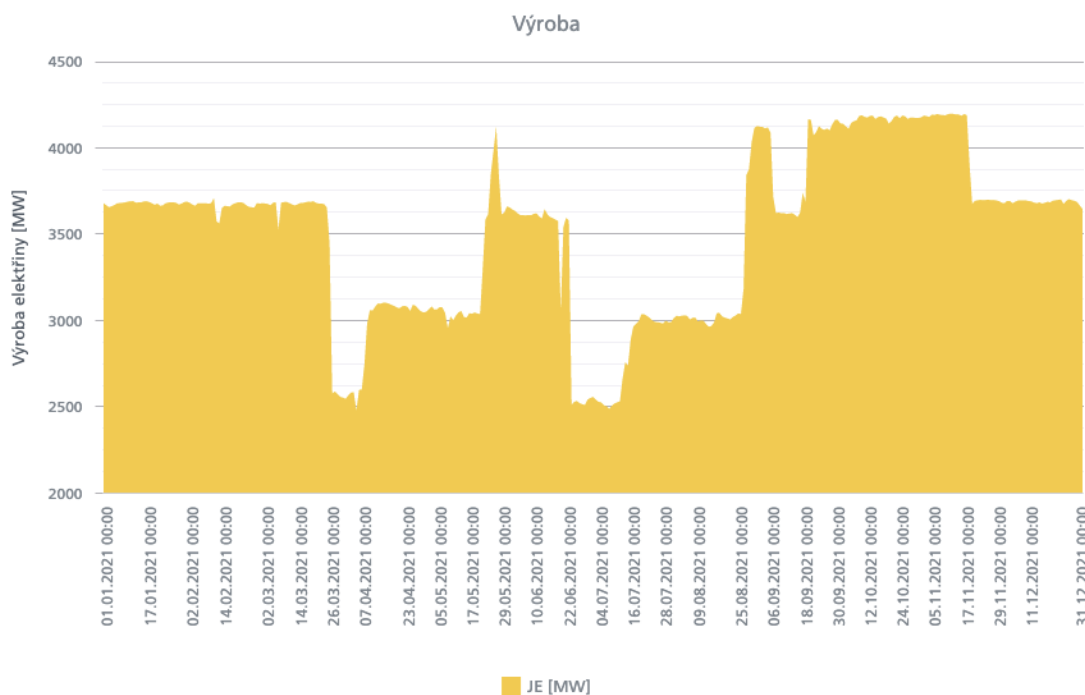
Před samotným zhodnocením lokalit nejdřív musí proběhnout výpočet tepelné energie, kterou dokážeme jednotlivými zdroji (s různými výkony) dodat za rok a následně tyto dodávky energie porovnat s poptávkou určitých lokalit. Na výpočet lze pohlížet dvěma způsoby. Prvním výpočtem je regulovaná výroba energie, kdy výpočet zohledňuje změny klimatu a poptávku po tepelné energii v průběhu roku. Pro výrobu elektřiny se tento přístup spíše využívá u parních elektráren, kdy v průběhu roku (i dne) měníme jejich vytížení podle poptávky po elektrické, popřípadě tepelné energii (Obrázek 19).

Z ročního diagramu zatížení na Obrázku 20 je patrné, že jaderné zdroje se naopak snažíme držet při stálém (co největším) zatížení celý rok. Z grafu průměrného ročního zatížení JE můžeme vyzorovat spíše dlouhodobou regulaci, kdy například v průběhu zimních měsíců se udržuje na konstantní vyrobené elektřiny. Rázové skoky v letních měsících mohou být důsledkem plánovaných odstávek těchto zdrojů, kdy dochází k postupné výměně paliva.

Při porovnání s uhelnými elektrárnami můžeme pozorovat odlišný přístup na regulaci. Parní elektrárny využíváme pro vyrovnávání větších špiček v diagramu zatížení a spíše závisí na aktuální situaci, ve které se energetická síť nachází. Tento fakt je dán jednoduchostí regulace parní elektrárny a také ekonomikou provozu obou výroben.



Obrázek 19 - Výroba PE (49)



Obrázek 20 - Výroba JE (49)

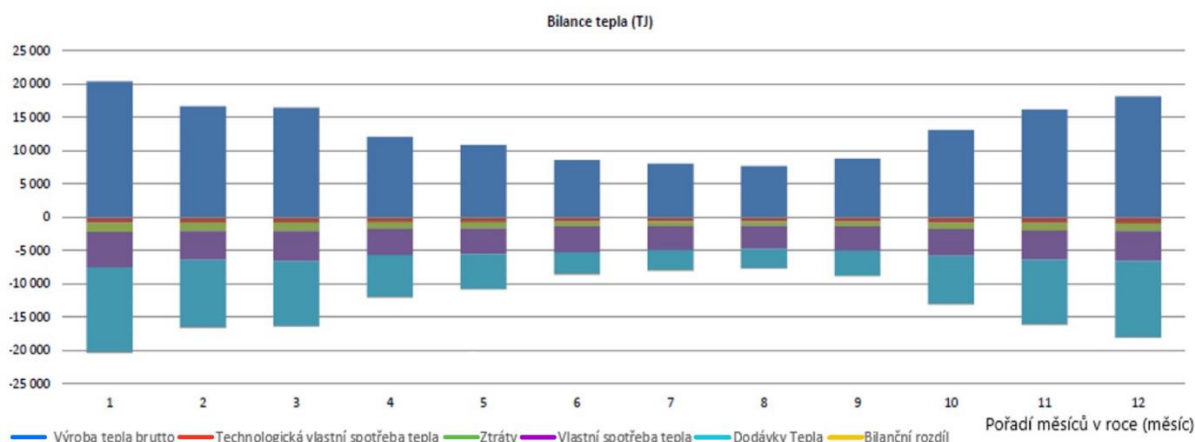
Praktická realizace SMR pro vytápění spíše počítá s neregulovanou výrobou, kdy využijeme zdroj celou maximální topnou sezónu na konstantní zatížení. Díky tomuto pohledu dokážeme dodat větší množství energie a rychleji pokryjeme velké investiční náklady, které jsou s jaderným zdrojem spojeny.

