

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV ENERGETIKY



Potenciál využití malých modulárních reaktorů  
v teplárenství České republiky

2023

Bc. Tomáš Votroubek

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Votroubek** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **478249**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**  
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**  
Specializace: **Energetika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Potenciál využití malých modulárních reaktorů v teplárenství České republiky**

Název diplomové práce anglicky:

**The potential of utilization of small modular reactors in the district heating of the Czech Republic**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popište historický a současný stav teplárenství v ČR
- 2) Vysvětlíte cenotvorbu při prodeji tepelné energie
- 3) Popište technologii malých modulárních reaktorů a vytvořte rešerši přehledu designů SMR
- 4) Uveďte legislativní požadavky pro hodnocení bezpečnosti včetně příkladu aplikace
- 5) Vyberte a popište lokalitu pro možné umístění SMR s potenciálem připojení k SCZT
- 6) Zvolte design SMR vhodný pro zásobování SCZT zvolené lokality
- 7) Proveďte ekonomické hodnocení uplatnění zvoleného SMR pro teplárenství a KVET
- 8) Vytvořte citlivostní analýzu ekonomických modelů
- 9) Porovnejte ekonomickou výhodnost variant uplatnění SMR oproti na lokalitě provozovanému zdroji

Seznam doporučené literatury:

International Atomic Energy Agency. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. 1. vydání, Vídeň, IAEA, 2022  
Vyhláška č. 162/2017 Sb., o požadavcích na hodnocení bezpečnosti podle atomového zákona. Praha, Sbírka zákonů České republiky, 2017

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Lukáš Novotný ústav energetiky FS**

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

Datum zadání diplomové práce: **18.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **02.06.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2024**

Ing. Lukáš Novotný  
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michal Kolovratník, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení práce, je legální.

V Praze dne: .....

Podpis: .....

# Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Lukáši Novotnému za přínosné konzultace, ochotu a čtené rady při vedení práce.

## Anotační list

<b>Jméno autora:</b>	Tomáš Votroubek
<b>Název DP:</b>	Potenciál využití malých modulárních reaktorů v teplárenství České republiky
<b>Anglický název</b>	The potential of utilization of small nuclear reactors in the district heating of the Czech republic
<b>Akademický rok</b>	2022/2023
<b>Ústav:</b>	Ústav energetiky
<b>Vedoucí DP:</b>	Ing. Lukáš Novotný
<b>Bibliografické údaje:</b>	Počet stran: 78 Počet obrázků: 41 Počet tabulek: 1 Počet příloh: 0
<b>Klíčová slova</b>	Teplárenství, malé modulární reaktory, SMR
<b>Keywords</b>	District heating, small modular reactors, SMR
<b>Anotace:</b>	Tato práce se zabývá možnostmi využití malých modulárních zdrojů jako náhrady uhelných zdrojů v českém teplárenství. Cílem práce je vytvořit ekonomické zhodnocení a citlivostní analýzu nákladů.
<b>Abstract:</b>	This theses focuses on possibility of utilization of small nuclear reactors in czech district heating. Goals are creating economic study and sensibility study of expenditures.

## Seznam zkratek

AZ	aktivní zóna
CAPEX	capital expenditures, kapitálové náklady
CCF	common cause failiure, porucha se společnou příčinou
ČEZ	České energetické závody
DHR	decay heat removal systems, systémy odvádění zbytkového tepla
DPH	daň z přidané hodnoty
ECCR	Emergency core cooling system, systém havarijního chlazení aktivní zóny
ERÚ	energetický regulační úřad
GWt	gigawatt tepelného výkonu
HRA	human reliability analysis, analýza lidské spolehlivosti
IAEA	International atomic energy agency
IU	iniciační událost
JE	jaderná elektrárna
JETE	jaderná elektrárna Temelín
JZ	jaderné zařízení
LCOE	Levelised cost of electricity
LCOH	Levelised cost of heat
LOCA	loss of coolant accident, nehoda se ztrátou chladiva
MWe	megawatt elektrického výkonu
MWt	megawatt tepelného výkonu
OPEX	operating expenditures, provozní náklady
PRA	Probabilistic risk assesment, pravděpodobnostní hodnocení rizika
PSA	Probability safety assesment, pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti
ROA	míra výnosnosti
SCZT	soustava centrálního zásobování teplem
SMR	small modular reactors, malé modulární reaktory
SÚJB	státní úřad pro jadernou bezpečnost
TJ	terra joule
ZEVO	zařízení na energetické využití odpadu

## Obsah

Seznam zkratk	3
1 Úvod	6
2 Teplárenství	7
2.1 Historie	10
2.2 Budoucí vývoj	12
2.3 Využití jaderných technologií v teplárenství	12
3 Malé modulární reaktory	14
3.1 Současné projekty malých modulárních reaktorů	15
3.1.1 ACP100 Linglong One	16
3.1.2 BREST-OD-300	16
3.1.3 BWRX-300	16
3.1.4 CAREM	17
3.1.5 Energy well	19
3.1.1 HTR-PM	21
3.1.2 KLT-40	22
3.1.3 MMR	22
3.1.4 NuScale	23
3.1.5 Rolls Royce SMR	26
3.1.6 SMART	26
3.1.7 TMSR-LF1	27
3.1.8 VBER-300	27
4 Jaderná bezpečnost	29
4.1 Stupnice INES	29
4.2 PSA	30
4.3 Legislativa	30
4.3.1 Historie PSA	31
4.4 Základní pojmy	32

4.5	Přístupy k hodnocení bezpečnosti.....	37
4.5.1	Deterministický.....	37
4.5.2	Pravděpodobností .....	37
4.6	Popis modelu PSA.....	38
4.7	Úrovně PSA.....	40
4.8	Výsledky.....	41
4.9	Jaderná bezpečnost SMR.....	42
5	Praktická část.....	43
5.1	Zásobování teplem .....	43
5.2	Cenotvorba tepla.....	44
5.3	Výběr a popis lokality .....	48
5.4	Výběr designu SMR.....	53
5.5	Ekonomické posouzení.....	53
5.5.1	Samostatná výroba tepla.....	54
5.5.2	Kombinovaná výroba tepla a elektřiny.....	59
5.5.3	Shrnutí .....	63
6	Závěr .....	64
7	Reference.....	4
	Seznam obrázků.....	13
	Seznam tabulek.....	15



## 1 Úvod

V České republice došlo v průběhu dvacátého století k vybudování rozsáhlého průmyslového oboru dálkového vytápění, které je klíčové pro zásobování urbanizovaných oblastí v České republice. V současnosti prochází oblast teplárenství, stejně jako s ním úzce spojená oblast energetiky, mnoha změnami. Změny jsou způsobeny zejména snahami o ekologizaci lidské činnosti a minimalizaci vypouštěných emisí, především oxidu uhličitého. Z toho vyplývá odchod od spalování fosilních paliv, zejména uhlí. Teplárenství v České republice se těmto změnám bude muset přizpůsobit. K tomu bude třeba najít náhradu za současné zdroje, které na spalování silně závisí. Pro náhradu větších teplárenských zdrojů se jako zajímavá možnost naskýtá v současnosti se prudce rozvíjející technologie malých modulárních reaktorů. Proto se jimi intenzivně zabývá největší česká energetická společnost ČEZ a.s., Ministerstvo průmyslu a obchodu nebo např. Moravskoslezský kraj.

Tato diplomová práce popisuje české teplárenství, jeho historický vývoj, současný stav a nastiňuje možnosti jeho vývoje v budoucnosti. Dále se zaměřuje na technologie malých modulárních reaktorů, zejména na v současnosti nejvíce slibné projekty. Následně popisuje jadernou bezpečnost, která je klíčovým předpokladem pro aplikaci jakýchkoliv jaderných technologií a popisuje metodu pro její hodnocení.

V praktické části diplomové práce byly hledány a zkoumány lokality, ve kterých by byla možná aplikace malých modulárních reaktorů jako zdrojů tepla. Hlavním cílem diplomové práce je provedení ekonomického posouzení aplikace malých modulárních reaktorů pro výrobu tepla, pro kogeneraci tepla a elektrické energie a porovnání se současným stavem. Ekonomické hodnocení je doplněno o citlivostní analýzu na výši investičních nákladů, provozních nákladů, úrokovou míru a využití reaktoru v roce.

## 2 Teplárenství

Teplárenství se zabývá dodávkami tepla, ať už v podobě tepla pro vytápění a výrobu teplé vody pro obytné a kancelářské objekty, nebo pro použití v průmyslu. V praxi se pro systém přepravy teplotnosného média používá termín soustava centrálního zásobování teplem (SCZT). Soustava CZT je formována třemi základními prvky: jeden nebo více zdrojů tepla, např. teplárna či výtopna, dále přenos tepla a spotřebitelské zařízení. [1]

Teplo je dodáváno skrze potrubní sítě. Médiiem pro dálkový přenos tepla je zpravidla voda. Lze využívat potrubí přenášeující teplo pomocí kapalné vody nebo pomocí páry. Použití kapalné vody se dále podle teploty dělí na teplovodní (do 60 °C) a horkovodní (do 110 °C). Pára se dělí dle tlaku na nízkotlakou, středotlakou a vysokotlakou. [1]

Hlavními provozními charakteristikami parního potrubí je absence čerpadel, poněvadž dochází ke hnaní páry tlakovou diferencí. Rychlost páry v potrubí je oproti vodě vyšší, což umožňuje snazší regulaci a rychlejší odezvu sítě. Charakteristickým prvkem je také nutnost odvodu kondenzátu z parního potrubí. Zásadní nevýhodu parního potrubí představují výrazně vyšší ztráty vycházející z vyšší teploty páry. Parní potrubí jsou proto používána ve významně menší míře. K jejich využití dochází zejména v rámci průmyslových provozů, kde jsou dominantní, nebo jako páteřního rozvodu pro SCZT. [1]

Dnes jsou dominantní používaná potrubí horkovodní a teplovodní. Obecným dlouhodobým trendem v tepelných sítích je snižování teplotních hladin, a tedy dříve růst využití horkovodů a dnes zejména růst využití teplovodů. [2]

Teplotnosná potrubí mohou být uložena různými způsoby. Dříve se díky nižším investičním nákladům a kratší době realizace často využívala potrubí nadzemní, na nízkých podstavcích nebo na sloupech. Během dvacátého století se také v České republice rozsáhle používala potrubí kanálová, která byla uložena do uzavřeného podzemního kanálu. [1] Dnes se zpravidla používají potrubí s vyšším stupněm izolace uložena bez kanálu přímo pod zem. [3]

Teplo je z centrální rozvodné sítě předáváno odběratelům do jejich lokální spotřebitelské sítě (rozvody v obytném/kancelářském objektu nebo v průmyslovém areálu) v předávacích stanicích. Méně běžné je uspořádání tlakově závislých odběratelských soustav, kde dochází k předání tepla přímo předáním média, buď bez jakékoliv úpravy jeho vlastností, nebo s jejich modifikací. Při úpravě se podle odběratelovi potřeby může snížit tlak. Běžnější je tlakově nezávislé řešení, kdy jsou SCZT a odběratelská síť odděleny a mají samostatná média, mezi kterými dochází k přenosu tepla ve výměnících. [1]

Důležitá je celková dispozice sítě. Tu určují zbylé dva prvky systému, a to zdroje tepla a jejich poloha a spotřebitelská zařízení. Podle polohy zdroje tepla mohou být sítě radiální, pokud je zdroj uložen přibližně uprostřed sítě a je obklopen spotřebiteli. [1] Dobrým příkladem může být SZCT v Českých Budějovicích.

Dále mohou být sítě skruhované, či mřížové. Vzhledem k postupnému historickému vývoji a mnoha místním specifikům je mnoho SCZT netypických schémat. [1]

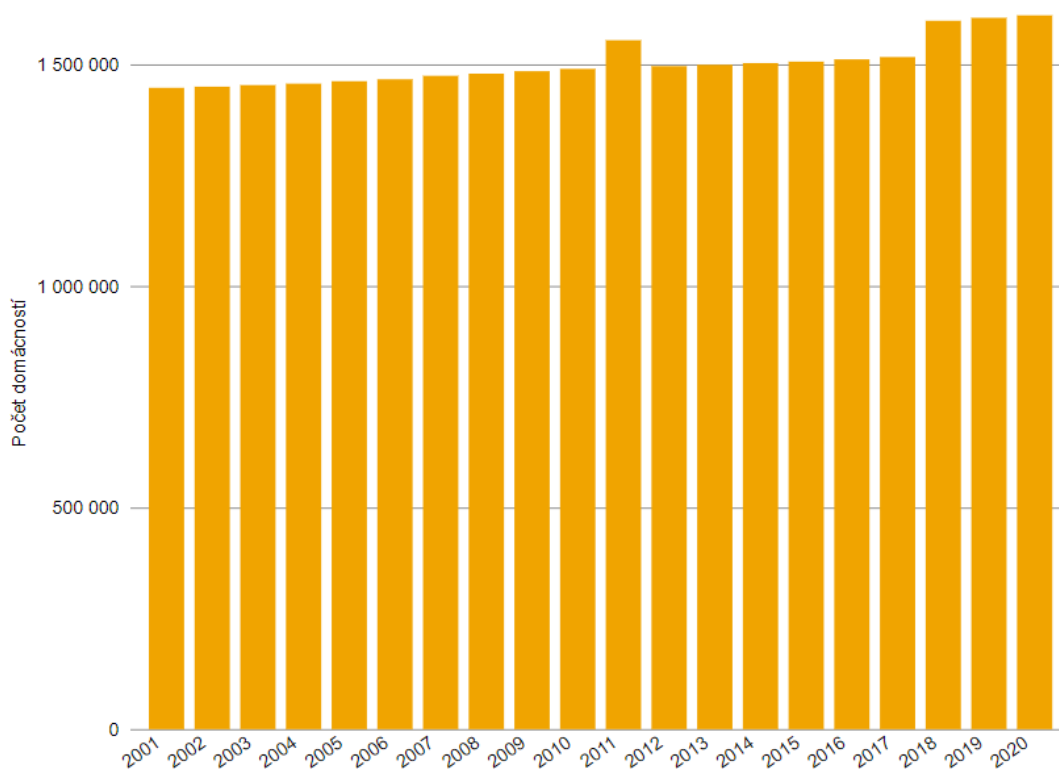
V případě tepelných sítí je vzdálenost, na kterou je ekonomické dopravovat teplo, výrazně nižší než pro síť pro přenos elektrické energie. Typicky se jedná o jednotky až nižší desítky kilometrů.

Zdroji tepla pro tepelné sítě mohou být teplárny. Ty se zaměřují na kogeneraci tepla a elektrické energie a mají tak zpravidla sezónní provoz. Teplárny spalují primárně uhlí, dnes také čím dál častěji biomasu, zejména dřevní štěpku. Alternativami k teplárnám jsou výtopny – což jsou jednoúčelová zařízení na výrobu tepla. Ty tradičně používaly ušlechtilá paliva, zejména plyn a topné oleje. Mezi zdroje tepla pro SCZT se řadí také elektrárny, které sice řídí svůj provoz primárně pro účely výroby elektrické energie, ale některé dodávají i tepelnou energii pro místní spotřebu. Dnes se také čím dál častěji stávají zdroji tepla pro SCZT zařízení pro energetické využití odpadu (ZEVO). [1]

Hlavními nevýhodami SCZT jsou vyšší počáteční náklady na výstavbu zařízení, především sítě, a tepelné ztráty při přenosu skrze síť. [1]

Výhoda je zpravidla vyšší účinnost vycházející z možnosti využít pokročilejší zařízení při přijatelných nákladech. Dále možnost využití kogenerace elektrické energie a tepla, zvyšující se ekologičnost i ekonomičnost provozu. Také díky profesionalizaci provozu a údržby vykazují SCZT, respektive jejich zdroje, i menší poruchovost než decentralizované systémy.

V současné době je na systémy centrálního zásobování teplem napojeno přibližně 1,6 milionu domácností v České republice a jak je z grafu níže zjevné, za posledních dvacet let jejich počet pozvolna, ovšem nepřetržitě, stoupá. [4]

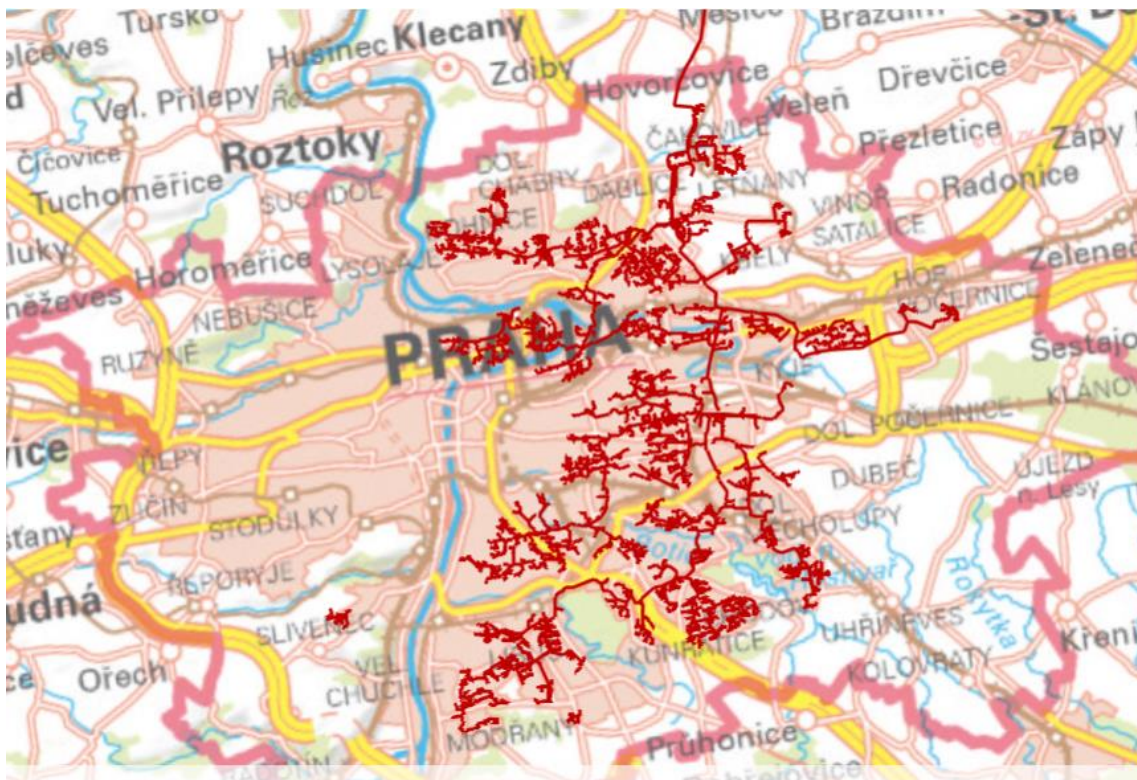


Obrázek 1 Graf vývoje počtu domácností napojených na SCZT [4]

V mezinárodním srovnání patří Česká republika k zemím, které výrazně spoléhají na centralizované dálkové zásobování teplem. [5]

V České republice jsou soustavou centrálního zásobování teplem vybavena všechna větší města. Celkem se v Česku nachází několik desítek velkých SCZT nad 100 MWt výkonu. Největší je Praha. Ta je rozčleněna mezi více vlastníků, hlavními jsou Pražská teplárenská [6] a Veolia [7]. Celkový výkon přesahuje 1,5 GWt. [8] Největším zdrojem pro pražskou síť je kogenerační výroba v uhelné elektrárně Mělník na sever od Prahy. [9] Dnes přispívá do sítě také například spalovna v Malešicích. [10]

Na obrázku níže můžeme vidět komplexní síť soustavy centrálního zásobování teplem ve východní Praze. Tato soustava spadá pod společnost Pražská teplárenská. Na severu můžeme vidět přivaděč z elektrárny Mělník. Soustava zasahuje až na východ na Černý most a pomocí průtahu až do Horních Počernic. Jižně od této větve pak můžeme vidět větev, pomocí které dodává do sítě teplo spalovna v Malešicích.



Obrázek 2 Mapa SCZT Pražská teplotná [6]

Gigawatový výkon přesahuje rovněž Brněnská tepelná soustava. V té je dnes již rovněž zařazeno ZEVO, které dodává kolem pětiny celkové spotřeby. Zbytek je pokryt převážně plynem a v současnosti se rozvíjí ambiciózní projekty na rozsáhlé využití biomasy. [11] Dlouhodobě se uvažuje o vybudování horkovodního napaječe z jaderné elektrárny Dukovany, který by mohl pokrývat část spotřeby brněnské sítě. [11]

Za zmínku stojí soustava v Mladé Boleslavi, kde je město vytápěno pomocí tepla vyráběného v závodech Škody auto. Tamní zařízení patří k velmi moderním, spalují převážně biomasu ve fluidních kotlích. [12]

## 2.1 Historie

Obecně se světové teplotnosti dělí do čtyř generací.

První generace moderního dálkového zásobování teplem vznikla na konci devatenáctého století ve Spojených státech. Systém využíval betonové potrubí a použitým médiem byla pára. Tyto systémy měly velké problémy se spolehlivostí a neměly příliš vysokou účinnost. [3]

Dnes jsou považovány za překonané. Jedním z mála modernizovaných pozůstatků je systém vytápějí centrum New Yorku, Manhattan. Zde se používá z důvodu historického vývoje a zejména díky obrovské populační hustotě, a tedy potřebě po tepelné energii. [3]

Druhá generace se rozvinula ve třicátých letech dvacátého století. Používala již primárně tlakovou vodu o teplotách nad 100 °C vedenou v kanálovém potrubí. Také se začala z důvodu úspor primárních zdrojů energií ve velké míře používat kogenerace tepla a elektrické energie. Do této generace se řadí i sítě tzv. sovětského typu, které byly budovány po druhé světové válce v SSSR a dalších zemích východního bloku, včetně Československa. Ve druhé generaci byla široce používána kapalná, z ropy odvozená paliva, jako zdroj tepelné energie. [2]

Třetí generace, někdy nazývána skandinávská, začala využívat prefabrikované izolované potrubí a užívá nižší teplotní úrovně média, začala používat kromě horkovodních i teplovodní potrubí. Ovlivněná byla silně snahou o větší efektivitu vyvolanou dvěma ropnými šoky. [3]

V současnosti vytvářené systémy označujeme za čtvrtou generaci. Rozvíjejí se například v Dánsku. U těchto systémů je kladen ještě větší důraz na snížení teplot a tím ztrát při přepravě. Zároveň je zde kladen důraz také na větší využití nízkopotenciálních zdrojů a zejména obnovitelných zdrojů. [3]

V českém teplárenství mělo již od jeho vzniku dominantní pozici spalování uhlí, které bylo v Česku dlouhodobě těženo. Spalování uhlí s sebou však neslo významné dopady. Kromě poškození povrchu krajiny při povrchové těžbě, v Česku dominantní, se jednalo o emise z procesu spalování.