5.1 Výroba tepla bez kogenerace

5.1.1 Regulovaná výroba

Regulovaná výroba počítá s neideálním využitím jaderného zdroje. Jedná se o výpočet, kdy měníme výkon reaktoru v průběhu topné sezóny podle dané spotřeby energie. Průměrné zatížení v jednotlivých měsících jsem určil podle Obrázku 21, který znázorňuje souhrnnou roční tepelnou bilanci všech soustav dálkového vytápění evidovaných Energetickým regulačním úřadem. Samozřejmě nejvytíženějším obdobím v roce jsou zimní měsíce. Hlavně prosinec a leden, kde uvažuji 100% využití výkonu reaktoru, následně v méně chladných měsících (únor, březen, říjen, listopad) počítám s využitím 75 % výkonu. V letních měsících bude zdroj vypnut, protože nevyužijeme potenciál tohoto zdroje a budeme ho provozovat pouze v září na 40 % výkonu. Podle výsledků z tabulky je patrné, že toto rozpoložení a nevyužití celého výkonu vede ke snížení dodávky celkového tepla. Jaderné zdroje mají vysoké náklady na výstavbu, proto je neekonomické tyto zdroje takto

regulovat v průběhu roku, protože přicházíme o velké množství výkonu, který bychom mohli dodat bez regulace.



Obrázek 21 - Bilance výroby tepla v průběhu roku (16)

Tabulka 3 - Regulovaná výroba

Reaktor	Výkon (MWt)	Využití výkonu reaktoru (TJ)				suma (TJ)
		2 měsíce (100 %)	4 měsíce (75 %)	2 měsíce (50 %)	1 měsíc (40 %)	
TEPLATOR	50	259,2	388,8	129,6	51,8	829,4
RUTA-70	70	362,9	544,3	181,4	72,6	1161,2
HAPPY200	200	1036,8	1555,2	518,4	207,4	3317,8
DHR400	400	2073,6	3110,4	1036,8	414,7	6635,5

5.1.2 Vzorový výpočet pro TEPLATOR (50 MWt):

Pro výpočet využívám procentuální zatížení α , které respektuje, jakým způsobem využívám zdroj v tomto časovém období. Časové intervaly jsou označovány t a reprezentují počet hodin v daných měsících pro určité zatížení. Pro výpočet času využívám průměrnou dobu trvání jednoho měsíce, tedy 30 dní (index značí počet měsíců, který je zde požadován). Součinem těchto veličin dostávám vyrobené teplo Q a následným součtem vyrobené teplo za 9 měsíců Q_{celk} .

2 měsíce ($\alpha_1 = 100\%$): $t_2=1440$ h; v provozu na plný výkon 100 %:

$$Q_1 = \alpha_1 \cdot P \cdot t_2 = 50 \cdot 1440 = 72\,000 \text{ MWh} = \\ = 72\,000 \cdot 0,0036 = 259,2 \text{ TJ}$$

4 měsíce ($\alpha_2 = 75\%$): $t_2=2880$ h; v provozu při zatížení 75 %:

$$\begin{aligned} Q_2 &= \alpha_2 \cdot P \cdot t_2 = 0,75 \cdot 50 \cdot 2880 = 108\,000 \text{ MWh} = \\ &= 108\,000 \cdot 0,0036 = 388,8 \text{ TJ} \end{aligned}$$

2 měsíce ($\alpha_3 = 50\%$): $t_3=1440$ h; v provozu při zatížení 50 %:

$$\begin{aligned} Q_3 &= \alpha_3 \cdot P \cdot t_3 = 0,5 \cdot 50 \cdot 1440 = 36\,000 \text{ MWh} = \\ &= 36\,000 \cdot 0,0036 = 129,6 \text{ TJ} \end{aligned}$$

1 měsíc ($\alpha_4 = 40\%$): $t_4=720$ h; v provozu při zatížení 40 %:

$$\begin{aligned} Q_4 &= \alpha_4 \cdot P \cdot t_4 = 0,4 \cdot 50 \cdot 720 = 14\,400 \text{ MWh} = \\ &= 14\,400 \cdot 0,0036 = 51,8 \text{ TJ} \end{aligned}$$

Suma:

$$Q_{celk} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 259,2 + 388,8 + 129,6 + 51,8 = \mathbf{829,4 \text{ TJ}}$$

5.1.3 Neregulovaná výroba

V druhém výpočtu pracuji s procentuálním zatížením zdroje 0,85 po celou dobu topné sezóny (9 měsíců). Uvedenou hodnotu uvažují pro ekonomické analýzy také vývojáři konceptu TEPLATOR. Zdroj tedy v tomto případě neplní roli regulačního prvku, který plnohodnotně reaguje na výkyvy poptávky a teplot během roku. Pro vhodnou realizaci můžeme následně uvažovat přídavný plynový zdroj, který by tuto regulační činnost zastával za jaderný zdroj a doplňoval celkové vyrobené teplo dle poptávky v lokalitě. Díky tomu, že základní zdroj bude pracovat nepřetržitě 9 měsíců dokáže dodat více energie a bude rychlejší ekonomická návratnost projektu. Díky vysokému procentuálnímu zatížení zdroje dostáváme větší dodanou energii. (40)

Tabulka 4 – Neregulovaná výroba

Reaktor	Výkon (MWt)	Využití výkonu reaktoru (TJ)
		9 měsíců (85 %)
TEPLATOR	50	991,4
RUTA-70	70	1388
HAPPY200	200	3965,8
DHR400	400	7931,5

5.1.4 Vzorový výpočet pro TEPLATOR (50MWt)

Koeficient α udává procentuální zatížení zdroje, parametr t_9 značí 9 měsíců provozu, což odpovídá zhruba 6480 h. Výsledné vyrobené teplo Q dále uvažujeme při porovnávání s poptávkou v daných lokalitách.

9 měsíců ($\alpha = 85 \%$): $t_9=6480$ h; v provozu na 85 % instalovaného výkonu

$$\begin{aligned}
 W_1 &= \alpha * P * t_9 = 0,85 \cdot 50 \cdot 6480 = 275\,400 \text{ MWh} = \\
 &= 275\,400 \cdot 0,0036 = \mathbf{991,4 \text{ TJ}}
 \end{aligned}$$

5.2 Výroba tepla kogenerací

SMR s přeměnou energie mají mnohem lepší schopnost regulovat tepelný a elektrický výkon dodávaný do oblasti. Můžeme lehce během letních měsíců snížit tepelný výkon a pracovat jako čistě elektrický zdroj energie. Pro tyto možné regulace jsem zvolil řadu virtuálních výkonů (35, 20, 10 MWt), které jsou nižší než výše uvedené koncepty bez kogenerace a můžeme je během roku neomezeně regulovat. Zde to však neovlivňuje negativním způsobem ekonomiku výroby, protože regulujeme pouze část výkonu a zároveň tím navýšíme/snížíme dodávku elektrické energie. Všechny kogenerační zdroje mají definovaný poměr mezi tepelnými a elektrickými výkony. Na základě těchto poměrů lze stanovit, o kolik se sníží dodávaný elektrický výkon, pokud zdroji odebereme určité množství výkonu pro výrobu tepelné energie. Například reaktor SMART udává výkon 365 MWt a 107 MWe (procentuální účinnost vychází 29 %), což odpovídá tepelnému a elektrickému poměru 3,41/1. Pokud odebereme tepelný výkon 30 MWt (viz virtuální výkon v tabulce), díky přepočtení pomocí poměru snížíme elektrický výkon na 98,2 MWe. Tímto způsobem můžeme v průběhu provozu zdroje regulovat a vyrábět podle poptávky v daném

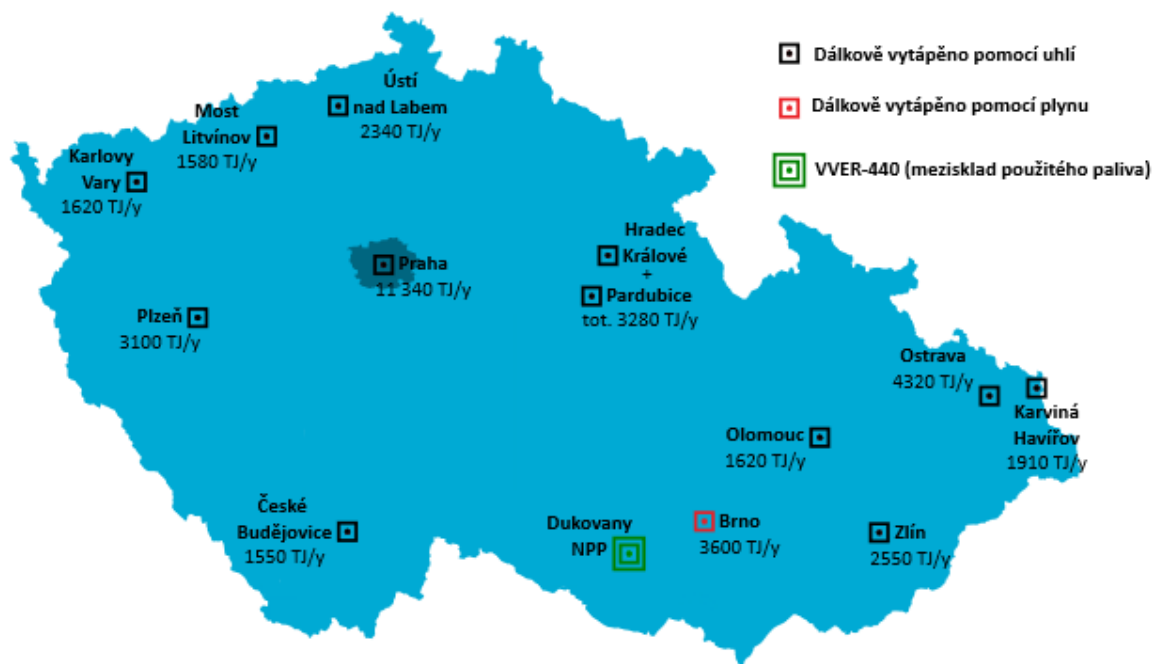
časovém období. Výpočet dodané energie těmito výkony je totožný s výpočtem v regulované výrobě (kapitola 6.1).