Mezi hlavní sledované emise se řadí oxidy síry, oxidy dusíků, popílek a oxidy uhlíku. Za posledních několik desetiletí docházelo k postupnému snižování jednotlivých emisí. První emise, u kterých se objevily výrazné snahy o jejich eliminaci, byly emise oxidů síry. Ty po vypuštění do atmosféry reagovaly za vzniku kyseliny, jež se smíchala s vodní párou a způsobovala kyselou dešť, které měly rozsáhlé destruktivní dopady, zejména na lesy.

Došlo k velmi úspěšné aplikaci technologií na odsířování spalin, především mokré vápencové vypírky, jež je schopna v současné době odstranit prakticky veškerou síru v obsahu spalin. Podobně úspěšné bylo aplikování technologií na očištění spalin od popílku. Cyklony, využívající odstředivé síly, a elektrostatické separátory odstraňují drtivou většinu popílku. To vedlo k dramatickému snížení problému se smogem, navazujících respiračních onemocnění a celkovému zlepšení kvality životního prostředí a kvality života občanů. [13]

## 2.2 Budoucí vývoj

V současnosti prochází teplárenství stejně jako ostatní sektory energetiky prudkým vývojem. Jedna z technologií, které se momentálně prosazují, je náhrada uhlí biomasou, především dřevní štěpkou jako paliva pro kotle zásobující SCZT. Problémem biomasy z hlediska celé energetiky jsou omezené kapacity pro její produkci na území České republiky, které do značné míry sdílí produkční kapacity se zemědělskou produkcí. Dřevní biomasa je také již dnes intenzivně využívána pro produkci papíru, v nábytkářském průmyslu, ve stavebnictví nebo jako palivo v decentralizovaném vytápění. Dovoz paliva na velké vzdálenosti by dále zvednul cenu a je výrazně méně ekologický, což tuto možnost do budoucna výrazně ohrožuje možností zavedení legislativy na úrovni Evropské unie, která by tuto praktiku penalizovala, popřípadě úplně zakázala. Intenzivní pěstování biomasy zabírá půdu, která by mohla jinak být využita pro zemědělskou produkci a ohrožuje potravinovou bezpečnost země. To se v postupně deglobalizujícím světě a méně stabilním mezinárodním trhu ukazuje jako klíčový problém, jenž bude limitovat produkci biomasy v České republice. [14]

Další alternativou pro náhradu uhlí je geotermální energie. S touto jsou již ve světě rozsáhlé zkušenosti. Její využití je ovšem přísně limitováno přírodními podmínkami, které nejsou v České republice velmi příznivé. Přesto jsou i v Česku snahy o využití tohoto zdroje. Nejdále zatím došel projekt v Litoměřicích, kde dochází k hloubení zkušebních vrtů do hloubek kolem jednoho a půl kilometru. Zájem na vybudování geotermální elektrárny má i město Liberec ve spolupráci se společností ČEZ. [15]

Soustavy centrálního zásobování teplem budou nadále podporovány a stát počítá s jejich dalším rozvojem. Jaderné technologie jsou považovány za perspektivní možnost zdroje energie. [16]

## 2.3 Využití jaderných technologií v teplárenství

Využití jaderných technologií pro produkci tepla bylo zvažováno od začátku rozvoje jaderné energetiky v Československu. V tehdejší době byly již zvažovány argumenty ochrany životního prostředí, i když primárně s ohledem na lokální situaci a smog, a samozřejmě ekonomičnost a energetickou bezpečnost státu. Z tehdejší politické situace vycházela naše orientace na Sovětský svaz, průmyslovou spolupráci se zeměmi východního bloku a přebírání sovětských jaderných technologií. Pro zásobování soustav dálkového vytápění teplem byly zvažovány i tehdy nastupující reaktory VVER 1000 a VVER 440. Jaderné zdroje byly intenzivně zvažovány

pro zásobování Prahy. Pro tu bylo dokonce v roce 1975 rozhodnuto o realizaci prvního jaderného zdroje napojeného na tepelnou síť, plány se však nikdy neuskutečnily. [17]

Kromě malých modulárních reaktorů, small modular reactors (SMR), byly již vytvořeny projekty využívání tepla z jaderných elektráren konvenčních velikostí. Již v průběhu návrhu se pracovalo s možností vyvedení tepla z obou českých jaderných elektráren pro zásobování SCZT v Českých Budějovicích, Týně nad Vltavou a v Brně. V případě Českých Budějovic a Brna se jedná o poměrně velké vzdálenosti, cca 30, respektive 40 kilometrů. [17] Po výstavbě elektráren ovšem k realizaci dlouho nedošlo. Až 20 let po zprovoznění Temelína se staví horkovod pro zásobování Českých Budějovic, který bude pokrývat přibližně třetinu potřebného výkonu. [18] Jediným zrealizovaným projektem byla stavba horkovodu do Týna nad Vltavou. Do přibližně osmitisícového města dodává Temelín teplo již od roku 1998 a je to tak zatím jediný příklad využívání jaderného zdroje v českém teplárenství. [19]

Malé modulární reaktory byly již od počátku míněné i pro generování tepla, ať už v teplárenství nebo pro výrobu pitné vody. Právě jejich velikost, možnost sériové výroby a škálovatelnosti nabízí atraktivní alternativu jako zdroj tepla, které nemůže být dopravováno na tak velkou vzdálenost jako elektrická energie, a proto je potřeba vytvářet lokální zdroje. [20]

Projekty NuScale, Smart, počítaly již v návrhu s možností kogenerace tepla a elektrické energie. [21] [22]

Díky velké kapacitě výroby tepla SMR a nižším jednotkovým nákladům, by mohly SMR umožňovat výraznější využití parních potrubí, jejichž hlavní nevýhodou jsou vysoké ztráty. Ty by u SMR mohly být považovány za přijatelnou daň za menší potrubí se snazší a rychlejší regulací a nižší závislostí na čerpadlech. [23]



### 3 Malé modulární reaktory

Malé modulární reaktory představují dynamicky se rozvíjející obor jaderné energetiky. Jak už název napovídá, jsou na rozdíl od v posledních dekáдах rozvíjených velkých reaktorů o elektrickém výkonu 1-1,6 GWe výrazně menší. Dle definice IAEA jsou malé jaderné reaktory o elektrických výkonech do 300 MWe, středně velké jsou definovány do 700 MWe. V USA jsou definovány malé modulární reaktory dle tepelného výkonu menšího než 1000 MWt. K tomu je ještě definována kategorie mikro reaktorů dle maximálního elektrického výkonu 50 MWe nebo tepelného 250 MWt. [24]

Koncept malých modulárních reaktorů spočívá především v předpokladu, že budou z výrazně větší části než dřív budované v továrnách, ideálně sériově, a na místě stavby budou spojovány pouze větší celky. To by, společně s odpovídajícím návrhem, mělo výrazně urychlit a zlevnit výstavbu. Větší sériovost výroby komponent a modulů by měla také umožnit jejich zlevnění. Zároveň by snížení unikátnosti jednotlivých projektů mělo vést k usnadnění procesu projektování a schvalování projektu elektrárny, které v současnosti trvají i deset let. [20]

Malé modulární reaktory tím jdou do značné míry proti trendu posledních desetiletí, kdy byla snaha o vytváření větších jednotek. To by mělo nabízet nižší provozní náklady, a i nižší výrobní náklady díky úsporám z rozsahu. Proces projektování, schvalování a výstavby se však v průběhu času tak prodloužil, že dnes od rozhodnutí o úmyslu výstavby a spuštění provozu dosahuje včetně dlouhých zpoždění téměř 20 let, a je spojen s rozsáhlou společenskou a politickou debatou a kritikou. Těmto, z velké části i politicko-společenským problémům, se snaží malé modulární reaktory svou koncepcí vyhnout. [25]

Výstavba menších reaktorů má i další výhody, například snazší budování spojení menšího výkonu na přenosovou soustavu. Dále se jedná o provoz, kdy připojování a odpojování od sítě je výrazně snazší v případě reaktoru o výkonu v nižších stovkách megawatt než u jednotek o výkonu gigawattu a vyššího. To je případ zejména menších zemí a energetik, jako je Česká republika. [20]

O aktuálnosti problematiky svědčí fakt, že byl na začátku roku 2023 ve Spojených státech amerických certifikován první design malého modulárního reaktoru. Šlo o projekt společnosti NuScale (design pro výkon 55 MWe). Ta plánuje postavit elektrárnu o šesti reaktorech s celkovým výkonem 462 MWe. [26]

Na malé modulární reaktory upíná značnou pozornost i největší česká energetická společnost České energetické závody a.s. (ČEZ a.s.). Ten má v úmyslu postavit SMR v lokalitě Temelín. Na

konci roku 2022 skončil geologický průzkum a do konce roku 2024 chce mít ČEZ vybraný projekt. [27] Využití jaderných technologií v energetické transformaci intenzivně zvažuje i např. Moravskoslezský kraj. [28]

Společně s novým konceptem projektování se spojily i snahy o aplikaci technologií reaktorů, které se do současnosti neprosadily u velkých jaderných reaktorů. Projekty malých modulárních reaktorů jsou tak velice různorodé.

### 3.1 Současné projekty malých modulárních reaktorů

Jak již bylo řečeno, v souvislosti s novým konceptem projektování se spojily snahy o zavedení jaderných technologií, které se dosud neprosadily. V současnosti existují desítky velmi různorodých projektů soukromých i veřejných subjektů. Jsou ve velmi různorodých fázích vývoje, popř. realizace. U mnoha se však stále jedná o pouhé koncepty a studie.

Proto jsou zde primárně popsány především projekty, které jsou v pokročilejších fázích, již pracují na získání licence od státních dozorů, popřípadě ji již získaly nebo jsou už stavěny demonstrační jednotky. V úvahu byla také brána reálnost použití technologií v ČR, proto byla menší pozornost věnována projektům v zemích, s nimiž je menší šance navázání spolupráce v oblasti kritické infrastruktury. V následujících kapitolách jsou tyto projekty seřazeny abecedně a popsány.

*Tabulka 1 Malé modulární reaktory s perspektivou realizace [23]*

Název	Výkon (MWe)	Typ	Země	Stav
ACP100 Linglong One	125	PWR	Čína	Ve výstavbě
BREST-OD-300	300	LFR	Rusko	Ve výstavbě
BWRX-300	300	BWR	USA/Japonsko	Licencování
CAREM	32	PWR	Argentina	Ve výstavbě
Energy well	6	MSR	Česko	Projektování
HTR-PM	210	HTGR	Čína	V provozu
KLT-40	70	PWR	Rusko	V provozu
MMR	5	HTGR	USA/Kanada	Licencování
NuScale	77	PWR	USA	Licencování
Rolls-Royce SMR	470	PWR	UK	Licencování
SMART	100	PWR	Jižní Korea	Licencován
TMSR-LF1	10	MSR	Čína	Ve výstavbě
VBER-300	325	PWR	Rusko	Licencování

### 3.1.1 ACP100 Linglong One

Tento čínský projekt je založen na technologii tlakovodního reaktoru využívajícího lehkou vodu. Jeho navržený výkon je 125 MWe. Při projektování byl kladen velký důraz na možnost využití kogenerace s teplem pro účely vytápění, zejména pro potřeby průmyslu a pro možnost využití při odsolování mořské vody.

Na rozdíl od ruských návrhů je u tohoto reaktoru šestnáct parogenerátorů instalováno přímo do prostoru tlakové nádoby reaktoru. Palivový cyklus reaktoru je navržen na dva roky a celková životnost reaktoru až na 60 let. [29]

### 3.1.2 BREST-OD-300

BREST představuje ruský návrh rychlého reaktoru chlazeného olovem o elektrickém výkonu 300 MWe a tepelném 700 MWt. [30] Stavba reaktoru v lokaci poblíž města Tomsk byla schválena ruskými úřady v roce 2016 [31], v roce 2020 byly započaty přípravné práce a v roce 2021 samotná stavba.

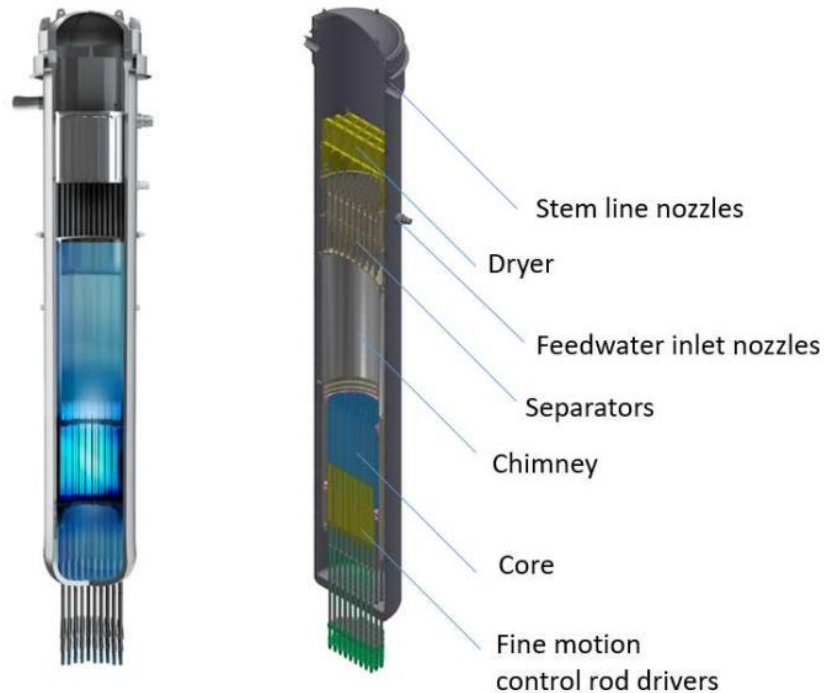
Výhodou využití olova je, že se jedná o vysoce inertní látku. Zároveň má velice výhodné termodynamické vlastnosti. Teplota varu je 1749 °C, proto je možné reaktor provozovat za vysokých teplot a zároveň nízkého tlaku. Omezujícím faktorem je koroze probíhající se zvyšující se teplotou, proto se i u těchto reaktorů obvykle využívá teplot do 300 °C. Vzhledem k absenci vody nemůže dojít k výbuchu vodíku vytvořeného teplotním rozkladem vody. [30]

### 3.1.3 BWRX-300

Jedná se o japonsko-americký projekt firem GE a Hitachi. Jako jediný z projektů malých modulárních reaktorů, které jsou v pokročilé fázi, představuje lehkovodní varný reaktor. Reaktor má projektovaný elektrický výkon 300 MWe. [32]

Reaktor bude využívat přirozené cirkulace chladiva v primárním okruhu a rozsáhlé pasivní bezpečnosti. Samotná tlaková nádoba reaktoru bude z větší části zapuštěna pod úroveň okolního terénu. Na obrázku níže je vidět, že kontrolní bórové tyče se vsouvají do aktivní zóny reaktoru zespodu. Pro případ ztráty napájení jsou vybaveny systémem natlakovaného dusíku přiváděného k jejich základně, jenž by tyče vytlačil vzhůru. Nad tyčemi se nachází zaplavená aktivní zóna, ze které pára proudí vzhůru do separátoru a vysoušeče, a z vrchní části tělesa

reaktoru je poté odváděna. Nad samotným reaktorem se nachází čtyři cylindrické bazény s vodou. [33]



Obrázek 3 Model reaktoru BWRX-300 [33]

#### 3.1.4 CAREM

CAREM je zkratkou Central Argentina de Elementos Modulares. CAREM je argentinský státní projekt malého modulárního reaktoru. Jedná se o první jaderný reaktor vyvinutý touto zemí. V rámci první fáze je budován reaktor s původním zamýšleným výkonem 25 MWe, který byl následně zvýšen na 32 MWe, s tepelným výkonem 100 MWt. V druhé fázi by měl být vybudován reaktor s výkonem 100-200 MWe. [34]

Reaktor je tlakovodní a využívá lehkou vodu jako moderátor a chladivo. Jeho konstrukce je výrazně podobná klasickým velkým jaderným reaktorům stejného typu.

Stejně jako mnohé další reaktory však využívá pro pohyb chladiva v primárním okruhu přirozenou cirkulaci. Odvod tepla zajišťuje systém parogenerátorů, kterých je dvanáct. Jsou umístěny po obvodu tlakové nádoby primárního okruhu. Stejně jako další malé reaktory je tedy sekundární okruh zaveden od tlakového tělesa reaktoru. [35]

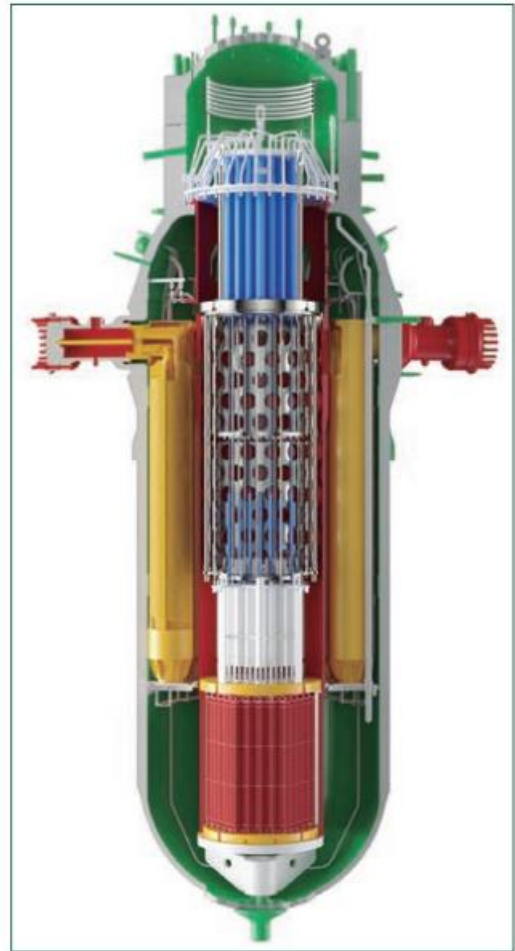
Fast Shutdown System (FSS) využívá šesti Ag-In-Cd tyčí pohlcujících neutrony. Ty jsou při normálním provozu drženy hydraulicky ve vysunuté poloze nad aktivní zónou. V případě ztráty elektrické energie dojde v jejich úchytech ke ztrátě tlaku a sjedou do aktivní zóny. [36]

Second Shutdown System (SSS) je složen ze dvou natlakovaných nádrží o objemu 1 m<sup>3</sup>, obsahujících borovou vodu, umístěných v horní partii tlakového tělesa reaktoru. S primárním okruhem jsou spojeny dvěma potrubními trasami. Jedna ústí ve vrchní části tlakového tělesa reaktoru a druhá pod úroveň hladiny. V případě selhání prvního havarijního systému dojde k otevření ventilů, proudění páry do nádrží a vytlačování borové vody. Každá nádrž je schopná utlumit řetězovou reakci v aktivní zóně.

Systém havarijního napájení dodává chladivo v případě LOCA (Loss of coolant accident, havárie se ztrátou chladiva) havárie, aby nedošlo k přehřátí aktivní zóny. Na schématu níže je značen číslem 3. Skládá se ze dvou nádrží s borovou vodou. Nádrže jsou natlakovány na 2,8 MPa. Při ztrátě chladiva a postupném utlumování reaktoru dojde k postupnému poklesu tlaku. Ve chvíli, kdy tlak klesne na 1,5 MPa, přetlak v nádržích otevře ventil a zaplaví reaktor. Systém poskytuje 36 hodin chlazení. [35]

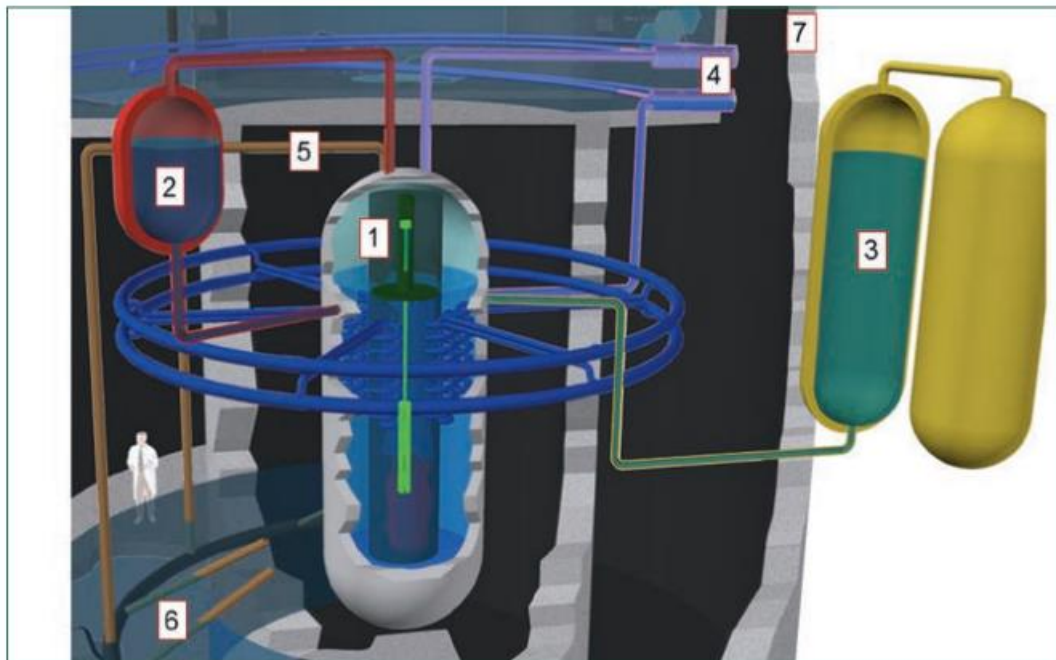
Passive Decay Heat Removal System (PHRS), představuje pasivní systém odvodu zbytkového tepla z reaktoru. Ten by byl aktivován v případě ztráty možnosti odvodu tepla sekundárním okruhem. Systém se skládá z u-trubkových tepelných výměníků, ke kterým je přiváděna pára z vrchní části reaktoru. Ta je po ochlazení a kondenzaci odváděna zpět potrubím zaústěným pod hladinou vody v reaktoru. Výměníky jsou umístěny ve vodním bazénu uvnitř kontejnmentu. [36]

Pokud by docházelo k nárůstu tlaku, vlivem velkého nepoměru mezi výkonem aktivní zóny a schopností odvádět teplo, je reaktor vybaven dvěma bezpečnostními ventily. Každý je schopen poskytnout dostatečnou kapacitu pro snížení tlaku, aby nedošlo k poškození tlakové



Obrázek 4 Řez reaktorem CAREM 25 [35]

nádoby reaktoru. Ventily jsou napojeny na potrubí, které je zavedeno do bazénu umístěného radiálně kolem spodní části reaktoru. [35]

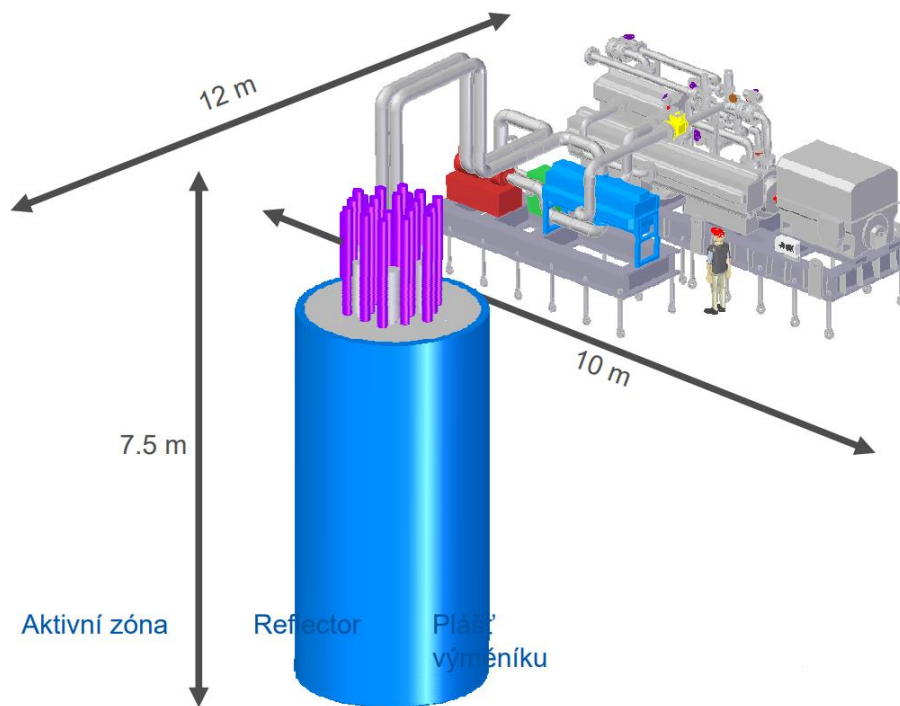


Obrázek 5 Carem-havarijní systémy [35]

Na obrázku výše můžeme vidět schéma reaktoru CAREM a bezpečnostních systémů. Číslem jedna jsou označeny řídicí tyče. Číslem dva je označen Second shutdown system, zobrazena je jedna ze dvou tlakových nádrží s borovou vodou. Systém havarijního napájení je označen číslem tři. Číslem čtyři jsou označeny hydroakumulátory. Pozice bezpečnostních ventilů je označena číslem pět a šest značí bazén, kam je zavedeno potrubí vedoucí od bezpečnostních ventilů.

### 3.1.5 Energy well

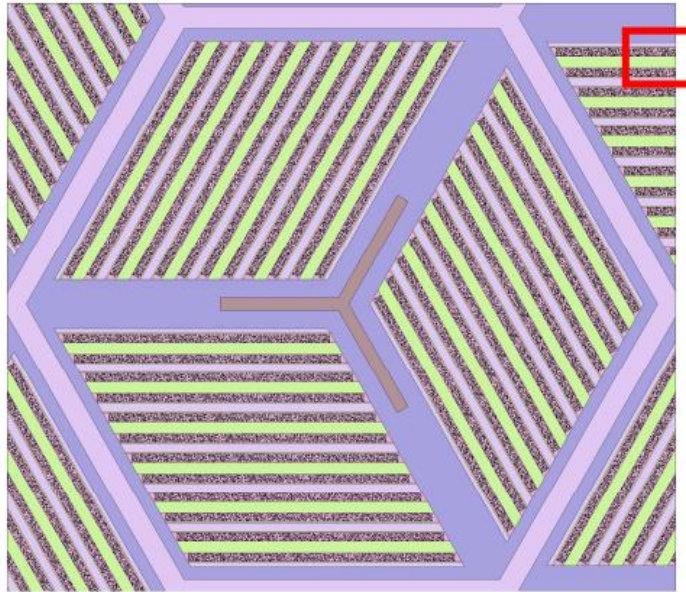
Energy well je koncept malého modulárního reaktoru vyvíjeného Ústavem jaderného výzkumu Řež. Navrhovaný reaktor má mít výkon 20 MWt. Je u něj kladen velký důraz na modularitu, snadnou transportovatelnost a jednoduchou instalaci. Jednotlivé chladicí okruhy by měly být transportovatelné jako samostatné jednotky. Dále je projektován s ohledem na dlouhou životnost a nízké požadavky na údržbu. [37]



Obrázek 6 Model Energy Well [37]

Reaktor je chlazen tekutými solemi. Primární okruh využívá FLiBe, sekundární NaFNab a terciální superkritický CO<sub>2</sub>. Tato konfigurace byla zvolena na základě několika požadavků. Primární chladivo mělo mít co největší tepelnou kapacitu, což umožní malý průtok chladiva a malý rozdíl vstupní a výstupní teploty. To povede ke kompaktnosti primárního okruhu a jeho komponentů. Vysoká provozní teplota poté povede k vysoké účinnosti přeměny energie.

Podobně jako čínský HTR-PM, využívá i tento projekt TRISO částice. Jedná se o drobné částice oxidu uraničitého, které jsou uzavřeny v několikavrstvých kapslích z pyrolytického uhlíku a karbidu křemíku. Toto uspořádání si dává za cíl udržet produkty štěpení uvnitř palivové částice a tím předejít kontaminaci chladiva a primárního okruhu. V případě nehody obal TRISO částic tvoří první bariéru a má potenciál udržet produkty štěpení uvnitř až do teploty 1800 °C. Na rozdíl od čínského návrhu, který využívá peletovou průchozí aktivní zónu, jsou TRISO částice v tomto návrhu umístěné v kosočtverci a mezi dvěma palivovými deskami se nachází jedna uhlíková. Celá sendvičová konstrukce je poté skládána s dalšími do palivové tyče. [37]

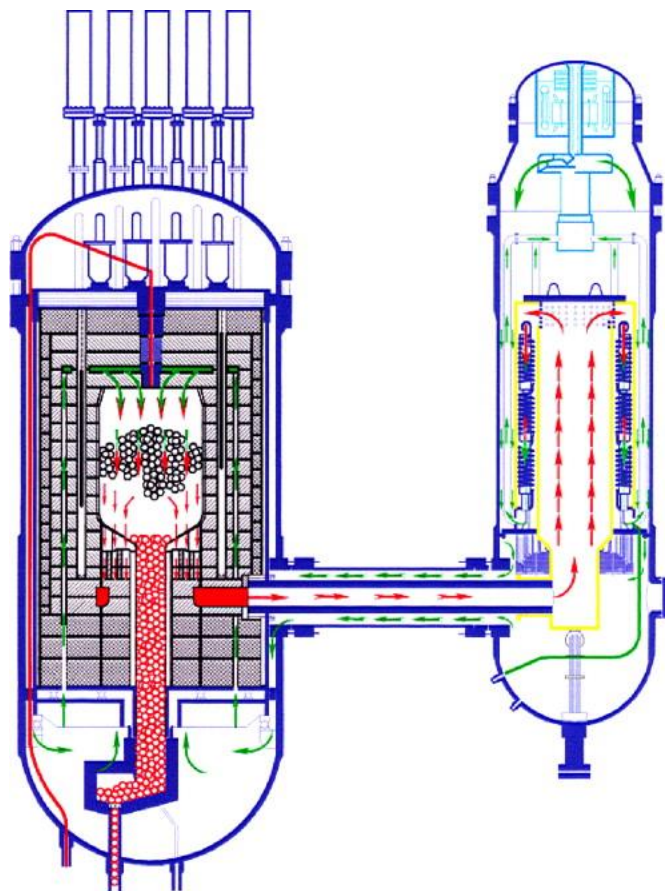


Obrázek 7 Palivové desky Energy well [37]

### 3.1.1 HTR-PM

Jedná se o čínský projekt. Je jedním z projektů v nejpokročilejší fázi. Zároveň se jedná o jeden z nejvíce progresivních návrhů.

Tento projekt využívá vysokoteplotní, plynem chlazený reaktor. Vstupní teplota chladiva je 250 °C a výstupní 750 °C. Navíc aktivní zóna není klasická, ale cirkulující s kulovým palivem. Místo palivových tyčí spuštěných do reaktoru je palivo umístěno v peletách procházejících reaktorem. Pelety jsou šesticentimetrové koule skládající se z pěticentimetrového jádra, ve kterém jsou v grafitu umístěná



Obrázek 8 HTR reaktor a parogenerátor [38]



zrníčka samotného paliva a vnějšího obalu z čistého grafitu. Zrníčka paliva mají průměr 1 mm, půlmilimetrové jádro je vyrobeno z oxidu uraničitého a vnější obal ze tří vrstev pyrolytického uhlíku a jedné vrstvy karbidu křemíku. Využívané chladivo je hélium a moderátorem je grafit, který je součástí palivových pelet.

Tlakové nádoby byly instalovány již v roce 2016 a 12.října, respektive 11.prosince 2021, dosáhly reaktory tohoto projektu kritičnosti. Dva reaktory pracují v tandemu a pohání jednu parní turbínu s generátorem o výkonu 210 MWe. [38]

### 3.1.2 KLT-40

Jedná se o tlakovodní reaktor ruského původu používající lehkou vodu jako moderátor a chladivo. Reaktor má elektrický výkon 70 MWe. Byl vyvinut z reaktorů OK-150 a OK-900, určených pro použití jako lodní pohony. I samotný reaktor KLT-40 byl vyvinut primárně pro pohon ledoborců třídy Tamyr určených pro provoz v Severním ledovém oceánu.

Varianta KLT-40 S byla instalována na plovoucí elektrárnu Akademik Lomonosov, která dodává elektřinu v odlehlých oblastech severní Sibíře. Je charakteristický použitím paliva s obohacením do 20 %. [39]

Z reaktoru KLT-40 byly vyvinuty reaktory RITM-200 produkující 55 MWe. První byl spuštěn v roce 2019, opět byly primárně určeny pro pohon nové generace ledoborců [40], ale v roce 2020 Rosatom oznámil plán instalovat pozemní verzi pro dodávky tepla a elektřiny do odlehlých oblastí v Yakutsku. [41]

Reaktor KLT-40 je stejně jako reaktor VBER-300 velice podobný velkým jaderným reaktorům. Používá hlavní cirkulační čerpadla pro oběh chladicí vody primárním okruhem k parogenerátorům umístěným v samostatných tlakových tělesech. [29]

KLT-40, stejně jako z něj vyvinutý RITM-200, vynikají mezi ostatními malými modulárními reaktory využitím vysoce obohaceného uranu jako paliva. Ten by měl být obohacen v rozmezí 30-40 %. [42]

### 3.1.3 MMR

Micro modular reactor (mikro modulární reaktor) je kanadsko-americký projekt, který je v současné době ve fázi získávání licence od kanadského regulátora. [43]

Při včasné získání licence by měla být jednotka vybudována již v roce 2026. Reaktor s výkonem 5 MWe a tepelným výkonem 16 MWt by, kromě dodávek elektrické energie do sítě, měl skrze výměník využívat tekuté soli dodávat procesní teplo blízké továrně.

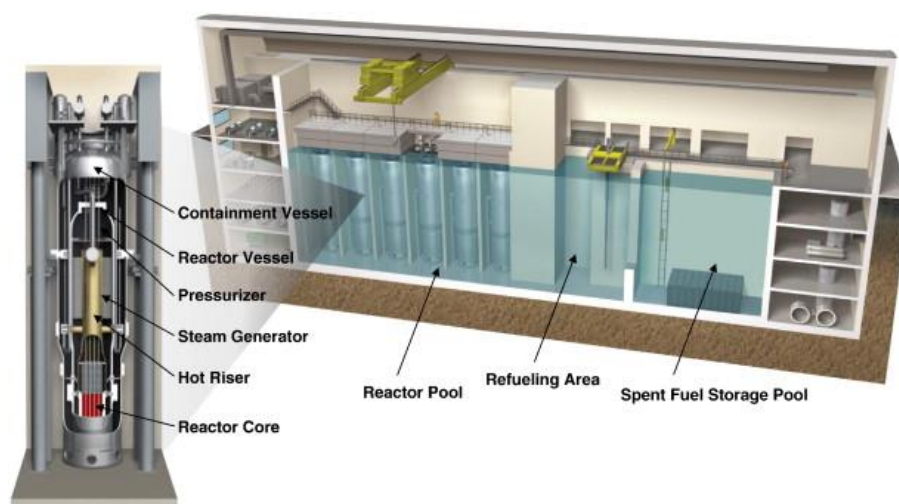
Tento reaktor je vysokoteplotní, plynem chlazené konstrukce. Stejně jako čínský reaktor HTR-PM využívá palivové TRISO částice, které slibují velmi vysoký bezpečnostní standard při kontrole šíření produktů štěpení. [44]

### 3.1.4 NuScale

NuScale je lehkovodní reaktor, který má produkovat 77 MWe. Tento projekt se skládá z modulů, v nichž je umístěn reaktor, parogenerátor a další komponenty primárního okruhu. Vše je obklopeno ocelovým kontejnmentem.

Moduly reaktorů mají být po několika umístěny v podzemní vodní nádrži. V současnosti firma nabízí projekty VOYGR 4, 6, 12, číselované podle počtu reaktorů v jednom bazénu, tedy 4, 6, a 12 reaktorů. Chladicí smyčky primárního okruhu využívají přirozenou konvekci a vyřazují tak hlavní cirkulační čerpadla, jinak zdroje rizika v případě poruchy. Také se jedná o nákladnou komponentu. [22]

Na obrázku níže můžeme vpravo vidět vizualizace elektrárny se šesti moduly umístěnými v bazénu zapuštěném v zemi. Vlevo pak řez modulem. Z vnějšku vše obklopuje ocelová nádoba kontejnmentu, uvnitř se nachází samotný reaktor a jeho aktivní zóna ve spodní části. Nad nimi jsou umístěny dva parogenerátory.



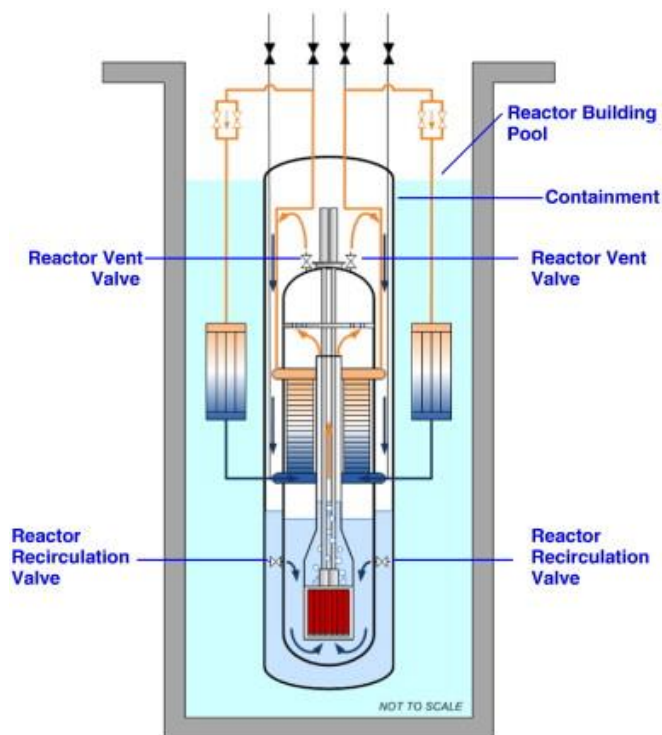
Obrázek 9 Model modulu (vlevo) a 12 modulové elektrárny (vpravo) [22]

NuScale se svým návrhem, jako mnoho jiných subjektů, cílí na vysokou bezpečnost, která v některých směrech vysoce překonává projekty klasických jaderných reaktorů. Stěžejní je konstrukce kontejmentu, jenž je konstruován na tlak až 5,5 MPa. To představuje až dvanáctinásobek současných kontejmentů jaderných reaktorů. Tak vysoké odolnosti lze dosáhnout díky výraznému zmenšení celého primárního okruhu umožňujícím zmenšení kontejmentu.

Jak už bylo řečeno, moduly budou ponořeny v podzemním bazénu. To by naznačovalo, vzhledem k ocelové konstrukci, značné zvýšení tepelných ztrát. Tomu je zabráněno odsátím atmosféry v prostoru mezi stěnou kontejmentu a stěnou primárního okruhu při běžném provozu. Primární okruh je tak izolován vakuem a nepotřebuje další izolaci.

Vakuem v kontejmentu má další významné důsledky. V případě nouzové situace, při které dojde k uvolnění páry ventilem do tohoto prostoru, vakuum výrazně zlepšuje kondenzační podmínky. Zároveň v případě hypotetické vážné havárie vakuum snižuje možnost výbuchu způsobeného vznikem vodíku při vysoké teplotě a jeho následnou reakcí se vzduchem.

Ponoření celého modulu ve vodním bazénu je koncepčním vylepšením klasického přístupu, ve kterém dochází k nouzovému chlazení pomocí vody čerpané z externích nádrží. NuScale potápí celý kontejment, a tak z investičního, údržbového a zejména bezpečnostního hlediska eliminuje nutnost používání čerpadel a eliminuje možnost nefunkčnosti celého systému způsobené nefunkčností dopravy havarijního chlazení k reaktoru poškozením čerpadel nebo potrubních tras. [22]



Obrázek 10 NuScale-havarijní chlazení [22]

DHR – decay heat removal systems – systémy odvádění zbytkového tepla jsou systémy, které využívají sekundární okruh jako havarijní systém. Tento přístup lze použít vzhledem k tomu, že NuScale nepoužívá hlavní cirkulační čerpadla, ale voda je transportována mezi aktivní zónou a parogenerátorem přirozenou cirkulací. Tímto způsobem je teplo odváděno do sekundárního okruhu, který má havarijní smyčku zavádějící chladivo do výměníků ponořených v bazénu. Smyčka využívá přirozené cirkulace a vypařování vody a nepotřebuje pro splnění své funkce funkčnost čerpadel sekundárního okruhu. [45]

Druhým havarijním systémem je ECCS – Emergency core cooling system, tedy systém nouzového chlazení aktivní zóny. Je to systém otevření dvou ventilů v horní partii reaktoru a dvou ventilů ve spodní partii reaktoru umožňujících recirkulaci chladiva. V aktivní zóně by docházelo k ohřátí a vypaření vody, následně by pára stoupala vzhůru, prošla by ventily mimo primární okruh do prostoru ve vrchní části kontejnmentu (která je stále ponořena v bazénu), kde by pára kondenzovala a stékala podél stěny kontejnmentu do spodní zaplavené části. Tam by sloužila k odvodu tepla konvekci ve směru aktivní zóna-chladivo-stěna primárního okruhu, voda v prostoru kontejnmentu-stěna kontejnmentu a odvod tepla do vody v bazénu. Zároveň by přirozeně cirkulovala zpět do prostoru aktivní zóny, kde by se odpařovala a opakovala tak celý oběh.

Bazén, ve kterém je modul ponořen, je dimenzován tak, aby zvládal částečně pohltit tepelnou energii produkovanou při utlumování reaktoru. Voda přirozenou cirkulací bude odvádět teplo do okolí. To však není dostatečné. Bude tedy docházet k postupnému odpařování vody v bazénu, ke kterému bude docházet s postupným utlumováním reaktoru během třiceti dnů. Poté bude tepelný výkon reaktoru tak malý, že bude stačit odvod vzduchem pro chlazení zbytkového tepla. [45]

### 3.1.5 Rolls Royce SMR

Britská firma Rolls Royce pracuje na projektu tlakovodního reaktoru využívajícího lehkou vodu jako moderátor a chladivo se třemi chladíci smyčkami. Projekt se někdy označuje také jako UK SMR. [46] Výkon měl být původně 420 MWe, následně byl zvýšen na 470 MWe. Překračuje tak definici z pohledu IAEA, ale dále je považován za SMR. [47] Z pohledu koncepce a modularity překonává ostatní projekty. Při projektování tohoto designu byly v maximální možné míře omezeny práce na staveništi. Reaktor a ostatní systémy by měly dorazit na místo výstavby již v modulech připravených na rychlou instalaci. [47]

V současnosti je projekt ve fázi získávání licence od regulátora a firma Rolls Royce zkoumá osm možných lokací pro stavbu prvních tří reaktorů. Celkově má v plánu postavit 22 reaktorů. [48] Rolls Royce již oznámil i plánovanou dobu stavby. Dva roky potrvá příprava lokace a 500 dní samotná instalace bloku. [49]

### 3.1.6 SMART

SMART (System-integrated modular advanced reactor) je návrh modulárního reaktoru vyvíjený Korejským institutem pro výzkum jaderné energie. Reaktor má projektovaný elektrický výkon 100 MWe při tepelném výkonu 330 MWt. Kromě výroby elektrické energie je zamýšlen i s možností využití tepla pro odsolování mořské vody. Při elektrickém výkonu 90 MWe by byl schopen produkovat 40 000 tun vody denně, dostatek pro 100 000 obyvatel. Reaktor byl již certifikován v Jižní Koreji, po změně designu probíhá nové kolo certifikace. [21]

SMART je tlakovodní reaktor využívající lehkou vodu jako moderátor a chladivo. Tento design spoléhá z velké části na prověřené technologie použité u větších bloků. Liší se, jako mnoho dalších SMR, zavedením svých osmi parogenerátorů přímo do tlakového tělesa reaktoru. Chladící voda v reaktoru je cirkulována díky čtveřici čerpadel. Ve vrchní části reaktoru se

nachází kompenzátor objemu, v němž je mix vodní páry a plynného dusíku. Ten nepoužívá sprchu a elektrický ohřev, je řízen pomocí parciálního tlaku dusíku. [50]

Bezpečnostní systémy se skládají z možnosti shození řídicích tyčí do reaktoru. V případě jejich selhání je připraven zdvojený systém injekce borové vody do reaktoru. Reaktor je též vybaven systémem pro pasivní odvod tepla v konfiguraci 4 x 50 % schopný chladit reaktor po dobu 72 hodin. Pro případ LOCA havárie je připraven systém havarijního napájení v konfiguraci 2 x 100 %. A pro případ nárůstu tlaku jsou umístěny dva bezpečnostní ventily, které se při 17 MPa otevrou a umožní přepuštění části chladící kapaliny do připravených nádrží. [50] Změn bylo dosaženo zejména u bezpečnosti, a to kladením většího důrazu na pasivní a inherentní bezpečnostní a havarijní systémy.