Tabulka 5 - Kogenerační zdroje

Výkon (MWt)	Využití výkonu reaktoru (TJ)				
	2 měsíce (100 %)	4 měsíce (75 %)	2 měsíce (50 %)	1 měsíc (40 %)	Suma (TJ)
10	51,8	77,8	25,9	10,4	165,9
20	103,7	155,5	51,8	20,7	331,7
35	181,4	272,2	90,7	36,3	580,6

6 Zhodnocení lokalit

Při zhodnocení výběru lokalit zohledňuji pouze poptávku lokality a k ní přiřazený jaderný zdroj. Hodnoty, které zdroj dokáže vyrobit, používám z neregulované výroby. Snažil jsem se najít hlavně lokality, které jsou již dnes vytápěny pomocí dálkového rozvodu. Fakt, že v lokalitě už existuje rozvod tepelné energie rapidně snižuje náklady na vybudování. Došlo by pouze k výměně z uhlé na jaderný zdroj.



Obrázek 22 - Mapa poptávky v ČR (41)

TEPLATOR dodá při výkonu 50 MWt zhruba 1 000 TJ za rok. Pro tento výkon se dá počítat s menšími krajskými městy, kdy by TEPLATOR pracoval v doprovodu plynové elektrárny, která by splňovala regulační požadavky. Podobnou výrobu udávají České Budějovice, kde je také 1500 TJ roční vyrobená energie. Současný stav pracuje také s možností výroby pomocí kogenerace. Další alternativou mohou být větší města v ČR, kdy by došlo k výstavbě většího počtu reaktorů v jedné oblasti. Například pro Hradec Králové a Pardubice by se jednalo o 2 jaderné zdroje a popřípadě špičkový plynový zdroj. Pokud by došlo k výstavbě více reaktorů, celkové investiční náklady se snižují.

Pro jaderný zdroj RUTA-70 kvůli podobnosti výkonů lze uvažovat stejné lokality jako pro český prototyp SMR.

Výkonově vyšší parametry a vyrobenou energii má reaktor HAPPY200 (4000 TJ). Podle mapy spotřeby tepelné energie tomuto výkonu odpovídá lokalita Ostrava.

Největší reaktor zmiňovaný v přehledu bez přeměny energie je DHR400 (7932 TJ). Tento reaktor díky své velikosti má jen jednu jasnou lokalitu, a to možnost vytápět svoji energii hlavní město ČR Prahu, kde se spotřeba pohybuje okolo 11 340 TJ/rok. Samozřejmě doplnění poptávky by znovu mohlo být realizováno společně s jiným zdrojem, který by vykrýval výkyvy v diagramu spotřeby tepelné energie.

Kogenerační zdroje díky své možnosti snadné regulace mají ještě větší pestrost využití v ČR. Pro virtuální tepelný výkon 35 MWt odpovídá z výpočtu 580,7 TJ. Teplárna Liberec nyní dodává 600 TJ, díky tomu by se SMR mohl stát alternativou pro tento tepelný zdroj.

Pro nejmenší výkon 10 MWt můžeme uvažovat menší města s počtem obyvatel do 10 000. Například nyní Temelín vytápí pomocí tepelného výkonu 8 MW Týn nad Vltavou (8000 obyvatel). Alternativou pro 10 MWt může být město Nejdek v Karlovarském kraji, které má přes 8 000 obyvatel. Poptávka se dnes vykrývá pomocí uhelného a plynového zdroje Vřesová, takže teplotárenský rozvod je zde již vybudován. Součástí této teplotárenské sítě je také Chodov (13 000 obyvatel). Lokality nynější teplotárny je mnohem blíže.

Nicméně na základě mého pestrého výběru reaktorů podle výkonu je celá řada možností a podle požadovaného množství dodaného tepla se dá reaktor aplikovat prakticky na každou lokalitu. Pro umístění jaderného zařízení jsou však zásadní bezpečnostní a legislativní požadavky na lokalitu, které budou hrát zásadní roli ve výběru. (41) (42) (52)

6.1 Jaderné lokality

Výzkumné centrum Řež jsem už ve své práci několikrát zmiňoval. Tato lokalita nabízí ideální vlastnosti pro umístění SMR. Z lokality Řež lze dálkově dodávat tepelnou energii do Prahy. Pražská teplotárenská udává výrobu energie zhruba 10 000 TJ/rok, což vede k největšímu reaktoru v přehledu DHR400 v kombinaci s plynovým zdrojem. Popřípadě postupnou výstavbu několika reaktorů TEPLATORU (lokalita tuto variantu svými vlastnostmi dokáže zrealizovat). (43)

Využitím historické lokality pro jaderný zdroj může být okolí Tetova, kde se nyní nachází dvě elektrárny, které dodávají tepelnou energii zhruba 3500 TJ. Alternativou těchto dvou elektráren může být jaderný zdroj HAPPY200.