### 3.1.7 TMSR-LF1

Tento výzkumný projekt patří k nejprogresivnějším návrhům. Zkratka pochází z názvu Thorium molten salt reactor-liquid fuel, thoriový reaktor využívající roztavených solí s tekutým palivem. Jak z názvu vyplývá, tento projekt je založen na použití tekutých solí, specificky FLiBe, jako chladiva v primárním okruhu. K tomu na rozdíl od většiny ostatních návrhů využívá jako palivo namísto samotného oxidu uraničitého mix uranu obohaceného na téměř 20 % a thoria. Provozní teploty jsou na dvakrát vyšších hodnotách oproti klasickým tlakovodním reaktorům, vstupní teplota chladiva do reaktoru dosahuje 560 °C a výstupní 580 °C. Jako moderátor je využit grafit. Výkon reaktoru je 2 MWt. [51]

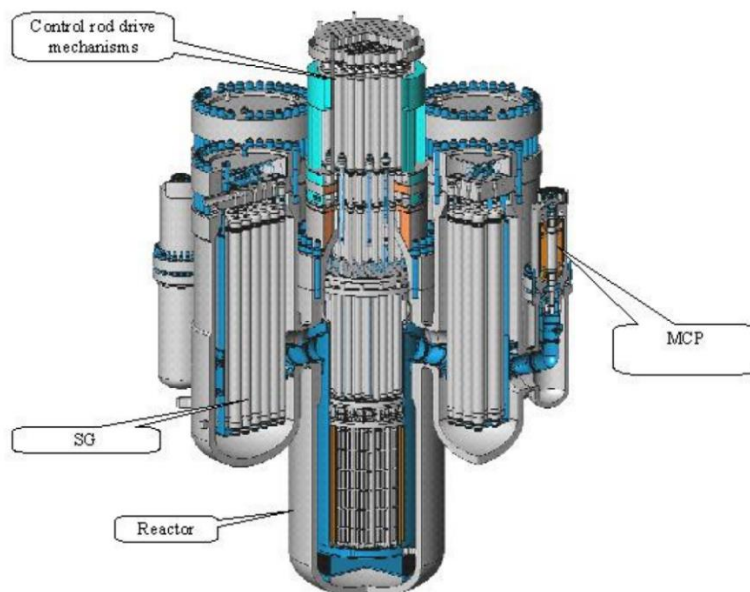
Výstavba reaktoru začala v roce 2018 a byla údajně hotova v roce 2021. V srpnu roku 2022 bylo oznámeno, že reaktor splnil státní certifikaci. V roce 2023 je očekáván start provozu. [52]

### 3.1.8 VBER-300

VBER-300 je reaktor odvozený od lodního reaktoru. I tento reaktor je proto navržen s ohledem na možnost použití na lodi. Jak název napovídá, jeho původní zamýšlený výkon byl 300 MWe. Ten byl posléze zvýšen na 325 MWe, takže již nespadá dle většiny definic (např. IAEA) mezi malé modulární reaktory, přesto se k nim stále řadí. [53]

Tento reaktor patří k těm, které jsou velmi podobné klasickým jaderným reaktorům. Je to tlakovodní reaktor používající lehkou vodu. K předání tepla dochází ve čtyřech parogenerátorech umístěných mimo nádobu reaktoru, k nimž je voda dodávána pomocí hlavních cirkulačních čerpadel. I bezpečnostní systémy odpovídají z velké části velkým

reaktorům. V případě nehody by došlo k pádu tyčí pohlcujících neutrony. Reaktor je dále vybaven systémem havarijního napájení a hydroakumulátory. [54]



Obrázek 11 Reaktor VBER-300 [53]

## 4 Jaderná bezpečnost

Jaderná bezpečnost jako obor představuje úsilí k ochraně zdraví a životního prostředí před škodlivými účinky ionizujícího záření (radioaktivity).

Jadernou bezpečností se v České republice primárně zabývá Statní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB). Ten má pole své působnosti vymezené legislativou a soustředí se zejména na dozor ve všech pracovištích se zdroji ionizujícího záření (jaderné elektrárny, výzkumná pracoviště, lékařská pracoviště).

Dále vede celostátní evidenci zdrojů ionizujícího záření a celostátní evidenci profesního ozáření (ozáření, kterému jsou vystavováni lidé v důsledku výkonu své profese). SÚJB také koordinuje aktivitu celostátní sítě pro monitorování radiace a řídí výměnu získaných dat na mezinárodní úrovni. [55]

### 4.1 Stupnice INES

Stupnice INES (The International Nuclear Event Scale) je mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí. Byla zavedena v březnu 1990 Mezinárodní agenturou pro jadernou energii (IAEA) společně s Agenturou pro jadernou energii Organizace pro ekonomickou spolupráci a rozvoj (OECD/NEA). Jejím primárním účelem je usnadnit komunikaci a dorozumění mezi odborným nukleárním společenstvím, sdělovacími prostředky a veřejností v případech výskytu událostí na jaderných zařízeních i jakékoliv události spojené s radioaktivním materiálem nebo s radiací, včetně přepravy radioaktivních materiálů.

Stupnice zařazuje události do sedmi stupňů: stupně 1 až 3 se označují jako nehody, stupně 4 až 7 se označují jako havárie. Události, které nemají žádný bezpečnostní význam a jsou klasifikovány stupněm 0 (pod stupnicí), se nazývají odchylky. Události, které vůbec nesouvisí s bezpečností, se označují jako události mimo stupnici. [55] Stupnice INES je zobrazena vpravo

Stupeň sedm zatím nastal pouze dvakrát, v případě havárie v Černobylu v roce 1986 a ve Fukušimě v roce 2011. Šestý stupeň byl dosažen při Kyštymské nehodě, kdy došlo k výbuchu a úniku radioaktivního materiálu v závodu na zpracování radioaktivního odpadu v tehdejší Sovětské svazu. Pátý

<b>7</b> <b>VELMI TĚŽKÁ HAVÁRIE</b>
<b>6</b> <b>TĚŽKÁ HAVÁRIE</b>
<b>5</b> <b>HAVÁRIE S RIZIKEM VNĚ ZAŘÍZENÍ</b>
<b>4</b> <b>HAVÁRIE BEZ RIZIKA VNĚ ZAŘÍZENÍ</b>
<b>3</b> <b>VÁŽNÁ NEHODA</b>
<b>2</b> <b>NEHODA</b>
<b>1</b> <b>ANOMÁLIE</b>
<b>0</b> <b>ODCHYLKA</b>

Obrázek 12 Obrázek 11  
Stupnice INES [55]



stupeň představuje nehoda a únik radioaktivního materiálu v americké elektrárně Three Mile Island. [56] Havárie v elektrárně Jaslovské Bohunice v roce 1977 byla klasifikována stupněm 4. [57]

## 4.2 PSA

Probability safety assessment, pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti (PSA), je jedna ze základních metod hodnocení bezpečnosti jaderných zařízení. Základním cílem jaderné bezpečnosti je ochrana aktivní zóny. Tu lze definovat podle tří základních funkcí. Kontrola nad reaktivitou – schopnost zabránění nechtěného nárustu reaktivity a schopnost rychlého utlumení reaktoru v případě potřeby. Odvádění tepla – chlazení reaktoru a použitého paliva. Kontrola nad pohybem radioaktivního materiálu a částic – zabránění úniku těchto látek do životního prostředí. [58]

Cílem PSA je přispět k pochopení problematiky a jaderné bezpečnosti a snížit pravděpodobnosti havarijní situace. V USA je jako cíl určena v okruhu jedné míle okolo elektrárny pravděpodobnost  $5 \times 10^{10}$  předčasného úmrtí a v okruhu deseti mil od elektrárny  $2 \times 10^6$  pro vznik rakoviny.

Přidružené cíle jsou, aby frekvence poškození aktivní zóny nebyla větší než  $10^{-4}$ , tedy ne více než jednou za 10 000 reaktorových let. Frekvence velkého úniku radioaktivního materiálu by neměla přesahovat  $10^{-5}$ , tedy ne více než jednou za 100 000 reaktorových let. [59]

Díky tomu, že je aplikace PSA celosvětová, a zároveň panuje důraz na jadernou bezpečnost a vědomí rizika z jiných zemí, je v tomto oboru běžné rozsáhlé sdílení zkušeností napříč jednotlivými aktéry v rámci jednotlivých států, i na mezinárodní úrovni. [58]

Na mezinárodní úrovni byla nalezena shoda v přístupu, jak realizovat a aplikovat pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti. Nejvýznamnějšími návody jsou americký NUREG-300-PRA Procedures guide [60] a NUREG-2815-PSA Procedures guide [61] a návody IAEA pro analýzy PSA.

## 4.3 Legislativa

Rozvoj PSA, a vývoj legislativy šly během historie ruku v ruce a často se vzájemně určovaly. Dnes je PSA respektována jako zásadní metoda k určování a zajišťování náležité úrovně bezpečnosti v jaderné energetice. Zpracování PSA je ve většině zemí s civilním jaderným

programem stanoveno zákonem jako podmínka pro spuštění a pokračování provozu jaderných elektráren. [59]

Na jaderné elektrárny na území ČR se vztahuje vyhláška č. 162/2017 Sbírky zákonů [62], která zakotvuje požadavek na zpracování PSA analýz pro 1. Úroveň a 2. Úroveň. Dále jsou určeny požadavky bezpečnostním návodem SÚJB BN – JB – 1.6 – Pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti. [63]

#### 4.3.1 Historie PSA

PSA byla původně vyvinuta pro vojenské použití, ze kterého se postupně začala aplikovat v rostoucím počtu civilních oborů. Velkého významu nabyla se startem masového civilního letectví a s rozvojem programů na dobývání vesmíru. Aplikace se dočkala také v chemickém sektoru.

Začátek PSA se datuje již do šedesátých let minulého století do USA. Zde byly její základy poprvé nasazeny při snižování rizika nenadálého startu raket s jadernými hlavicemi. [59]

S perspektivou rozvoje jaderné energetiky a velkých reaktorů vyvstávali otázky ohledně případných havárií takových zařízení. Stanovení pravděpodobnosti bylo považováno za příliš náročné vzhledem k úrovni tehdejších poznatků, a tak bylo úsilí směřováno na stanovení maximálních škod.

Na počátku byly vytvářeny prediktivní modely. První predikce počítali s uvolněním 1-10 % produktů štěpení. Na jejich základě byla vypracována strategie umístování jaderných reaktorů.

V roce 1957 byla prezentována výzkumná zpráva USAEC WASH-740. V ní byly popsány důsledky teoretické havárie obnášející únik 50 % produktů štěpení z aktivní zóny do atmosféry. Tato zpráva při vytváření závěrů počítala s nejnepříznivější variantou povětrnostních podmínek. Výsledkem byl odhad 3400 ztrát na lidských životech, poškození zdraví dalších 43 000 lidí a škod na majetku v rozsahu 7 miliard dolarů. To vyvolalo rozsáhlý nepříznivý ohlas veřejnosti. Poté byl zaveden deterministický přístup v hodnocení rizik na základě dohodnutých limitních hodnot.

V sedmdesátých letech docházelo k výpočtům hypotetických havárií a ke snahám o určení pravděpodobnosti výskytu. [64]

V roce 1971 byla publikována analýza WASH 1400, první analýza využívající pravděpodobnostní přístup, zkoumající tlakovodní reaktor Surry-1 a varný reaktor Peach bottom-2. Výsledky byly

extrapolovány pro dalších 100 jaderných bloků. WASH 1400 aplikovala metody stromů poruch a stromů událostí a zohledňovala poruchy se společnou příčinou.

Proto byla PSA v roce 1975 v Reactor safety study přenesena do jaderné energetiky pro zhodnocení bezpečnosti jaderných elektráren v USA. PSA se rozvíjela a o čtyři roky později se tento rozvoj ještě zesílil po incidentu v americké jaderné elektrárně Three Mile Island. [65]

Stejného roku došlo shodou okolností k publikování významné studie v Německu týkající se tamních jaderných elektráren, která stála u rozvoje této metody v jedné z největších energetik v Evropě. [59]

V roce 1986 došlo v jaderné elektrárně Černobyl k největší a nejznámější jaderné havárii. V návaznosti na ní byla zpochybňována budoucnost jaderné energetiky, a proto analýza rizik s ní spojených a zvyšování bezpečnosti jaderných zařízení nabyly nového významu.

V moderní době byla PSA ovlivněna zejména teroristickými útoky z 11. září 2001. Ty vedly k vytvoření požadavku na odolání kontejnmentu při nárazu dopravního letadla. V roce 2011 po velkém tsunami, které zasáhlo východní pobřeží Japonska došlo k, po Černobylu, druhé největší jaderné havárii v elektrárně Fukushima I. Ta měla podobný efekt jako havárie Černobylu. Opět nastalo zpochybňování budoucnosti jaderné energetiky a snaha obhajovat pokračování využívání jaderných technologií zvyšujícími se bezpečnostními standardy.

#### 4.4 Základní pojmy

Riziko

Všechny činnosti člověka v sobě zahrnují a často také vytvářejí nějaká rizika. Při provozu jaderných zařízení je třeba se těmito riziky zabývat, vzhledem k vážnosti potenciálních následků, na velmi vysoké úrovni.

Pro definici rizika můžeme využít vzorec:

$$R = \frac{N}{t * M}$$

Kde  $N$  představuje počet poškození na zdraví vlivem dané činnosti,  $t$  je celková doba dané činnosti a  $M$  definuje počet osob v dané činnosti aktivních.

Můžeme uvažovat vzorek 100 000 kuřáků, které budeme sledovat v průběhu deseti let. Pokud bude počet 5000 sledovaných mít poškozené zdraví vlivem kouření, pak si můžeme kvantitativně vyjádřit míru rizika poškození zdraví jedince  $5 \times 10^{-3}$ . [59]

Po stanovení rizik, např. činnosti nebo technologie, si pro rozhodování musíme stanovit přípustnou míru rizika. Pro tu se využívá i termín as low as reasonably achievable (ALARA), tedy nejnižší rozumně dosažitelná. [66]

Pro její stanovení můžeme využít srovnání s již zavedenou technologií, což však může být problematicky aplikovatelné. Jako alternativu můžeme využít srovnání užitku a případných škod ve stejných jednotkách, typicky vyjádřených v penězích, což nám umožní srovnání při výběru z několika možností. Hodnotit můžeme přípustnou míru rizika také z pohledu efektivity nákladů na jeho snížení. Obecným pravidlem je, že efektivita nákladů na zvýšení bezpečnosti klesá exponenciálně. [59]

Pro riziko je zásadní jeho přípustná míra. Ta je stanovena každým člověkem, popř. kolektivně veřejností, a jedná se o neracionální parametr. Výzkum přijatelné úrovně rizika ukázal, že přijatelné riziko odpovídá přibližně třetí mocnině prospěchu z dané činnosti. Důležitým poznatkem bylo také, že lidé mají tendenci připouštět až 1000x větší riziko u dobrovolných činností, kdy mají kontrolu nad tím, jestli jsou riziku vystavení nebo ne. Například nehoda letadla s desítkami mrtvých má menší vliv než nehoda, u které lidé nekontrolují, zda jsou ji vystaveni (jaderná havárie). Tyto případy mají i pro malé škody významný společenský dopad. [59]

Riziko	Přijatelnost veřejností	Stupeň opatření	Opatření
$10^{-3}$	Nepřijatelná rizika	Maximální opatření ke snížení rizika	Opatření ke snížení rizika bez ohledu na prostředky
$10^{-4}$	Mírná opatření	Lidé jsou ochotni obětovat peníze	Požární sbory, policie, ohrazení nebezpečných míst
$10^{-5}$	Aktivní rozpoznávání náhodného rizika	Lidé jsou ochotni akceptovat omezení	Varování, výstrahy, akceptace omezení
$10^{-6}$	Jedinec neregistruje	„To se mě nemůže stát“	Analýzy následků
$10^{-7}$	Fatalismus v hodnocení rizika	„Nedá se nic dělat“ „Vyšší moc“	Žádná

Obrázek 13 Rizika [59]

Následující tabulka nám dává představu o rizicích běžných činností a rizicích různých havárií v kontextu k riziku havárie jaderné elektrárny.

ČINNOST	ČETNOST ÚMRTÍ [1/rok]
<b>DOBROVOLNÁ RIZIKA</b>	
Jízda na motocyklu	$2,0 \times 10^{-2}$
Automobilové závody	$1,2 \times 10^{-3}$
Kouření (20 cigaret denně)	$5,0 \times 10^{-3}$
Řízení automobilu	$1,7 \times 10^{-4}$
Horolezectví	$1,4 \times 10^{-4}$
Pití alkoholu (1 láhev denně)	$7,5 \times 10^{-5}$
Fotbal	$2,0 \times 10^{-5}$
<b>NEDOBROVOLNÁ RIZIKA</b>	
Úrazy v domácnosti	$1,1 \times 10^{-4}$
Pády	$9,0 \times 10^{-5}$
Leukémie	$8,0 \times 10^{-5}$
Přejetí motorovým vozidlem	$6,0 \times 10^{-5}$
Požáry	$4,0 \times 10^{-5}$
Utopení	$3,0 \times 10^{-5}$
Střelné zbraně	$1,0 \times 10^{-5}$
Pracovní úrazy (strojírenství)	$1,0 \times 10^{-5}$
Letecká doprava	$9,0 \times 10^{-6}$
Železniční doprava	$4,0 \times 10^{-6}$
Blesk	$5,0 \times 10^{-7}$
Větrná smršť	$4,0 \times 10^{-7}$
Úniky z JE ve vzdálenosti 1 km (Anglie)	$1,0 \times 10^{-7}$
Pád meteoritu	$6,0 \times 10^{-11}$

Obrázek 14 Rizika vybraných činností [59]

Pravděpodobnost

Existují tři definice pravděpodobnosti: **klasická, statistická a axiomatická.**

**Klasická definice:** Pravděpodobnost libovolné události se rovná poměru počtu náhodných pokusů odpovídajících uvažované události k celému počtu možných náhodných pokusů. Klasická definice platí, jestliže je možno pravděpodobnost předpovídat na základě symetrie podmínek, za kterých pokus probíhá. Příkladem symetrie a úplného využití podmínek, pro které klasická definice platí, je hození mince, kdy výskyt obou možností, znaku a hlavy, je stejný.

**Statistická definice:** Necht'  $n$  je počet náhodných pokusů, při kterých náhodná událost  $A$  nastala  $m$ -krát, tedy s relativní četností  $m/n$ . Pravděpodobnost  $P(A)$  náhodné události  $A$  se nazývá také číslo  $p$ , pro které platí, že  $m/n$  se tím víc blíží k  $p$ , čím je  $n$  vyšší.

**Axiomatická definice:** Necht' existuje množina vzájemně se vylučujících událostí (elementárních událostí) a událost je podmnožina systémů navzájem se vylučujících událostí.

[59]

Potom každé náhodné události je přiřazena pravděpodobnost  $P(A)$ , což je číslo, pro které platí:

$$0 \leq P(A) \leq 1$$

[59]

CCF – Common Cause Failure – porucha ze společné příčiny

CCF představuje takový typ poruchy, která má vliv na několik zařízení naráz a způsobí jejich neprovoznost. Mezi příčiny takové poruchy se řadí chyby v projektu, ve výrobě, v provozu, jako například špatná kalibrace nebo únava materiálu, a nakonec vlivy vnějšího prostředí, zejména prašnost, teplota nebo radiace. [67]

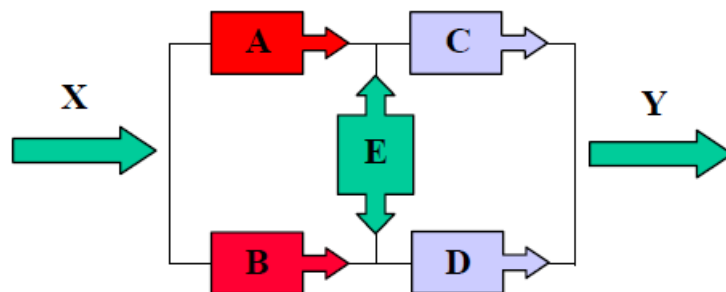
HRA – Human Reliability Analysis – analýza lidské spolehlivosti

Lidský faktor je pro bezpečnost zásadní, jak se projevilo například v notoricky známé Černobylské nehodě. V té, stejně jako ve většině ostatních, patřil lidský faktor k těm určujícím. PSA rozděluje lidský faktor a jeho vliv na tři části. Na ten před iniciační událostí (špatná údržba, nastavení systémů, kalibrace čidel), na lidský faktor, který může způsobit iniciační událost (například na chybu v manipulaci) a na lidský faktor během odezvy na danou událost. [59]

Minimální kritické řezy

Kritické řezy představují skupinu prvků systému, které musí selhat pro to, aby došlo k selhání systému.

Minimální kritický řez je skupina prvků, u nichž pokud nedojde k selhání alespoň jednoho, pak nedojde k selhání celého systému. [59]

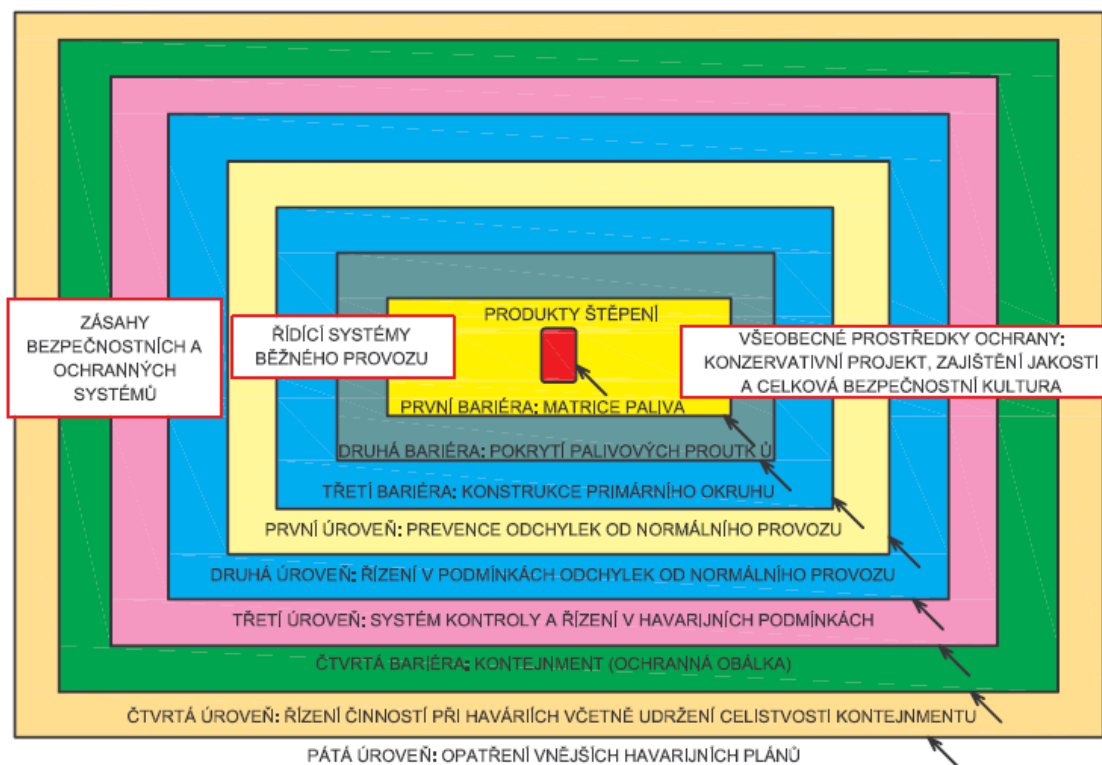


Obrázek 15 Minimální kritické řezy [59]

## Obrana do hloubky (Defence in depth)

Obrana do hloubky představuje koncept vrstvení opatření pro prevenci a kontrolu šíření radioaktivních látek.

Od samotné palivové pelety můžeme postupovat skrze palivovou tyč, která slouží jako první bariéra, přes vodu v reaktoru, reaktor samotný, havarijní zařízení a kontejnment, až po vnější prvky, např. zabezpečení vnější fyzické bezpečnosti policií ČR, bezpečnostní službou a armádou ČR (zajišťující bezletovou oblast). [68]



Obrázek 16 Obrana do hloubky [64]

## Living PSA

Living PSA (LPSA) je aktualizování PSA ke kvantifikaci průměrného rizika při provozu jaderné elektrárny. Představuje aktuální stav zařízení ovlivněného nepohotovostí systémů způsobený údržbou, možnými změnami projektu apod. [59]

## Porucha se společnou příčinou

Při hodnocení pravděpodobnosti je třeba zohlednit možnost selhání na sobě na první pohled nezávislých prvků systému na základě společné příčiny. Problémy s údržbou, špatný design nebo chyby ve výrobě mohou ovlivnit havarijní systémy v samostatných divizích. [59]

## 4.5 Přístupy k hodnocení bezpečnosti

### 4.5.1 Deterministický

Deterministický přístup hodnocení pravděpodobnosti vychází ze zkušenosti a know-how, pomocí kterých definuje potenciální nehody a havarijní scénáře. Ty si definuje až do úrovně nejzávažnější projektové havárie jaderného zařízení. Pro tyto scénáře se poté určují bezpečnostní opatření a provádí analýzy projektu a jeho schopnosti scénářům odolávat, popřípadě minimalizovat jejich dopady. [59]

Deterministický přístup nezahrnuje ve své metodice hodnocení spolehlivosti či pravděpodobnost selhání daných systémů, ať už provozních nebo havarijních.

Tím pádem tento přístup neposkytuje možnost, jak bezpečnost kvantifikovat, a poté měřit a kontrolovat dosahování patřičných standardů. Nabízí pouze posouzení, zda jaderné zařízení může být provozováno, pokud plní všechny definované požadavky, nebo ne. [59]

U deterministického přístupu může dojít zkreslením lidského úsudku k příliš vysokému zaměření na závažné nehody zařízení (prasknutí hlavního potrubí primárního okruhu se ztrátou velkého objemu chladiva-LOCA), které jsou méně pravděpodobné, a může dojít k podcenění příprav na havárie nižších stupňů závažnosti (úniky menších rozsahů, poruchy pomocných systémů), i přesto, že tyto jsou výrazně pravděpodobnější. [59]

### 4.5.2 Pravděpodobností

Oproti deterministickému přístupu, pravděpodobnostní přístup vyjadřuje bezpečnost provozu jaderného zařízení pomocí součinu pravděpodobnosti, resp. četností, výskytu různých nehod a potenciálních škod způsobených nehodami.

Díky tomu umožňuje pravděpodobnostní přístup kvantifikaci rizika, resp. bezpečnosti provozu jaderného zařízení, a zároveň může přinést kvalitativní posouzení zařízení, tedy které aspekty zařízení, resp. provozu, přispívají k riziku nejvíce.

Pravděpodobnostní přístup tak umožňuje identifikaci posouzení případných iniciačních událostí havarijních situací a havarijních scénářů a systematicky stanovuje jejich pravděpodobnost (četnost) a následky. [59]

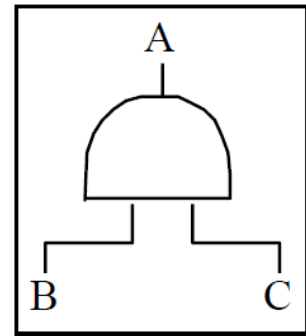


#### 4.6 Popis modelu PSA

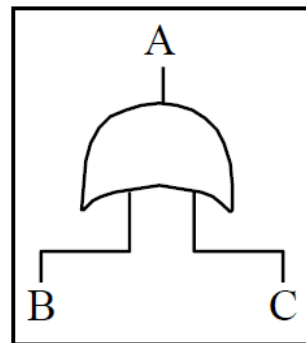
Bezpečnostní systémy jsou systémy pro kontrolování průběhu jaderné reakce, odvod vytvářeného tepla a zamezení úniku radioaktivních látek do okolí.

Aktivní systémy jsou systémy, které potřebují pohon, nejčastěji elektrický. Pasivní jsou systémy pracující bez vnějšího napájení energiemi, např. hydroakumulátory. A inherentní, které vyplývají ze správného navržení systému. [67]

Model PSA využívá bowlovskou algebru. Základními pojmy jsou AND a OR. AND znamená, že se událost A stane, pokud se stane jak událost B, tak událost C. OR znamená, že se událost A stane, pokud se stane událost B nebo událost C. [67]



Obrázek 17 Diagram AND [67]



Obrázek 18 Diagram OR [67]

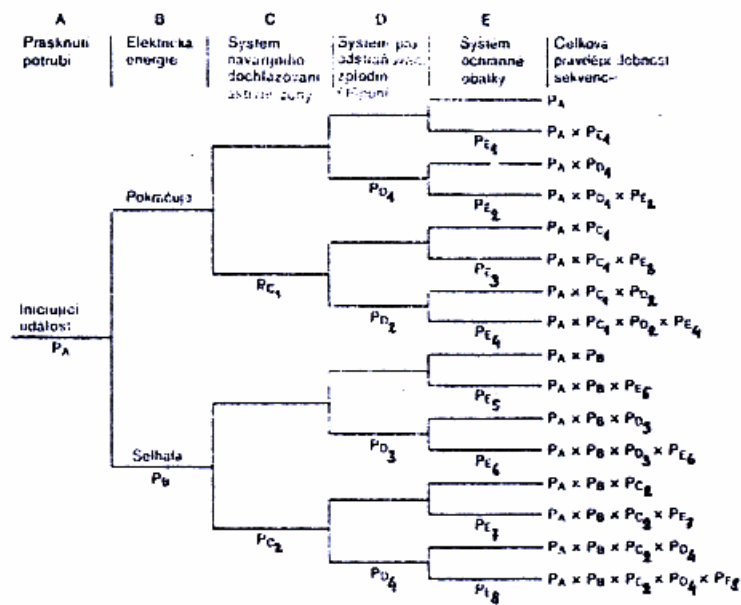
#### Strom poruch

Určuje pravděpodobnost selhání, kterou můžeme dále použít ve stromu událostí. Strom poruch vychází z konečné události (např. tavení aktivní zóny) a definuje předpoklady pro její nastání, jako jsou poruchy zařízení. Jednotlivé prvky mají vlastní pravděpodobnost nastání. Výsledkem je pravděpodobnost nastání počáteční události. [67]

#### Strom událostí

Určuje pravděpodobnost specifické události a určuje faktory, které přispívají riziku. Využívá binární logiku. Situace se buď stala nebo nestala, zařízení pracuje nebo nepracuje apod.

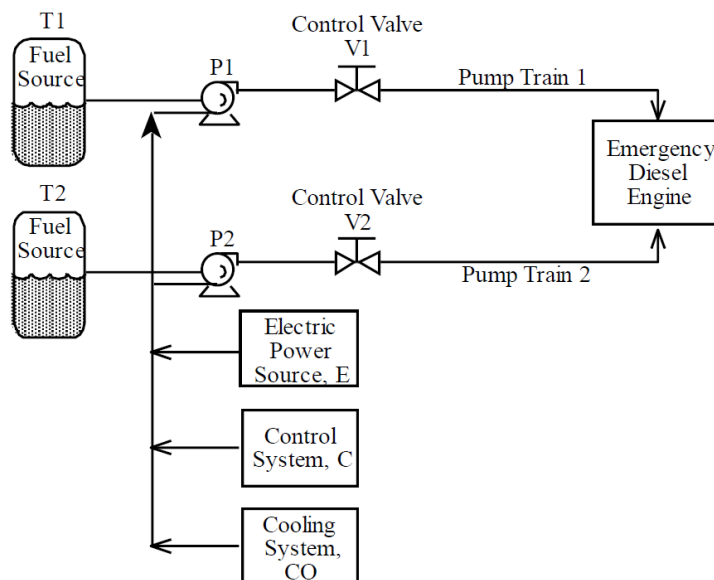
Na začátku stromu událostí je iniciační událost. Dále se strom větví podle důsledků z ní vyplývajících. Jednotlivé větve stromu událostí mají vlastní pravděpodobnost nastání. Pravděpodobnost je dána součinem pravděpodobností předchozích událostí. [64]



Obrázek 19 Strom poruch s vyjádřenými pravděpodobnostmi [64]

### Příklad-havarijní dieselový agregát

Na diagramu je vidět schéma zásobování nouzového dieselového agregátu palivem. Agregát je napájen dvěma samostatnými větvemi vycházejícími ze dvou samostatných nádrží. Každá větev je vybavena vlastním čerpadlem a řídicím ventilem.

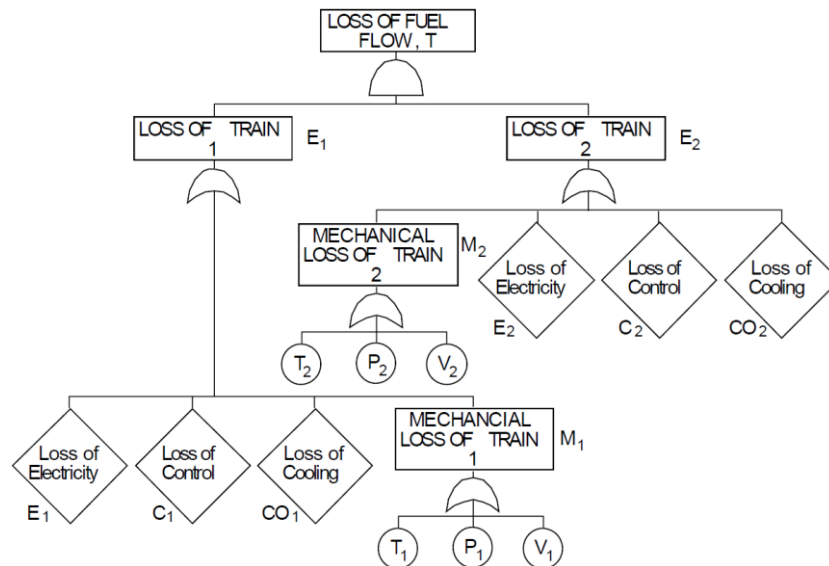


Obrázek 20 Schéma systémů dieselového agregátu [67]

Pro selhání funkčnosti jedné větve by muselo dojít buď k mechanické závadě, selhání pumpy nebo ventilu, nebo dojít k poškození potrubí. Nebo by muselo dojít k závadě na elektrickém

napájení, řídicím systémem nebo chlazením. Tyto možnosti jsou spojeny funkcí nebo (OR). Pro selhání celého systému je třeba, aby selhaly prvky v obou větvích (AND). [59]

Níže je systém nouzového zásobování diesellových agregátů palivem zobrazen ve stromu poruch pro PSA.



Obrázek 21 Strom poruch systému diesellového agregátu [67]

## 4.7 Úrovně PSA

### 1. Úroveň

První úroveň hodnotí poruchy zařízení, což následně vede k vytvoření frekvence poškození aktivní zóny reaktoru. Tato úroveň tudíž zkoumá slabiny projektu daného zařízení a představuje opatření pro prevenci poškození aktivní zóny, které ve většině scénářů následuje havárie s možností masivního úniku radioaktivních látek mimo kontejnment. [69]

### 2. Úroveň

Druhá úroveň zkoumá reakci kontejnmentu na krizovou situaci. Tyto závěry spolu s výsledky první úrovně slouží k určení frekvence a rozsahu úniku radioaktivních látek z kontejnmentu.

Výsledky tak poskytují představu o charakteru a významu selhání kontejnmentu a úniků radioaktivních látek a poskytují možnosti snižování rizika a zmírňování nadprojektových havárií. [70]

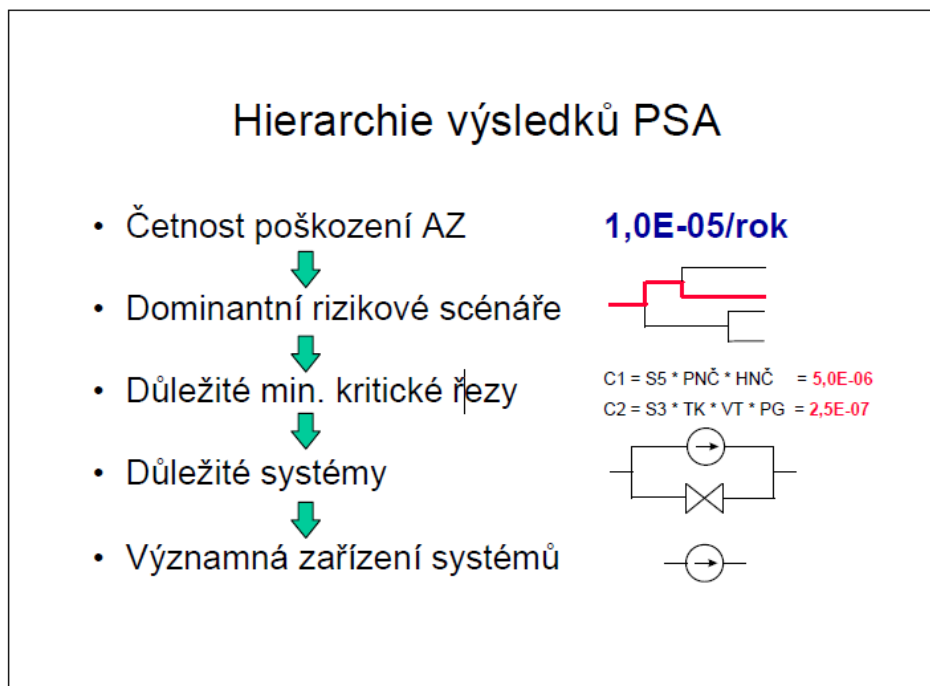
### 3. Úroveň

Třetí úroveň se zabývá následky havárie na okolí elektrárny a s výsledky druhé úrovně poskytuje odhad rizika pro veřejnost. Tato úroveň nám tak dává představu o možném dopadu na zdraví lidí a životní prostředí. [59]

#### 4.8 Výsledky

PSA analýza poskytuje soubor výsledků. Nejdůležitějším z nich je četnost poškození aktivní zóny reaktoru. S přihlédnutím k dalším parametrům můžeme tuto hodnotu použít pro porovnávání různých jaderných elektráren, popřípadě ji využít k porovnání stanovených a dosahovaných cílů.

Důležitým výsledkem je také určení dominantních rizikových scénářů, na které je třeba se soustředit pro zvyšování bezpečnosti jaderného zařízení. Složení minimálních kritických řezů a jejich význam a kvalitativní zhodnocení poskytují informace o složení rizika. Model nám také poskytuje informace o významných systémech zajišťujících bezpečnost po iniciační události a o zařízeních souvisejících s možností selhání těchto systémů. [59]



Obrázek 22 Hierarchie výsledků PSA [59]

Na základě PSA bylo přikročeno například k prostorovému oddělení redundantních systémů nebo k vytvoření nezávislých havarijních divízi schopných zvládnout havárii (3x100 %, 4x75 %, 4x50 %). [64]

#### 4.9 Jaderná bezpečnost SMR

Z pohledu jaderné bezpečnosti a PSA je u malých modulárních reaktorů díky menším rozměrům větší možnost pasivního chlazení oproti větším projektům. Na rozdíl od velkých bloků mají některé projekty SMR i schopnost čistě pasivního chlazení. To má potenciál pro snížení množství a komplexnosti bezpečnostních systémů, a tedy může snížit investiční i provozní náklady. Zároveň tím dojde ke zvýšení bezpečnosti celého zařízení, díky výrazně nižšímu riziku nefunkčnosti aktivních havarijních systémů vlivem poškození, špatné údržby nebo ztráty napájení.

Z pohledu jaderné havárie lze zohlednit i samotný fakt, že v aktivní zóně jaderného reaktoru se nachází výrazně méně paliva a produktů reakce, takže v případě úniku dojde k výrazně menšímu dopadu než u násobně většího reaktoru. Přitom vnější faktory ovlivňující šíření radioaktivního materiálu od kontejnmentu, zejména povětrnostní podmínky a ostatní meteorologické faktory, jsou menší velikostí reaktoru ovlivněny buď velmi málo nebo vůbec. V případě nejvážnější katastrofy proto dojde k šíření výrazně menšího množství radioaktivního materiálu na potenciálně podobné území, což sníží úroveň radioaktivního zamoření.

Mnoho projektů tlakovodních malých modulárních reaktorů nemá na rozdíl od klasických velkých reaktorů vyvedenou smyčku primárního okruhu z tělesa reaktoru. Namísto toho je parogenerátor zaveden přímo do tlakové nádoby reaktoru. Následek tohoto řešení je, že se zmenšuje prostor pro potenciální LOCA nehodu a zmenšením otvorů do reaktorové nádoby i její případný dopad. Zároveň díky tomuto provedení lze potenciálně zmenšit budovu nebo nádobu kontejnmentu. Průměr kontejnmentu se pohybuje v jednotkách metrů, namísto desítek, i jeho výška je oproti velkým reaktorům mnohonásobně menší. Vlivem toho je možné postavit kontejnment, který je dimenzován na vyšší tlaky. Také je možné místo železobetonové konstrukce použít ocelovou, jež nabízí lepší vlastnosti pro vedení tepla a s tím spojené chlazení v případě vážné havárie. [58]

## 5 Praktická část

Malé modulární reaktory jsou považovány za perspektivní variantu zdroje tepla pro soustavy centrálního zásobování tepla. Jejich jednoznačně největší výhodou představuje stabilita dodávky a stabilita ceny.

V současné době je v České republice široce používané uhlí jako zdroj tepla pro dálkové vytápění. To však s sebou nese velké množství vedlejších problémů, jako rozsáhlé zásahy do krajiny při těžbě a velké množství vypouštěných emisí při spalování, které negativně ovlivňují klima a způsobují klimatickou změnu. V důsledku toho dochází v Evropské unii k trvalému, pro energetiku velmi významnému, odklonu od spalování uhlí a usilovnému hledání alternativ.

Pro výrobu tepla pro SCZT se při ukončení používání uhlí jeví jako možnosti spalování biomasy nebo plynu, popřípadě ukončení provozu SCZT a přechod na decentralizované vytápění, buďto pomocí plynu, anebo tepelných čerpadel. Zásadní nevýhodou plynu a biomasy je velká závislost výsledné ceny energie na ceně paliva a také velmi vysoká volatilita cen paliva, pro které není po vybudování infrastruktury alternativa. Jak využívání plynu, tak biomasy je v současnosti považováno za pozitivní alternativu k uhlí. Je tudíž podporováno, avšak obojí je taktéž spalováno, a proto je dlouhodobý výhled ohrožen možností legislativního omezování. Již dnes víme, že podpora plynu jako přechodného paliva ze strany Evropské unie bude končit v roce 2035.

Nevýhodou biomasy je poté omezená kapacita. Biomasa je již dnes rozsáhle využívána pro stavebnictví, papírenský a nábytkářský průmysl a jako palivo v decentralizovaném vytápění. K tomu je kapacita produkce biomasy omezena snahami o ochranu přírody a velká část kapacit musí uspokojit poptávku po potravinách, u nichž bude při pokračujícím trendu deglobalizace poptávka po lokalizaci produkce. K tomu dochází k rostoucímu využívání v teplárenství, a to vytváří další tlak na současné kapacity. Ze střednědobého hlediska můžeme také očekávat pokles produkce vlivem snižování dodávek kůrovcového dřeva na trh.

### 5.1 Zásobování teplem

Pro zásobování teplem je klíčová jeho potřeba. Ta se skládá ze širokého spektra velmi různorodých částí. Základní je rozdělení na procesní a spotřebitelské teplo. Procesní teplo je teplo potřebné pro průmyslové provozy. Jako takové je převážně stabilní v průběhu roku, naopak v průběhu dne či týdne jeho spotřeba výrazně kolísá v návaznosti na výrobě. Toto kolísání je však poměrně pravidelné a předvídatelné.

Zpravidla je procesní teplo také výrazně náročnější na parametry, jak na teplotu, tak na tlak, a je u něj běžnější používat jako médium páru. [1]

Spotřebitelské teplo je používáno pro vytápění a přípravu teplé užitkové vody pro obytné domy, veřejné budovy a komerční prostory jako např. kanceláře. [1]

Při projektování centrálního zásobování teplem musíme vzít v potaz dva základní parametry. Velikost potřebného výkonu a jeho využití v čase. Využití v čase lze vyjádřit diagramem trvání výkonu, který zobrazuje počet hodin potřeby daného výkonu.

S rostoucím výkonem výrazně klesá hodinová potřeba. Navrhovat jeden zdroj pro to, aby byl schopen pokrýt i neuvěřitelnější případy, by bylo ve většině případů neekonomické. V případě elektrické energie nebo přímých dodávek tepla se používá skladba několika zdrojů. Ta nabízí i větší bezpečnost a schopnost dodávat alespoň část potřeby v případě výpadku jednoho zdroje. Nejméně frekventované případy, kdy je potřeba nejvyšší výkon, pomáhá řešit tzv. špičkový zdroj, typicky využívající plyn, protože má relativně malé investiční a údržbové náklady a hlavním nákladem je cena paliva, kterého není spotřebováno příliš mnoho.

V případě dálkového vytápění máme možnost nejvyšší část výkonu, využívaného pouze výjimečně a v každém případě velmi krátkou dobu, pokrýt akumulací v potrubní trase soustavy.