Podle mého názoru, pokud máme unikátní vývoj SMR přímo v ČR, tak nejlepší variantou je výstavba TEPLATORU na území ČR. Pokud finální výkon reaktoru nebude stačit na danou lokalitu, bude muset být vybudováno více reaktorů pro oblast. Díky realizaci více konceptů budou nakonec konečné náklady na výstavbu mnohem menší.

Využití SMR v případě neschválení další výstavby nových velkých elektrárenských bloků v Dukovanech může být částečným řešením. Samozřejmě by například TEPLATOR nedokázal vyrovnat poptávku, která teplárenská síť v Brně požaduje. Prvním krokem by mohla být realizace jednoho reaktoru pro městské části v okolí Brna (Moravský Krumlov, Oslavany, Ivančice). Po uskutečněné výstavbě jednoho reaktoru by mohlo dojít k doplnění o další zdroj a možné pokrytí větší části města Brno. Druhou podobnou lokalitou zůstává Temelín. Podle mého názoru je mnohem lepší vybudovat další bloky stávajících elektráren a SMR realizovat v jiných částech jako náhrady za dosluhující uhelné zdroje.

7 Závěr

Malé modulární reaktory (SMR) jsou momentálně velmi diskutované téma, hlavně s ohledem na zhoršující se dostupnost jiných paliv a omezenou legislativní životností uhelných zdrojů. Podle mého názoru je škoda, že vývoj SMR nebyl rychlejší. Momentálně se vyvíjí jak samotné reaktory, tak i požadavky na jejich provoz. Z mého přehledu je patrné, že se o toto téma zajímají hlavně jaderné velmoci. Většina reaktorů z mého přehledu bude nejspíše uvedena do komerčního provozu až po roku 2024 (v některých případech se odhaduje rok 2027). S ohledem na odchod od emisních zdrojů by určité lokality mohly stihnout přechod z uhelné elektrárny na jadernou ještě do roku 2030. Spíše se podle mého názoru SMR nejvíce rozvinou v čase, kdy plynové elektrárny už nebudou moci být dále provozovány v dočasném režimu. Modulární reaktory, které jsem zmiňoval v druhé polovině přehledu mohou dokonale nahradit stávající zdroje, protože pracují na principu kogenerační výroby. Tím pádem můžeme do oblasti dodávat jak tepelnou, tak elektrickou energii (toto je momentální řešení u většiny vytápěných měst pomocí dálkového vytápění). Předpokládám, že prvním krokem komerčního rozšíření jednotlivých reaktorů je nejprve vybudování na území země, kde vývoj reaktoru probíhá. Podle informací, které jsem dohledal, se realizace nějakého projektu vyvíjeného v zahraničí (např. v Číně), dá v nejbližších letech na území ČR očekávat jen s velmi malou pravděpodobností.

Součástí každého jaderného zdroje jsou také s ním spojeny nároky a požadavky na jeho provoz. Samozřejmě se bezpečnost a spolehlivost těchto zdrojů velmi posunula po několika jaderných haváriích. Provoz JE se velmi zdokonalil od prvního komerčního reaktoru Shippingport, který byl uveden do provozu už v roce 1957. Díky neustálým bezpečnostním a spolehlivostním inovacím v oblasti jaderné energetiky a obzvláště SMR, mohou být do budoucna zmírněna kritéria pro výstavbu modulárního reaktoru a dojde k bližšímu výběru finální lokality.

Teplárenská soustava je v ČR vybavena hustou sítí rozvodů pro dálkové vytápění, díky tomu se v ČR snažíme zůstat u větších zdrojů tepelné energie. Mezi největší slabá místa teplárenství v současné době patří ceny plynu, a také ceny emisních povolenek. Dále se postupně zpřísnují nároky na dekarbonizaci ekologizaci soustavy. Rostoucí cena emisních povolenek a dostupnost, respektive nedostupnost, dostává majitele tepláren do problémové situace. Dominantním palivem v ČR pro výrobu tepla je nyní uhlí, což podle aktuální legislativy bude moci být spalováno pouze do roku 2030. Součástí odklonu od uhelných zdrojů je dočasná náhrada plynovými zdroji. Kvůli závislosti na importu zemního plynu se

tento přesun ukazuje jako méně perspektivní do následujících dekád. V současnosti v teplárenství dochází hlavně k rekonstrukci horkovodů a předávacích stanic. Díky tomuto se zmenšují ztráty při rozvodu tepla a na základě toho můžeme vyrábět méně energie.

V době, kdy dojde ke schválení jakéhokoliv konceptu SMR bude tento moment také spojen s výběrem lokality. Finální místo pro výstavbu malého modulárního reaktoru bude nejvíce záviset na požadavcích na daný koncept. Samozřejmě se nabízí historické jaderné lokality, popřípadě kdyby nedošlo k rozšíření stávajících bloků, tak by SMR mohla být ideální náhrada právě za tyto zdroje.