U tepláren máme možnost většího odběru tepla z parního okruhu, což sníží po dobu odběru účinnost provozu turbíny při produkci elektrické energie. Ztráty na elektřině budou vyrovnány absencí nutnosti samostatného špičkového zdroje, jenž by byl v průběhu roku velmi málo využit.

## 5.2 Cenotvorba tepla

V České republice je teplárenství licencovaným odvětvím, ve kterém je tvorba cen regulována Energetickým regulačním úřadem (ERÚ), v rámci Energetického regulačního věstníku.

Tento stav je zejména proto, že u zásobování teplem nastává přirozený monopol. Ve většině případů je v dané lokaci celá soustava vlastněná jedním subjektem. Mimo velká města, jako Praha a Brno, je často i zdroj tepla pouze jeden, resp. je jedna lokace, ve které může být umístěno více zařízení.

Do výpočtu ceny tepla jsou zahrnovány fixní náklady, variabilní náklady, přiměřený zisk a daň z přidané hodnoty (DPH).

Daň z přidané hodnoty je u dodávek tepla z centrálních tepláren stanovena zákonem č. 235/2004 Sb. o dani z přidané hodnoty nejnížší sazbou ve výši 10 %. [71]

Výše přiměřeného zisku je primárně stanovena na základě velikosti investičních nákladů zařízení. Vztahuje se vždy ke konkrétní cenové lokalitě. Je stanovován v míře před zdaněním a před úroky.

Používá se pro ni vzorec:

$$zisk_{sum} = \sum_{k=0}^n CAPEX(1+i)^t \times ROA$$

Kde  $CAPEX$  [Kč] představuje výšku pořizovacích nákladů majetku, nezbytného pro výrobu, popřípadě pro rozvod tepelné energie odběratelům. V  $CAPEX$  se nepočítá majetek, který je pronajímán, a platba nájemného je zahrnuta v režijního nákladech dodavatele energie.

$i$  [-] představuje faktor časové hodnoty peněz (inflaci). Ten je pro majetek nezbytný pro výrobu, popřípadě distribuci tepelné energie, který byl pro období od 1. ledna 2022 stanoven pro veškerý majetek v míře 0,01.

$t$  [-] představuje počet ukončených let od počátku provozování majetku nezbytného pro výrobu, popřípadě rozvod tepelné energie odběratelům do roku, pro který je stanovována cena odebíraného tepla.  $T$  nabývá hodnot 1 a výše.

$n$  [-] faktor  $n$  představuje počet položek majetku, nezbytného pro výrobu nebo distribuci tepelné energie.

$ROA$  [-] je míra výnosnosti. Ta je stanovena na hodnotu 0,065. [72]

V případě, že je technologie využívána pro generování tepla i elektrické energie, jsou náklady provozní i investiční děleny dle Metody poměru dodaného a vyrobeného tepla. Podle té se stanovuje rozdělovací koeficient dle rovnice:

$$\beta_{t,max} = \frac{Q_{tep+ost}}{Q_{Vn}}$$

Kde  $Q_{tep+ost}$  představuje tepelnou energii dodanou odběratelům nebo použitou na jinou činnost, než je výrobní činnost samotného tepla a elektřiny.

A  $Q_{Vn}$  zastupuje hrubý tepelný výkon technologie. [72]



Co se týče nákladů, lze zahrnout pouze tzv. oprávněné náklady. Zde se jedná o intuitivně jednoduše pochopitelné rozdělení, které je pouze nutné právně ošetřit, vzhledem k regulovanému výpočtu ceny tepla. Do oprávněných nákladů lze zahrnout náklady související s výrobou, popřípadě distribucí tepelné energie, a to pouze v dané lokalitě, pro kterou je cena stanovována. Jedná se zejména o náklady na palivo, údržbu, personál, výrobní a správní režie a příslušná pojištění. Dále u spalovacích zařízení lze zahrnout náklady na CO<sub>2</sub> povolenky. Do oprávněných nákladů spadá také případná přikoupená elektrická a tepelná energie a náklady na vodu a odpady.

V tabulce níže můžeme vidět přehled cen tepelné energie ve velkých soustavách centrálního zásobování teplem v České republice a jejich historický vývoj během posledních deseti let. V tabulce jsou rovněž uvedeni jak dodavatelé tepelné energie v daných lokacích, tak výrobci. Ceny tepla jsou dlouhodobě ve většině lokacích stabilní. Výjimkou je samozřejmě rok 2022 a zejména 2023. V těchto rocích jsou ceny energií silně ovlivněny celoevropskou energetickou krizí, která vznikla v návaznosti na válku na Ukrajině. Z bezpečnostních důvodů byly zavedeny sankce Evropskou unií vůči Ruské federaci. Ty znamenaly odchod od dlouho budovaných ekonomických vazeb, zejména v sektoru dodávek energetických surovin. V návaznosti na to došlo ke zdražení všech energií. Nejvíce byly postiženy ty SCZT, které nejvíce závisely na zemním plynu, například Brno, Prostějov, Jablonec nad Nisou.

Přehled cen tepelné energie pro rok 2023 teplařenských společností v ČR v Kč/GJ vč. 10% DPH  
ceny na sekundáru, měřeno na patě objektu

Poř.č.	Město	2023	2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	Dodavatel	Výrobce tepla
1	Pízeň	626,7	598,0	540,3	515,1	512,9	512,9	512,9	512,9	512,9	490,4	490,4	422,7		Pízeňská teplařenská	Pízeňská teplařenská
2	Přerov	640,06	556,6	540,4	532,4	556,6	548,3	548,3	553,9	559,5	559,5	565,1	553,6		Teplota Přerov a.s.	Veolia Energy ČR
3	Hradec Králové	640,13	610,8	563,1	552,0	534,9	509,4	509,4	509,4	489,0	457,6	430,4	405,6		Tep.hosp.Hradec Králové	Elektřárny Opatovice
4	Most	665,7	635,2	593,7	582,0	579,5	573,2	573,2	573,2	567,6	553,7	540,2	532,8		Severočeská teplařenská	United Energy
5	Litvínov	665,7	635,2	593,7	582,0	579,5	573,2	573,2	573,2	567,6	570,5	554,1	542,5		Severočeská teplařenská	United Energy
6	Karlovy Vary	727,1	642,4	618,2	630,2	630,2	614,0	614,0	621,0	621,0	617,6	617,6	570,0		Teplárna Karlovy Vary	Teplárna Karlovy Vary
7	Chomutov	737,1	635,3	567,3	567,3	562,0	614,0	614,0	602,0	602,0	574,9	547,5	493,4		ČEZ Teplařenská	ČEZ
8	Tábor	756,0	706,0	673,3	713,0	713,0	672,6	672,6	688,7	688,7	688,7	683,9	672,6		BYTES s.r.o.	Teplárna Tábor
9	Teplice	778,8	649,0	613,3	602,5	608,5	601,3	601,3	601,3	601,3	583,8	573,4	531,3		ČEZ Teplařenská	ČEZ
10	České Budějovice	788,6	690,7	641,2	629,1	617,4	595,6	592,1	586,4	572,6	571,4	569,1	542,5		Teplárna České Budějovice	Teplárna České Budějovice
11	Havířov	795,1	638,2	592,9	575,6	572,1	546,7	588,7	584,9	552,9	535,0	538,0	523,5		Havířovská tepl. společnost	Veolia Energy ČR
12	Sokolov	803,0	696,3	611,6	608,4	608,4	583,1	583,1	583,1	578,5	579,6	563,5		Sokolovská bytová	ČEZ	ČEZ
13	Ústí nad Labem	816,8	647,6	589,9	584,3	584,3	556,4	556,4	559,3	559,3	549,0	538,2	508,7		Tep.hosp.Ústí nad Labem	ENERGY Ústí nad Labem
14	Frydek-Místek	914,8	778,5	710,4	677,2	670,8	633,4	630,7	636,4	641,9	644,0	646,0	629,3		Distep	Veolia Energy ČR
15	Otrokovice	948,6	790,0	623,4	599,6	587,4	571,4	566,8	572,4	572,4	558,6	574,7	568,7		Tehos	Teplárna Otrokovice
16	Zlín	966,3	792,2	667,7	652,0	644,3	631,1	633,2	636,6	622,2	591,8	585,0	581,5		Teplota Zlín	Alpig Zlín
17	Strakonice	984,9	730,7	635,4	648,4	658,1	642,1	619,1	629,6	649,3	649,3	618,4	583,8		Teplárna Strakonice	Teplárna Strakonice
18	Písek	993,3	794,6	679,1	659,3	644,1	607,7	595,7	584,0	572,5	561,2	550,2	521,9		Teplárna Písek	Teplárna Písek
19	Olomouc	1 028,9	762,2	651,4	638,7	629,9	605,6	605,6	607,4	602,8	599,0	599,0	594,2		Olterm	Veolia Energy ČR
20	Praha	1 085,7	864,6	682,0	678,0	678,0	664,2	643,9	652,1	619,3	574,5	570,5	534,1		Pražská teplařenská	Pražská teplařenská
21	Ostrava	1 145,0	776,0	626,7	598,1	582,9	548,8	534,0	529,7	529,7	535,0	540,0	513,5		Veolia Energy ČR	Veolia Energy ČR
22	Liberec	1 163,7	838,4	755,5	680,0	699,0	676,4	695,4	705,8	705,8	705,8	705,8	752,4		Teplárna Liberec	Teplárna Liberec
23	Vsetín	1 340,9	840,4	597,7	629,2	645,2	622,2	640,6	661,3	661,3	661,3	661,3	606,5		Zásobování teplem Vsetín	Zásobování teplem Vsetín
24	Opava	1 346,4	839,3	616,0	638,0	661,3	644,0	661,3	678,5	678,5	672,8	655,1	642,5		Opatherm	Opatherm
25	Jilové	1 357,0	982,1	613,8	594,0	614,1	575,0	597,8	599,5	636,2	636,2	619,9	631,0		TERMO Děčín	TERMO Děčín
26	Děčín	1 388,0	994,4	647,9	665,5	695,8	665,9	690,0	698,5	698,5	698,5	698,5	692,7		TERMO Děčín	TERMO Děčín
27	Břeclav	1 483,0	628,0	570,3	596,9	599,9	634,7	644,7	637,2	637,2	648,2	650,9	648,2		Teplota Břeclav	Teplota Břeclav
28	Jablonec nad Nisou	1 550,0	699,0	599,0	599,0	599,0	579,0	689,0	689,0	689,0	689,0	806,5	799,5		Jablonecká energetická a.s.	Jablonecká energetická a.s.
29	Prostějov	1 566,8	594,1	539,7	534,2	577,2	481,6	557,2	598,7	637,9	616,7	604,2	583,1		Dom.správa Prostějov	Dom.správa Prostějov
30	Brno	1 672,0	784,3	634,7	634,7	634,8	634,8	634,8	667,9	667,9	667,9	667,9	662,1		Teplárny Brno	Teplárny Brno

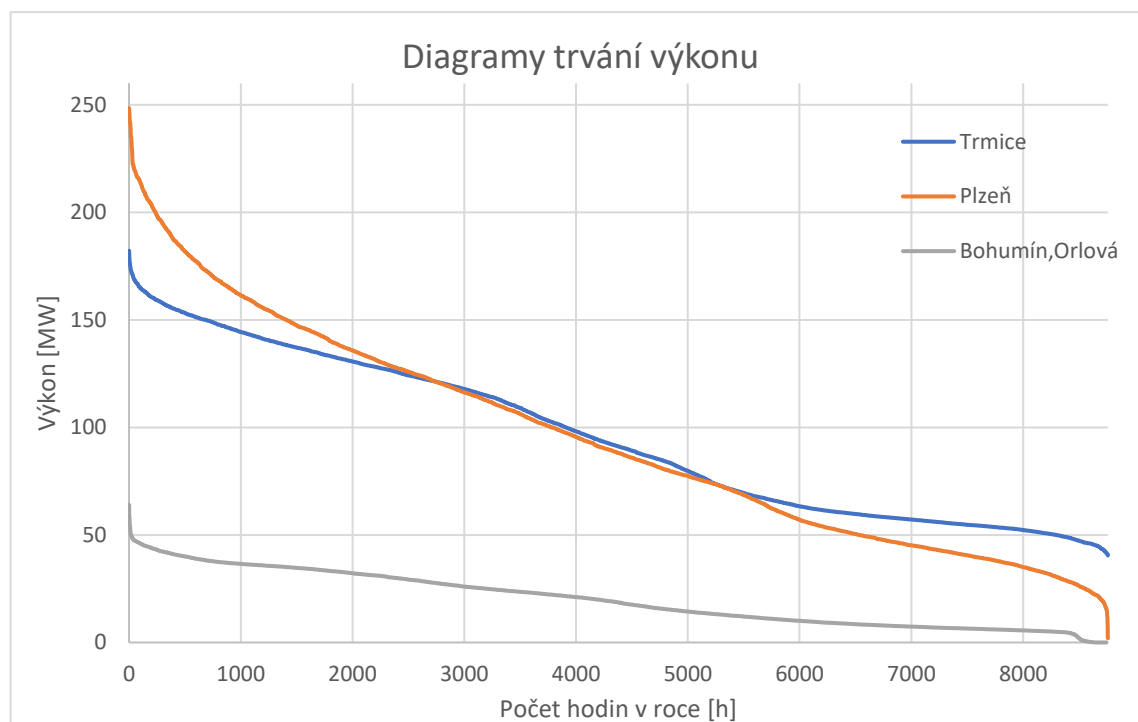
Obrazek 23 Přehled cen tepla ve velkých soustavách v ČR 2012-2023 [73]

### 5.3 Výběr a popis lokality

Při zpracování práce byly kontaktováni provozovatelé různých soustav centrálního zásobování tepla napříč ČR. Tři z nich poskytly data o dodávkách v dostatečné kvalitě. Byly jimi SCZT města Plzeň, Teplárna Trmice dodávající primárně do SCZT Ústí nad Labem a elektrárna Dětmárovice dodávající teplo do Orlové a Bohumína.

Níže je vyobrazen diagram trvání výkonu všech třech soustav centrálního zásobování teplem. SCZT Orlové a Bohumína jsou brány jako jedna.

Soustavy se značně liší jak maximálním potřebným výkonem v roce, tak jeho průběhem. Diagram jasně ukazuje, že nejplošší (a tedy nejrovnoměrnější) využití výkonu se nabízí v lokalitě Trmic.



Obrázek 24 Diagramy trvání výkonu

Ve variantě Plzeňské SCZT je hlavní problém umístění současných zdrojů výrazně blíže k oblastem obydleným velkým množstvím obyvatelstva. Současné lokality také mají ze všech tří variant nejhorší prostorové dispozice pro případnou výstavbu dalších zařízení. To by vyžadovalo vybudování nové lokality spolu s elektrickým a dopravním spojením, územním rozhodnutím apod.

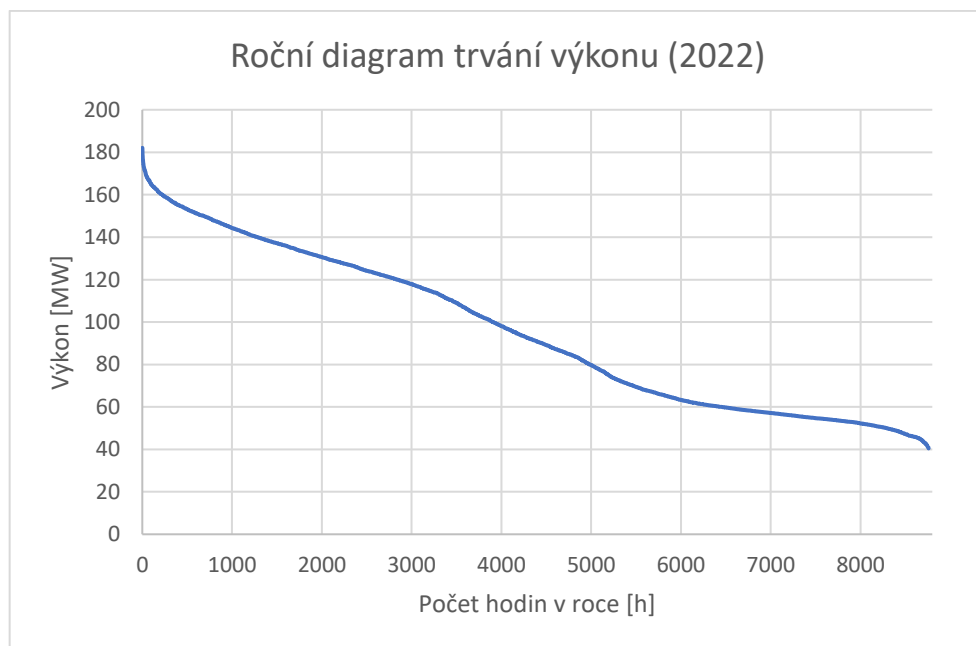
Odběr Orlové a Bohumína není dostatečně velký pro využití zamýšleného SMR a byl by vhodnější při teplárenském provozu pro typ SMR o nižším výkonu. Lze si představit jeden, popřípadě několik mikroreaktorů.

Z těchto třech možností byla pro přestavbu teplárny na zařízení využívající jadernou technologii vybrána Teplárna Trmice, která zásobuje teplem Ústí nad Labem a okolí. Samotné Ústí nad Labem mělo k roku 2022 devadesát tisíc obyvatel. Trmice, ve kterých se nachází lokace teplárny, tři tisíce.

Do sítě je v současnosti napojeno přes třicet tisíc domácností a velká část průmyslových zařízení v Ústí nad Labem. Přímo v Trmicích se nachází lihovar. Ústí nad Labem je tradiční průmyslové město s historií průmyslu sahající až k průmyslové revoluci v Čechách v 19. století.

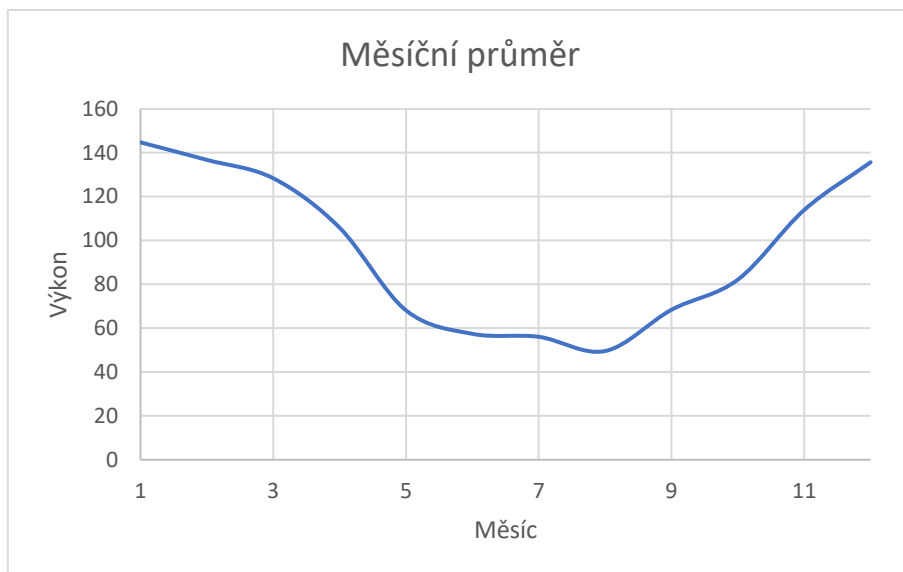
V současnosti je skladba výrobních zařízení dominována odvětvími chemického, potravinářského, strojírenského a elektrotechnického průmyslu. Jedná se o například o firmu Tonaso, Glencore, provozující výrobu v bývalém areálu Setuzy či Spolchemie.

Vzhledem k významnému podílu průmyslových zařízení, které fungují celoročně, na celkové spotřebě, je křivka využití výkonu pro Trmickou teplárnu méně strmá, než bývá obvyklé u SCZT, které zásobují z větší části obytné prostory. Zároveň je vyšší část základního zatížení.



Obrázek 25 Samostatná roční diagram trvání odběru tepla Trmice

Pro lepší představu o průběhu potřeby tepla v roce jsou níže zobrazeny grafy pro průměrný potřebný tepelný výkon v jednotlivých měsících a v jednotlivých týdnech roku.



Obrázek 26 Průměrný potřebný měsíční výkon 2022



Obrázek 27 Průměrný potřebný týdenní výkon 2022

Na obrázku níže můžeme vidět mapu okolí Trmické elektrárny, včetně samotných Trmic, přiléhajících k Ústí nad Labem, hlavní lokaci pro odběr tepla. Teplárna se nachází západně od Trmic, od níž je oddělena dálnicí. Severozápadně od teplárny můžeme vidět jezero Milada, bývalý Důl Chabařovice, zatopený od roku 2010.

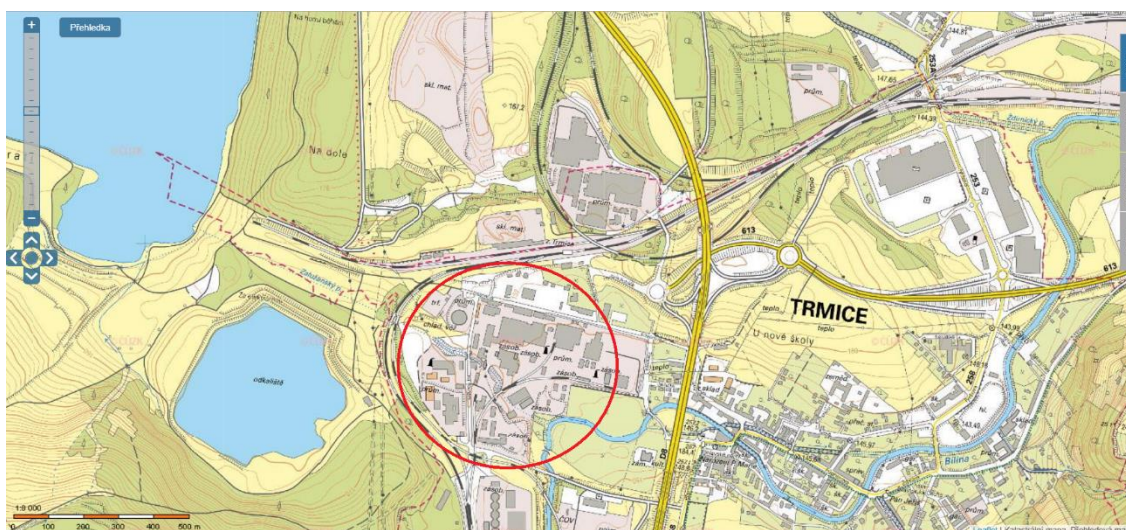


Obrázek 28 Trmický elektrárna a okolí [74]

V současnosti se jedná o teplárnu spalující primárně uhlí. V zařízení je instalováno šest kotlů o celkovém tepelném výkonu 469,2 MWt. Ty doplňuje šest turbogenerátorů pro výrobu elektrické energie o celkovém výkonu 89 MWe. Primární napaječe v SCZT mají délku 125 km. Teplárna dodá ročně okolo 3000 TJ tepelné energie.