Součástí mé práce byl výpočet, kde jsem porovnával dva pohledy, zda regulovat/neregulovat zdroj. Vlivem horší schopnosti regulace a velkých investičních nákladů se jasně ukázalo, že jaderný zdroj by měl pracovat celý rok s vysokým zatížením a pro vyrovnávání špiček v denním diagramu může být doprovázen plynovým zdrojem, či jiným palivem. Díky konstantnímu výkonu dostaneme vyšší dodanou energii a budeme tento reaktor moct použít pro větší počet subjektů.

Závěr mého hodnocení je sestaven z několika bodů, které si myslím, že budou hrát zásadní roli v rozvoji SMR pro teplárenství v ČR.

- Díky nedokončenému vývoji a masovější realizaci reaktorů z Číny a Ruska si myslím, že realizace na našem území bude záviset hlavně na vývoji TEPLATORU.
- Velkou výhodou českého prototypu je možnost využití vyhořelého paliva, což bude jeden ze zásadních argumentů pro výstavbu na našem území.
- Využití SMR hlavně pro teplárenství může být řešení, ale stále dosavadní teplárenský provoz funguje hlavně na principu kogenerace, proto se bude muset vyhledat reaktor pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla ze zahraničí, který bude náležitě zrealizován v komerčním provozu s dostatečnými provozními zkušenostmi. Zde by se podle mého názoru dalo uvažovat hlavně o využití reaktoru ACP100.
- Díky momentálnímu vývoji v lokalitě Řež si myslím, že právě vytápění Prahy pomocí SMR může být nejpravděpodobněji prvním místem pro umístění malého modulárního reaktoru.

8 Citovaná literatura

- (1) *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. 2020 Edition. 2020.
- (2) *Teplator* [online]. In: . ČVUT, ZČU [cit. 2022-03-07].
Dostupné z: <https://www.teplator.cz/>
- (3) MORAVEC, Jan. Jaderná energie pro dálkové vytápění? Řešením mohou být nízkoteplotní reaktory. In: *O energetice* [online]. [cit. 2022-03-08].
Dostupné z:
<https://oenergetice.cz/teplarenstvi/jaderne-reaktory-dalkove-vytapeni-cine-testuji-400mw-nizkoteplotni-reaktor>
- (4) State Power Investment Corporation. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-03-07].
Dostupné z:
https://en.wikipedia.org/wiki/State_Power_Investment_Corporation
- (5) Typy jaderného paliva. In: *Atominfo* [online]. [cit. 2022-03-07].
Dostupné z: <https://atominfo.cz/2016/06/typy-jaderneho-paliva/>
- (6) Akademik Lomonosov je u arktického pobřeží. In: *Volty* [online]. [cit. 2022-03-07].
Dostupné z:
<https://www.volty.cz/2019/10/13/akademik-lomonosov-je-u-arktického-pobrezi/>
- (7) Akademik Lomonosov. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-03-07].
Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Akademik_Lomonosov
- (8) Akademik Lomonosov Floating Nuclear Co-Generation Plant. In: *Power Technology* [online]. [cit. 2022-03-07].
Dostupné z:
<https://www.power-technology.com/projects/akademik-lomonosov-nuclear-co-generation-russia/>
- (9) South Korea and Saudi sign SMART deal; NuScale targets Canada with SMR

- design. In: *Reuters Events Nuclear* [online]. [cit. 2022-03-08].
Dostupné z:
<https://www.reutersevents.com/nuclear/south-korea-and-saudi-sign-smart-deal-nuscale-targets-canada-smr-design>
- (10) BWRX-300. In: *Nuclear gepower* [online]. [cit. 2022-03-07].
Dostupné z:
<https://nuclear.gepower.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/bwrx-300>
- (11) *CNNC's ACP100 SMR: Technique Features and Progress in* [online]. Vienna Austria, 2016 [cit. 2022-03-07].
Dostupné z:
https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/df13/Presentations/011_CNNC%27s%20ACP100%20SMR-Technique%20Features%20and%20Progress%20in%20China.pdf
- (12) China starts construction of demonstration SMR. In: *World Nuclear News* [online]. [cit. 2022-03-07].
Dostupné z:
<https://world-nuclear-news.org/Articles/China-starts-construction-of-demonstration-SMR>
- (13) *A Review of District Heating Reactor Technology: VTT Research Report No. VTT-R-06895-18* [online]. In: . [cit. 2022-03-08].
Dostupné z:
https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/24936486/VTT_R_06895_18.pdf
- (14) Jaderná elektrárna Ågesta. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-03-08].
Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_elektr%C3%A1rna_%C3%85g_esta
- (15) MAŠATA, David. *TEPLATOR: Basic Economic Study for the Construction and Operation* [online]. [cit. 2022-03-19].
Dostupné z: https://arhiv.djs.si/proc/nene2020/pdf/NENE2020_0403.pdf
- (16) *ROČNÍ ZPRÁVA O PROVOZU TEPLÁRENSKÝCH SOUSTAV ČESKÉ*