Lokalita se nachází v blízkosti dálnice D8 směřující od Prahy do Německa. Přímo do areálu je již vybudováno samostatné železniční napojení. Na obrázku níže vidíme detail lokality, včetně zmíněného železničního spojení a dálnice.

Do areálu je zbudované napojení na přenosovou síť ČR. Vedení je stavěno pro 110 kV.

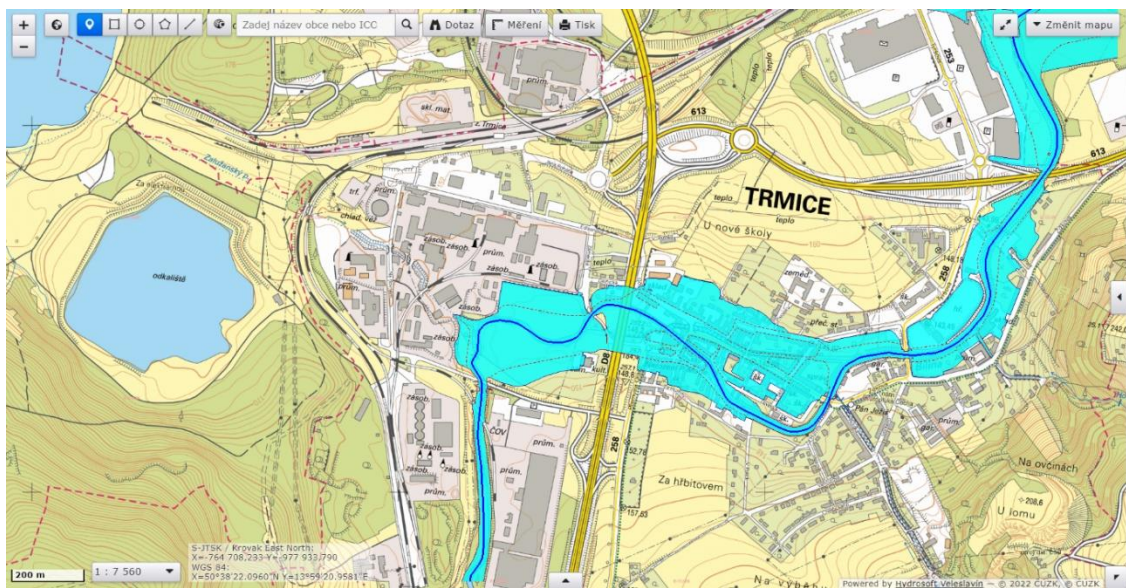


Obrázek 29 Trmice-detail [74]

Jak dálniční přístup, tak železniční přípojka jsou velkou výhodou lokality. Jejich existence kromě značných nákladů na zbudování snižuje i nutnost případného stavebního řízení a poskytuje dobrý přístup pro transport jak velkého objemu materiálu na stavbu, tak rozměrných zařízení.

Lokalita se nachází ve vzdálenosti 10 km od centra sousedního města Teplice. Společně s okolními obcemi spotřebují Teplice okolo 730 TJ tepelné energie ročně. Zásobovány jsou uhelnou elektrárnou Ledvice, pro kterou bude v kontextu dekarbonizace nutné také najít náhradu. Případný rezervní výkon v Trmicích by tedy bylo možné využít po vybudování příslušného napáječe pro zásobování SCZT v Teplicích.

Lokalita se nachází v blízkosti řeky Labe, která poskytuje dostatečný rezervní potenciál pro odebírání chladicí vody pro provoz jaderných reaktorů. Kaňon Labe zároveň chrání lokalitu před možností zásahem povodněmi. Ještě blíže se nachází koryto řeky Bíliny. Ta je primárním možným zdrojem chladicí vody pro případné jaderné bloky. Je také jejich hlavním povodňovým ohrožením, na které by musel být brán zřetel.



Obrázek 30 Trmice – model záplav

Z hlediska možnosti realizace projektu je třeba nezapomínat na politickou a společenskou průchodnost. Tyto parametry jsou sice těžko definovatelné, ale pro průmyslové projekty, a zejména takové, co užívají jaderné technologie, jsou naprosto klíčové. Oblast lokality je tradičně průmyslová a již dříve zažila dodnes trvajícím ekonomickým pokles, jenž ji řadí mezi chudší oblasti České republiky, označované také jako strukturálně znevýhodněné. V budoucnu bude dále ohrožena dekarbonizací. Kromě odsunu dalších pracovních míst by se jednalo zejména o výrazné zdražení tepelné energie pro domácnosti, které by lokální obyvatelé pocítili. Zdražení by dopadlo i na průmysl, což by mohlo ještě více posílit odchod firem a ztrátu pracovních

příležitostí pro region. Naproti tomu transformace Trmické teplárny na jadernou by zajišťovala dlouhodobě stabilní a dostupnou tepelnou energii pro domácnosti i průmysl a přinášela by do oblasti pracovní příležitosti s vysokou přidanou hodnotou.

Tyto faktory by mohly být rozhodující pro možnost najít lokální politickou a společenskou podporu pro jaderný projekt.

#### 5.4 Výběr designu SMR

Pro nahrazení Trmické teplárny byl vybrán design společnosti NuScale. Velikostí tepelného výkonu odpovídá dostatečně zvolené lokalitě. Společnost má propracovaný koncept modularity a instalace více bloků na jednu lokaci, v projektu je zahrnuta i možnost kogenerace tepla.

Zároveň se jedná o jeden z projektů SMR, který pokročil nejdále. Předchozí design s výkonem 55 MWe již získal licenci ve Spojených státech a v současnosti je licencován novější design. Jak již bylo zmíněno, společnost NuScale projevila zájem i o působení v České republice. Spojené státy jsou významným bezpečnostním a ekonomickým partnerem České republiky, tudíž v cestě realizace nestojí bezpečnostní opatření týkající se kritické infrastruktury, jako je tomu v případě např. Ruské federace nebo Čínské lidové republiky. Zároveň jsou Spojené státy technologicky a průmyslově vyspělá ekonomika s dlouhodobě rozvinutým jaderným sektorem, což dále zvyšuje relevantnost partnera.

Pro použití byl také zvažován český design Energy well. Tento projekt má však příliš nízký výkon pro danou lokalitu. Jediný evropský design v pokročilé fázi, Rolls Royce SMR, je pro zvolenou lokalitu naopak příliš výkonný.

#### 5.5 Ekonomické posouzení

Pro vybranou lokalitu a design SMR jsou řešeny a hodnoceny dvě varianty. Nejdříve bude posouzena možnost využití reaktoru pouze pro výrobu tepla. Následně bude hodnocena varianta společné výroby tepla a elektrické energie.

Jednotlivé varianty projektu budou hodnoceny na základě doby návratnosti investice a výsledné ceny tepla. Dále bude v citlivostních analýzách využita Levelised cost of energy, vyrovnané náklady na elektřinu (LCOE) a Levelised cost of heat, vyrovnané náklady na teplo (LCOH).



### 5.5.1 Samostatná výroba tepla

V první variantě je uvažována možnost jednoúčelového použití SMR pro výrobu tepla. Díky tomu je možné využít výrazně větší část výkonu reaktoru než u kogenerace s elektrickou energií a bude proto potřeba pouze jednoho bloku. Projekty SMR slibují velmi vysokou spolehlivost, přesto je v případě samostatného bloku otázka, zda je spolehlivost dostatečně vysoká, aby nebylo třeba vybudovat např. plynový záložní kotel pro případ neplánované odstávky bloku. Vzhledem k výši celkových nákladů a větší jednoduchosti projektu při jednoúčelové výrobě tepla oproti kogeneraci je možné předpokládat, že náklady na vybudování plynového kotle lze zahrnout do ceny SMR, jak byla stanovena pro kombinovanou výrobu.

Roční využití reaktoru bylo stanoveno na 50 %, což odpovídá přibližně 4300 hodin provozu na maximálním výkonu. Reaktor pokryje celou současnou spotřebu SCZT. Zároveň tato varianta počítá s nárůstem spotřeby v SCZT, tak aby bylo dosaženo 50 % využití, které je považováno za hraniční. Nárůst spotřeby může být realizován připojením nových průmyslových zařízení nebo okolních vesnic. Životnost reaktoru je předpokládána 60 let na základě prohlášení výrobce. Odpisy hodnoty majetku budou prováděny po dobu prvních třiceti let provozu.

Inflace je předpokládána na úrovni 3 %. V současnosti je ekonomická situace velmi nejistá a inflace velmi vysoká. Tento projekt je však velmi dlouhodobý, proto očekává ustálení situace do zahájení výstavby. Z dlouhodobého hlediska je cílem ČNB míra inflace 2 %. Volbou tří procent jsme na straně bezpečnosti a lze v této míře pohltit případnou krátkodobou zvýšenou inflaci v průběhu realizace projektu.

Vzhledem k aplikaci designu zahraniční firmy je nutné počítat s převodem mezi USD a Kč. Kurz byl stanoven na 22 Kč/USD.

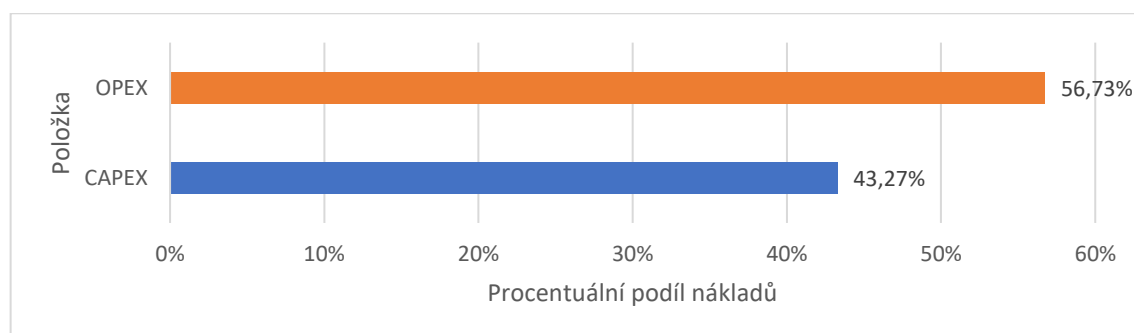
Náklady na vybudování jsou počítány z ceny za instalovaný kilowatt, jak byla stanovena pro reaktor o výkonu 77 MWe. Ta je ve výši 5000 USD/KWe neboli 110 000 Kč/KWe. Cena vychází z prohlášení výrobce a z ekonomických analýz. [75] [76] Celkové investiční náklady byly stanoveny ve výši 8 470 mil. Kč, v cenové hladině pro rok 2022. Provozní náklady jsou počítány procentuálně z CAPEX (Capital expenditures, kapitálové náklady). Procentuální míra byla stanovena na 5 %.

Většina zdrojů pro projekt (80 %) je realizována formou úvěru. Úroková míra byla stanovena na 4 %. Úvěr začíná být splácen prvním rokem provozu. Celková délka splácení úvěru je 20 let. Z vlastních zdrojů je financováno 10 % investice. Zbýlých 10 % je získáno z dotace. Ta je předpokládána, jelikož lokalita Ústí nad Labem je již dnes považována za strukturálně

znevýhodněnou a jsou pro ni vypsány dotační tituly ze strany státu. Zároveň se jedná o oblast, pro kterou lze předpokládat dotace na odchod od využívání uhlí, a to jak se strany státu, tak ze strany Evropské unie. Taktéž Spojené státy poskytují finanční podporu pro projekty SMR, včetně podpory exportu do zahraničí, např. Rumunska, o kterou by se mohli potenciálně ucházet i projekty v ČR. [77] [78] Realizace zabere 4 roky, pátého roku začne teplárna dodávat teplo do sítě.

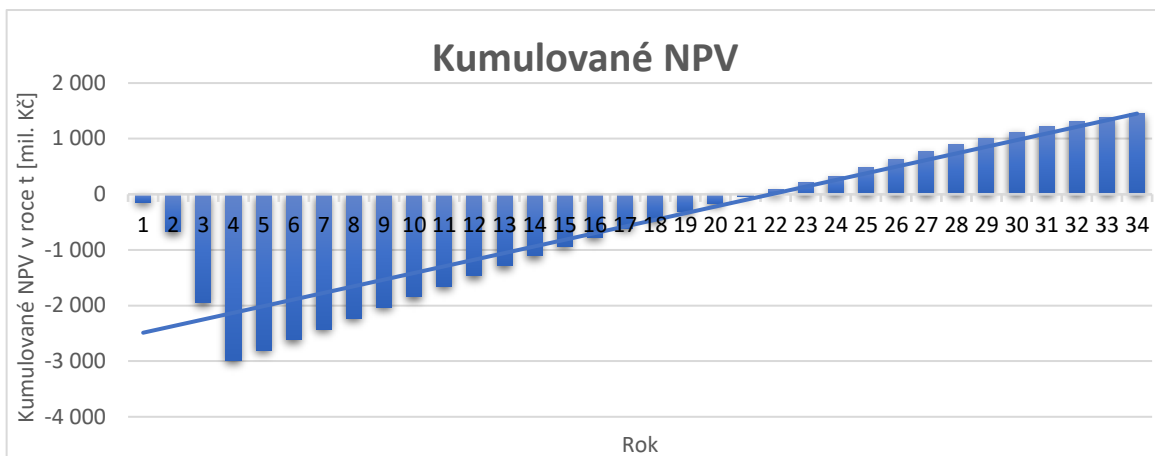
Cena dodávaného tepla při jednoúčelové výrobě tepla byla kalkulována dle metodiky ERÚ popsané v kapitole 5.2, na 468,60 Kč/GJ v roce zahájení provozu. To je nižší cena, než je současná, která pro byla, pro rok 2022, na úrovni 647 Kč/GJ.

Celkové náklady po dobu projektu dosáhnou 33 342 mil. Kč. Roční provozní náklady při prvním roce dodávek dosáhnou 1 194 mil. Kč. Na rozdíl od současných velkých reaktorů, kde většina celkových nákladů spadá do CAPEX, je u SMR předpokládaná výrazně vyšší míra provozních nákladů, a to i v nadpoloviční míře. Tak je tomu i u této kalkulace, kde OPEX (Operating expenditures, provozní náklady) představují přibližně 57 % celkových nákladů.



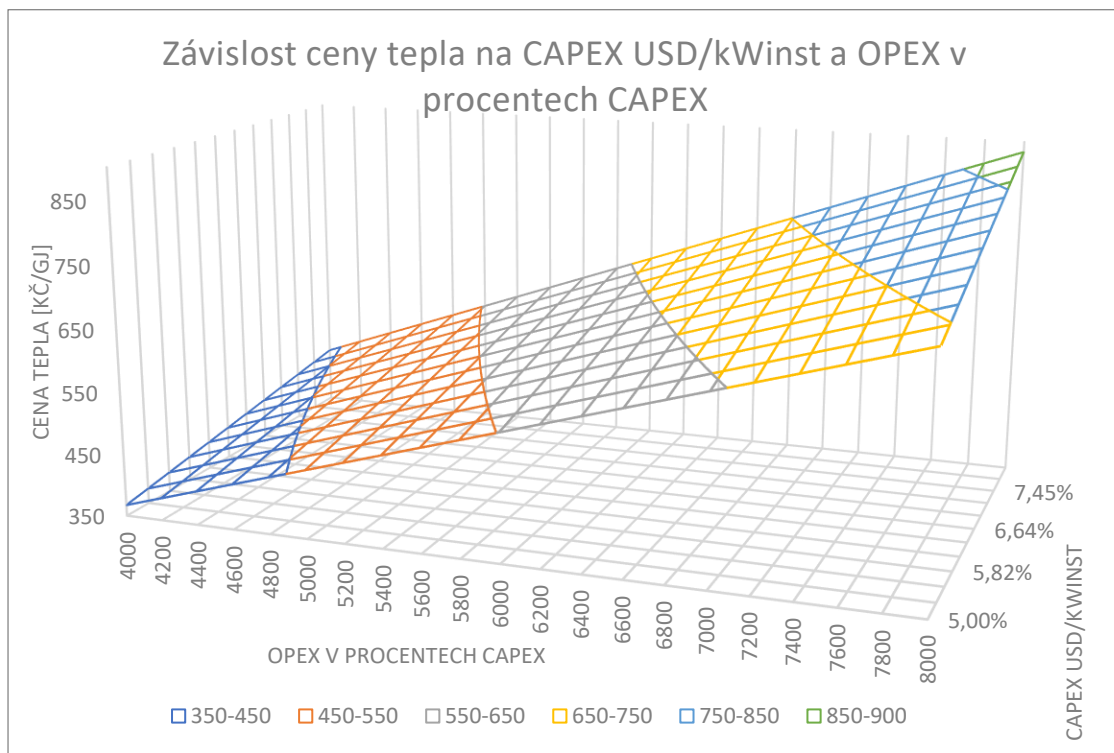
Obrázek 31 Poměr CAPEX a OPEX

Nominal present value, čistá současná hodnota (NPV), investice se dostane do kladných hodnot 21 let od začátku projektu. To je pro infrastrukturní projekt příznivá hodnota. Kumulované NPV v roce 30 po zahájení provozu dosáhne 1 877 mil. Kč.



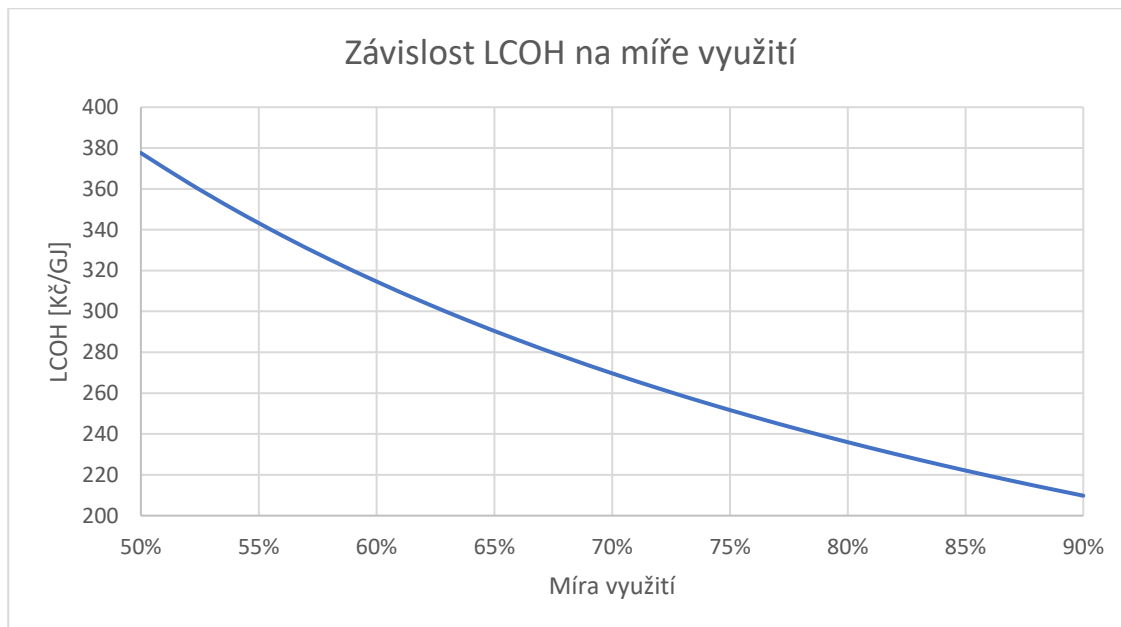
Obrázek 32 Kumulované NPV

Pro výši ceny za kilowatt instalovaného výkonu a pro výši provozních nákladů stanovených poměrem z investičních nákladů byla zpracována citlivostní analýza. Cena za instalovaný výkon byla zkoumána v rozmezí 80–160 % projektové hodnoty. U nového konceptu, či technologie, lze očekávat spíše nárůst nákladů, proto je z opatrnosti citlivostní analýza prováděna zejména pro hodnoty vyšší než 100 %. Poměr provozních nákladů k investičním byl analyzován v rozmezí 100–160 % projektové hodnoty, tedy 5 %. Závislost ceny tepla na těchto dvou parametrech je zobrazena níže.



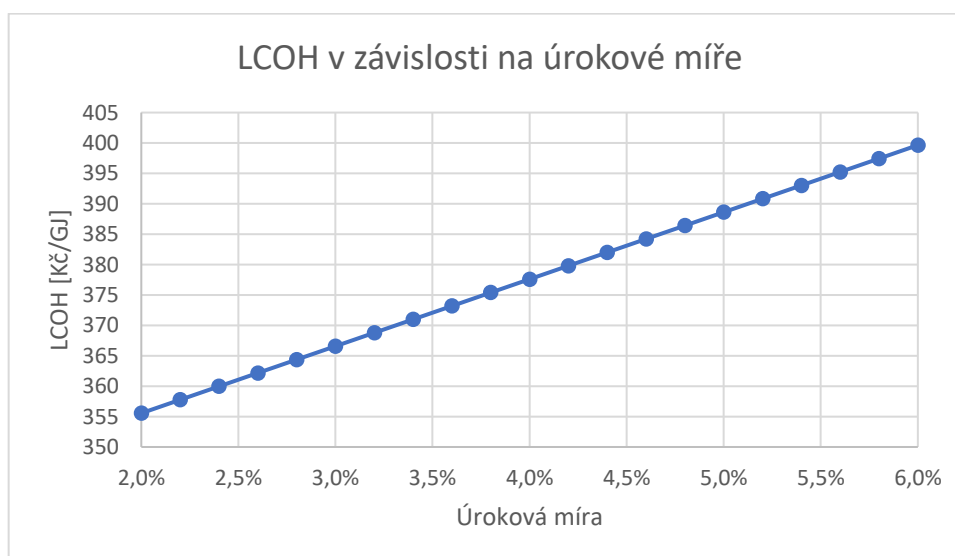
Obrázek 33 Závislost ceny tepla na CAPEX a OPEX

Dále byla provedena citlivostní analýza míry využití reaktoru v roce. Míra využití neovlivňuje cenu tepla kalkulovanou dle metodiky ERÚ, proto byla využita LCOH. Vzhledem k tomu, že v projektu je míra využití reaktoru nízká, blízko minimální realizovatelné, byla analýza provedena v rozsahu 100–190 % projektové hodnoty, tedy 50–90 % využití reaktoru.



Obrázek 34 Závislost LCOH na míře využití

Úroková míra a z ní vyplývající náklady na splátky úvěru nejsou zahrnuty v nákladech při výpočtu ceny tepla dle metodiky ERÚ, proto úroková míra neovlivňuje cenu tepla a byla využita pro analýzu LCOH. Analýza byla provedena v rozmezí 50–150 % hodnoty, se kterou počítá projekt (4 %), tedy v rozsahu 2–6 %.