- REPUBLIKY ZA ROK 2020* [online]. In: . [cit. 2022-03-19].
Dostupné z: <https://www.eru.cz/cs/-/vyrocni-zprava-eru-za-rok-2020>
- (17) Vytápění Brna teplem z dukovanské jaderné elektrárny? Plány opět užívají. In: *Brněnský deník* [online]. [cit. 2022-03-19].
Dostupné z:
Vytápění Brna teplem z dukovanské jaderné elektrárny? Plány opět ožívají Zdroj: https://brnensky.denik.cz/zpravy_region/vytapeni-brna-teplem-z-dukovanske-jaderne-elektrarny-plany-opet-ozivaji-20200118.html
- (18) Tepelné elektrárny, spalovny, teplárny, výtopny a výměňkové stanice. In: *Tzbinfo* [online]. [cit. 2022-03-19].
Dostupné z:
<https://energetika.tzb-info.cz/teplarenstvi/21763-tepelne-elektrarny-spalovny-teplarny-vytopny-a-vymenikove-stanice>
- (19) *Výroční zpráva 2020: Skupina Sokolovská uhelná* [online]. [cit. 2022-03-19].
Dostupné z:
<https://or.justice.cz/ias/ui/vypis-sl-detail?dokument=67377112&subjektId=21830&spis=473388>
- (20) PROTIVÍNSKÝ, Tomáš. Jak fungují evropské emisní povolenky?. In: *Fakta o klimatu* [online]. [cit. 2022-03-19].
Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/explainery/emisni-povolenky-ets>
- (21) V teplárně pokračuje výstavba nového kotle. In: *Teplárna Otrokovice* [online]. [cit. 2022-03-19].
Dostupné z: <https://www.tot.cz/a/v-teplarne-pokracuje-vystavba-noveho-kotle>
- (22) V příbramské teplárně se přestavují kotle na dřevní štěpku. In: *Příbram.cz* [online]. [cit. 2022-03-19].
Dostupné z:
<https://www.pribram.cz/clanek/v-pribramske-teplarne-se-prestavuji-kotle-na-drevni-stepku/14333/>
- (23) Teplárny letos vyměnily rekordní délku parních rozvodů. *Tzbinfo* [online]. [cit. 2022-03-19].
Dostupné z:
<https://energetika.tzb-info.cz/teplarenstvi/19495-teplarny-letos->

vyměnily-rekordni-delku-parnich-rozvodu

- (24) Statistika energetického využívání odpadů a alternativních paliv 1989–2018: Výsledky statistických zjišťování. *Ministerstvo průmyslu* [online]. [cit. 2022-03-19].
Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/obnovitelne-zdroje-energie/2019/4/Statistika-EVO-2018_1.pdf
- (25) Červený mlýn akumuluje teplo již pro 17 tisíc domácností. In: *Allforpower* [online]. [cit. 2022-03-19].
Dostupné z: <http://old.allforpower.cz/clanek/cerveny-mlyn-akumuluje-teplo-jiz-pro-17-tisic-domacnosti/>
- (26) *The Potential of the TEPLATOR Application in the Central Europe Region* [online]. In: . International Conference Nuclear energy for New Europe [cit. 2022-03-19].
Dostupné z: https://www.djs.si/nene2021/proceedings/pdf/NENE2021_207.pdf
- (27) BOUŠKA, Jan. Geotermální elektrárny. In: *Svaz podnikatelů pro využití energetických zdrojů, z.s.* [online]. [cit. 2022-03-19].
Dostupné z: <http://www.spvez.cz/pages/aktuality/akt209.htm>
- (28) Co je RINGEN a k čemu slouží. In: *Ringen, výzkumná infrastruktura* [online]. [cit. 2022-03-19].
Dostupné z: <https://rin-gen.cz/cz/vyzkumna-infrastruktura/co-je-ringen-2>
- (29) Zvažujeme výstavbu dvou plynových elektráren, říká Pavel Cyrani z ČEZ. In: *E15* [online]. [cit. 2022-03-19].
Dostupné z: <https://www.e15.cz/rozhovory/zvazujeme-vystavbu-dvou-plynovych-elektren-rika-pavel-cyrani-z-cez-1381537>
- (30) Elektrárna Chvaletice dokončí obnovu čtyř bloků, i přes přísnější limity. In: *Idnes.cz* [online]. [cit. 2022-03-21].
Dostupné z: <https://www.idnes.cz/pardubice/zpravy/chvaletice-elektarna-modernizace->

- emise-limity.A190531_081355_pardubice-zpravy_lati
- (31) *Elektrárna Opatovice pálí uhlí 60 let. K plynu nechvátá, žádá o výjimky* [online]. In: . [cit. 2022-03-21].
Dostupné z:
https://www.idnes.cz/hradec-kralove/zpravy/elektrarna-opatovice-emise-vyjimky-modernizace-plyn-uhli-pardubicky-kralovehradecky.A201116_581378_hradec-zpravy_tuu
- (32) Veolia dokončila další část ekologizace Elektrárny Třebovice v Ostravě. In: *Veolia* [online]. [cit. 2022-03-21].
Dostupné z:
<https://www.veolia.cz/cs/media/tiskove-zpravy/veolia-dokoncila-dalsi-cast-ekologizace-elektrarny-trebovice-v-ostrave>
- (33) Jaderná elektrárna Blahutovice. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-03-20].
Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_elektr%C3%A1rna_Blahutovice
- (34) Uhlí v Opatovicích chtěli soudruzi nahradit uranem Zdroj:
https://pardubicky.denik.cz/zpravy_region/uhli-v-opatovicich-chteli-soudruzi-nahradit-uranem-20191020.html. In: *Pardubický deník* [online]. [cit. 2022-03-20].
Dostupné z:
https://pardubicky.denik.cz/zpravy_region/uhli-v-opatovicich-chteli-soudruzi-nahradit-uranem-20191020.html
- (35) Jaderná elektrárna Tetov. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-03-20].
Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_elektr%C3%A1rna_Tetov
- (36) *ZADÁVACÍ BEZPEČNOSTNÍ ZPRÁVA: pro nový jaderný zdroj v lokalitě Dukovany* [online]. Elektrárna Dukovany II, a. s. Praha 4, 2021 [cit. 2022-03-20].
Dostupné z:

- https://www.cez.cz/webpublic/file/edee/2021/03/zadavaci-bezpecnostni-zprava-pro-novy-jaderny-zdroj-v-lokalite-dukovany_compressed.pdf
- (37) *Výroční zpráva 2020* [online]. EP Infrastructure, 2020 [cit. 2022-03-20].
Dostupné z:
https://www.eop.cz/media/cache/file/7b/EOP_vyrocní_zprava_2020_FINAL_web.pdf
- (38) Elektrárna Chvaletice. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-03-20].
Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektřina_Chvaletice
- (39) Jaderné reaktory LVR-15 a LR-0. In: *Velké výzkumné infrastruktury* [online]. [cit. 2022-03-19].
Dostupné z:
<https://www.vyzkumne-infrastruktury.cz/energetika/experimentalni-jadernereaktory-lvr-15-a-lr-0/>
- (40) *TEPLATOR: ekologické a ekonomické zhodnocení jaderného bezemisního zdroje tepla: All for Power*. MAŠATA, D. ŠKODA, R., 28-31 s. ISSN 1802-8535.
- (41) ABUSHAMAH, Hussein Abdulkareem Saleh, David MASATA, Michael MUELLER a Radek SKODA. Economics of reusing spent nuclear fuel by Teplator for district heating applications. *International Journal of Energy Research* [online]. [cit. 2022-03-19]. ISSN 0363-907X.
Dostupné z: doi:10.1002/er.7521
- (42) Výroční zpráva Teplárna Liberec: 2019-2020. In: *Teplárna Liberec, a. s.* [online]. Dr. Milady Horákové 641/34a 460 01 Liberec IV-Perštýn [cit. 2022-03-20].
Dostupné z:
<https://tli.mvv.cz/wp-content/uploads/2015/06/V%C3%BDro%C4%8Dn%C3%AD-zpr%C3%A1va-2019-2020.pdf>
- (43) *Výroční zpráva: Pražská teplárenská* [online]. Veolia, [cit. 2022-03-20].
- (44) TEPLATOR - dostupné teplárenství 21. století. In: *Český institut informatiky robotiky a kybernetiky* [online]. [cit. 2022-03-19].

- Dostupné z:
<https://www.ciirc.cvut.cz/cs/teplator-dostupne-teplarenstvi-21-stoleti/>
- (45) DHR-400. In: *CNNC* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z:
https://en.cnn.com.cn/2019-11/22/c_426401.htm
- (46) Elektrárna ve Vřesové projde modernizací za stovky milionů korun. In: *E15* [online]. [cit. 2022-03-19].
Dostupné z:
<https://www.e15.cz/byznys/prumysl-a-energetika/elektrarna-ve-vresove-projde-modernizaci-za-stovky-milionu-korun-1387186>
- (47) Chvaletice mají čas na udělení výjimky jen pár týdnů, úřad elektrárně počká
Zdroj: https://www.idnes.cz/pardubice/zpravy/elektrarna-chvaletice-emise-limity-vyjimka-krajsky-urad.A210813_153932_pardubice-zpravy_lati. In: *Idnes.cz* [online]. [cit. 2022-03-19].
Dostupné z: Chvaletice mají čas na udělení výjimky jen pár týdnů, úřad elektrárně počká
Zdroj: https://www.idnes.cz/pardubice/zpravy/elektrarna-chvaletice-emise-limity-vyjimka-krajsky-urad.A210813_153932_pardubice-zpravy_lati
- (48) Jaderná elektrárna, tramvaj a ZOO v Pardubicích. Proč to nevyšlo?. In: *Pardubice rozhlas* [online]. [cit. 2022-03-19].
Dostupné z:
<https://pardubice.rozhlas.cz/jaderna-elektrarna-tramvaj-a-zoo-v-pardubicich-proc-nevyslo-7720242>
- (49) Data z ČEPS. In: *ČEPS, a.s.* [online]. [cit. 2022-03-19].
Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/data#Generation>
- (50) EU Natural Gas In: *Tradingeconomics* [online]. [cit. 2022-04-23].
Dostupné z: <https://tradingeconomics.com/commodity/eu-natural-gas>
- (51) EU Carbon Permits. In: *Tradingeconomics* [online]. [cit. 2022-04-12].
Dostupné z: <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon>
- (52) Předprovozní bezpečnostní zpráva JE Temelín, In: ČEZ.