Obrázek 35 Závislost LCOH na úrokové míře

Pro další rozvoj tohoto konceptu by bylo vhodné prozkoumat možnost aplikace reaktoru s nižším výkonem, který by sloužil jako základní zdroj, s výkonem odpovídajícím 50–65 % výkonu maximálního, v kombinaci s dalším zdrojem, např. biomasovým nebo plynovým. Ten by fungoval jako sekundární zdroj pro dodání výkonu, který má v průběhu roku nízké využití.

Zvýšení využití by bylo možné také zvýšením odběru. Projekt počítá s rezervou v maximálním výkonu cca 10 %. To by mohlo být realizováno v současných lokalitách připojováním dalších odběratelů na současnou síť. Možností je také vybudování napojení do nových lokalit v okolí Trmic, např. SCZT Teplice a okolních vesnic.

### 5.5.2 Kombinovaná výroba tepla a elektřiny

V této variantě je uvažována kombinovaná výroba elektřiny a tepla pomocí SMR. V lokalitě je pro potřeby dodávek tepla nutno vybudovat zařízení se čtyřmi reaktory. Ty dohromady pokryjí poptávku po teple a zároveň budou mít dostatečnou výkonovou rezervu pro budoucí nárůst spotřeby.

V lokaci by byly instalovány celkem 4 bloky o celkovém tepelném výkonu 1000 MW. 19 % celkového výkonu bude využito pro dodávky tepla, zbytek pro výrobu elektrické energie. Elektrárna tak bude mít elektrický výkon 240 MWe a výkonem 192 MWt pro dodávku tepla. Díky instalaci čtyř bloků je výrazně vyšší spolehlivost celého systému. Při neplánovaném výpadku jednoho bloku mohou ostatní bloky změnit poměr výkonu určeného pro výrobu elektřiny a tepla a, za snížení efektivity produkce elektřiny, dočasně navýšit svůj podíl na dodávkách tepla. Z toho důvodu není předpokládán zálohový plynový zdroj.

Životnost rektoru je předpokládána stejná jako pro samostatnou výrobu tepla, tedy 60 let na základě prohlášení výrobce. Odpisy hodnoty majetku (CAPEX) budou opět prováděny po dobu prvních třiceti let provozu.

Pro produkci tepla byla stanovena míra využití 50 % a pro produkci elektrické energie 80 %. Teplárna by v případě, že by potřeba výroby elektrické energie přesahovala potřebu dodávek tepla do SCZT, mařila přebytečné teplo v chladících věžích. Spotřeba paliva, resp. délka palivového cyklu a perioda výměny, jsou předpokládány stejné jako v případě samostatné výroby tepla. Vyšší stupeň vyhoření paliva není zahrnut ve výpočtech.

Inflace je stejně jako v předchozí variantě předpokládána na úrovni 3 %, což je hodnota na bezpečné straně dlouhodobého inflačního cíle ČNB a umožňuje z dlouhodobého hlediska pohlcení krátkodobé inflace.

Kurz koruny a dolaru byl pro kalkulaci se zahraničními cenami stanoven na 22 Kč/USD.

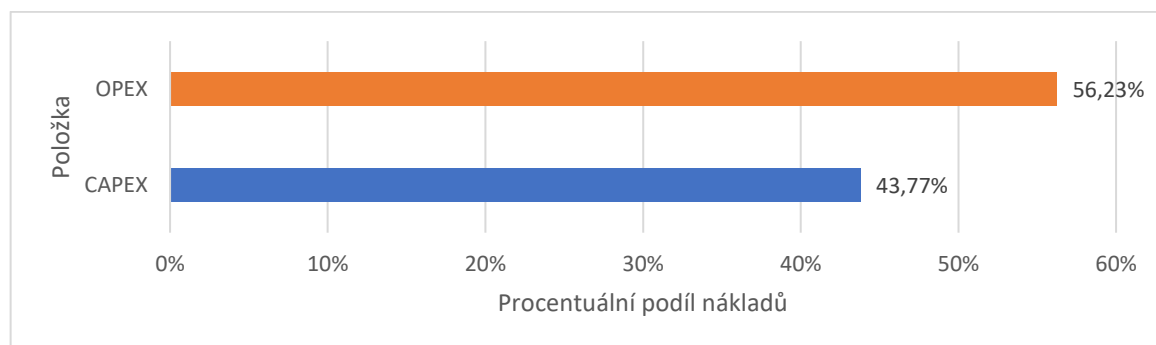
Náklady na vybudování jsou počítány stejně jako v první variantě z ceny za instalovaný kilowatt, která byla stanovena na 5000 USD/KWe neboli 110 000 Kč/KWe. Celkové investiční náklady byly stanoveny ve výši 33 880 mil. Kč, v cenové hladině pro rok 2022. Provozní náklady jsou počítány procentuálně z CAPEX. Procentuální míra byla stanovena na 5 %.

Z vlastních nákladů bude financováno 10 % projektu. Pro projekt je předpokládána dotace ve výši 10 %, díky umístění projektu ve strukturálně znevýhodněném kraji, na který bude silně

dopadat odchod od uhlí, pro něž jsou a s velkou pravděpodobností nadále budou vypisovány dotace ze strany České republiky a Evropské unie. 80 % projektu bude financováno úvěrem. Úroková míra úvěru je předpokládána ve výši 4 %. Doba splatnosti úvěru je 20 let. Počátek splácení je prvním rokem realizace. Prodejní cena vyrobené elektřiny byla předpokládána ve výši 2 Kč/kWh v cenové úrovni pro rok 2022. Stavba bude stejně jaké v první variantě probíhat 4 roky a pátého roku začnou dodávky do sítě.

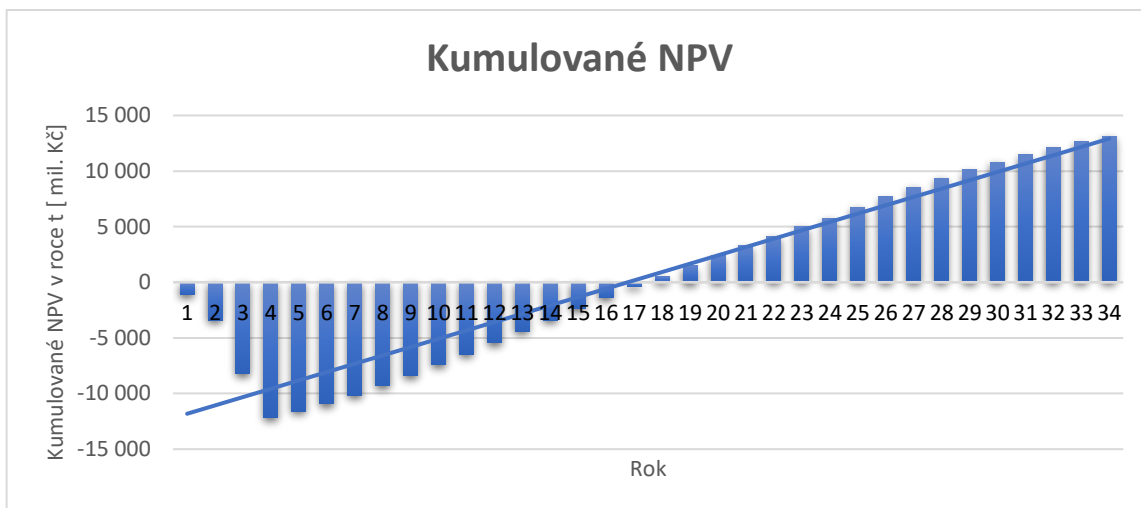
Cena tepla byla v tomto případě stanovena dle metodiky ERÚ na 360,50 Kč/GJ. To je výrazně méně oproti současné ceně, která byla, pro rok 2022, na úrovni 647 Kč/GJ.

Celkové náklady po dobu výstavby a počítaného provozu dosáhnou 141 206 mil. Kč. Provozní náklady v prvním roce dodávek budou 4 777 mil. Kč. Poměr investičních a provozních nákladů je u této varianty podobný jako u předchozí a odpovídá předpokladům pro SMR. Provozní náklady tvoří nadpoloviční většinu při cca 59 % z celkových nákladů.



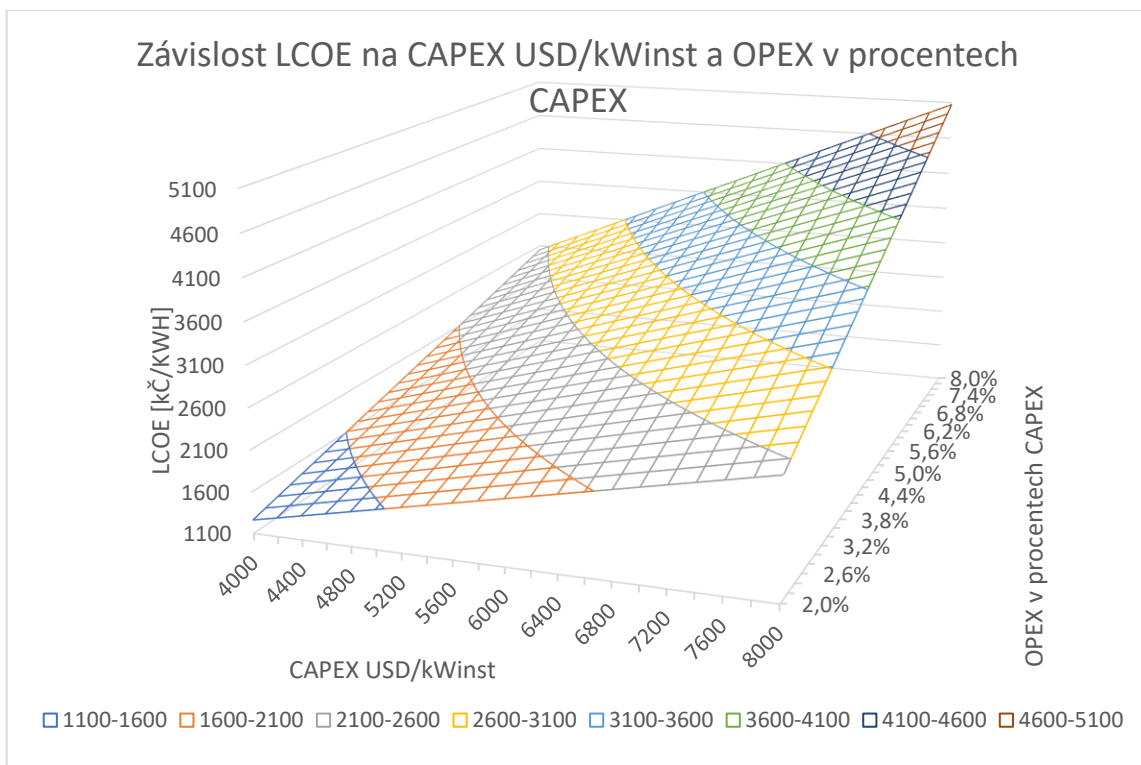
Obrázek 36 Procentuální zastoupení CAPEX a OPEX

Pro projekt bylo spočteno kumulované NPV, které je zobrazeno v grafu. Návratnost investice byla spočtena na 18 let od počátku projektu, což je velmi příznivý výsledek. Kumulované NPV dosáhne po 30 letech provozu 17 365 mil. Kč.



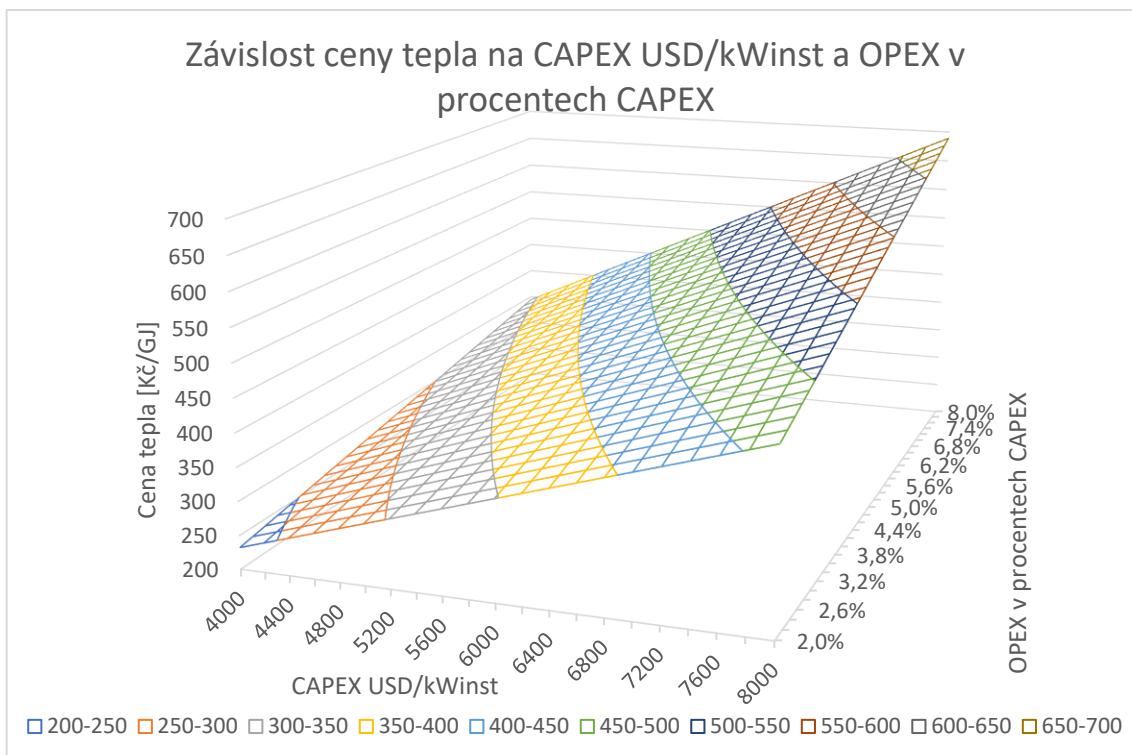
Obrázek 37 Kumulované NPV

I pro tuto variantu byly zpracovány citlivostní analýzy. Zkoumána byla LCOE a cena tepla, obě v závislosti na výši ceny za kilowatt instalovaného výkonu a na výši provozních nákladů stanovených poměrem z investičních nákladů. Cena za instalovaný výkon byla zkoumána v rozmezí 80–160 % projektové hodnoty. Poměr provozních nákladů k investičním byl analyzován v rozmezí 2–8 %. Výsledky jsou zobrazeny níže.



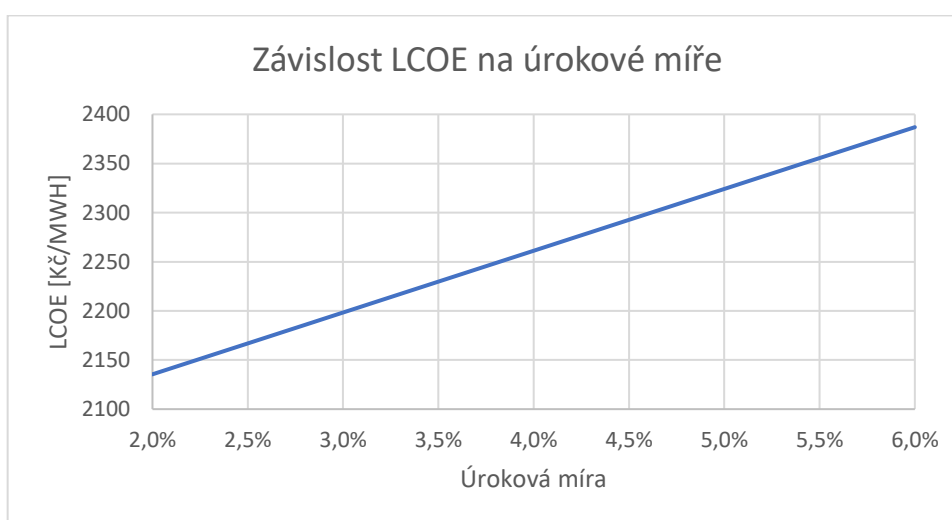
Obrázek 38 Závislost LCOE na CAPEX a OPEX





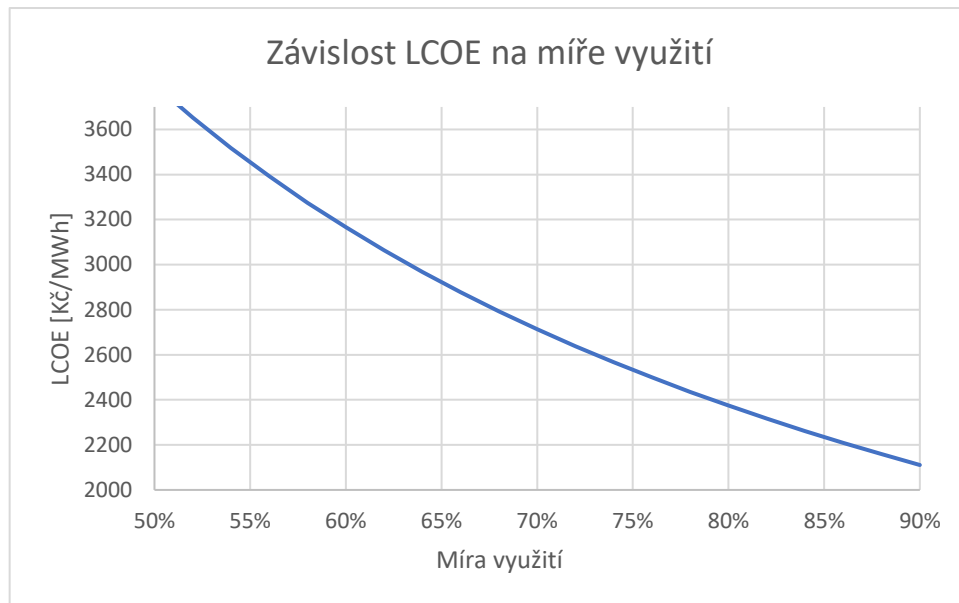
Obrázek 39 Závislost ceny tepla na CAPEX a OPEX

Byla provedena citlivostní analýza vlivu úrokové míry na projekt, resp. na LCOE. Úroková míra byla zkoumána v rozmezí 50–150 % hodnoty, se kterou počítá projekt (4 %), tedy v rozsahu 2–6 %. Dodávka tepla byla v této variantě uvažována konstantní a citlivostní analýza na ni zpracována nebyla.



Obrázek 40 Závislost LCOE na úrokové míře

Vzhledem k vysoké míře využití v základním výpočtu projektu byla citlivostní analýza míry využití reaktoru provedena v rozmezí 50–90 %. Její vliv na LCOE je zobrazen níže.



Obrázek 41 Závislost LCOE na míře využití

Projekt kogenerace elektrické energie a tepla má příznivou dobu návratnosti a velmi nízkou cenu tepla. Zároveň je v produkci tepla výkonová rezerva pro zvýšení dodávek.

Tím by kromě připojování dalších obytných oblastí mohla být i výstavba nových průmyslových provozů, motivována právě nízkou cenou dodávaného tepla. Kromě toho lze zvážit i možnost budoucího zásobování chladem.

### 5.5.3 Shrnutí

Obě zpracované varianty využití malých modulárních reaktorů nabízejí konkurenceschopnou cenu tepla, která je nižší než současná cena. Pro variantu samostatné výroby tepla má investice dobu návratnosti 21 let. Při ceně 2000 Kč/MWh elektřiny a 360,50 Kč/GJ tepla má projekt kogenerace tepla a elektřiny návratnost 18 let. Obě varianty mají přijatelnou dobu návratnosti investice do infrastrukturního projektu tohoto typu.

Provedené citlivostní analýza demonstrovaly možnost dalšího snížení ceny tepla a elektřiny v případě dosažení vyšší míry využití reaktoru.

## 6 Závěr

V této diplomové práci byl zkoumán současný stav českého teplárenství a možnosti jeho budoucího vývoje. Ty se týkají zejména náhrady současných zdrojů spalujících fosilní paliva, zejména uhlí.

Byly kontaktovány provozovatelé různých soustav centrálního zásobování teplem a provozovatelé zdrojů tepla pro tyto soustavy a vyhledány lokace pro možnou aplikaci malého modulárního jaderného reaktoru. Z dat, která se podařilo nashromáždit, byla vybrána lokalita s nejlepšími předpoklady pro zásobování teplem. Pro vybranou lokalitu, SCZT Ústí nad Labem, byl zpracován projekt náhrady uhelných bloků v teplárně Trmice malými modulárními reaktory. Z popsaných současných projektů malých modulárních reaktorů byl pro projekt vybrán design od společnosti NuScale. Pro projekt bylo zhotoveno ekonomické posouzení pro varianty výroby tepla a pro kogeneraci tepla a elektrické energie. K ekonomickému posouzení byly pro obě varianty zpracovány citlivostní analýzy na vybrané parametry.

Pro obě varianty vyšla cena za GJ tepla nižší, než je současná cena. Návratnost projektu samostatné výroby tepla byla 21 let. Při ceně 2000 Kč/MWh elektrické energie a 360,50 Kč/GJ tepla byla návratnost projektu kogenerace elektřiny a tepla spočtena na 18 let.

*Tabulka 2 Výsledné hodnoty a porovnání se současností*

Samostatná výroba tepla		Kogenerace tepla a elektřiny		Současnost
Cena tepla	Návratnost	Cena tepla	Návratnost	Cena tepla
487,60 Kč/GJ	21	360,50 Kč/GJ	18	647 Kč/GJ

Výsledky této práce ukazují velký potenciál využití malých modulárních reaktorů v českém teplárenství. Přes velké počáteční kapitálové náklady představují malé modulární reaktory perspektivní technologií pro transformaci teplárenství v České republice. Jedná se o bezemisní zdroje tepla a elektřiny a obě komodity jsou schopné produkovat za dlouhodobě stabilní ceny.

Pro další rozvoj tohoto tématu by bylo vhodné rozpracování možnosti provozu malých modulárních reaktorů společně s dalšími technologiemi, které by fungovaly jako špičkové zdroje, zatímco SMR by kryly základní zatížení. V souvislosti s aplikací malých modulárních reaktorů a nových technologií a bezpečnostních přístupů použitých v jejich designech bude třeba výrazně modernizovat legislativu České republiky, která se týká provozu jaderných zařízení a jaderné bezpečnosti.

## 7 Reference

- [1] VLACH, Josef. *Zásobování teplem a teplotnictví*. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [2] RUTZ, Dominik, Carlo WINTERSCHIED, Thomas PAUSCHINGER, Sebastian GRIMM, Tobias ROTH, Borna DORAČIĆ, Gillian DYER a Thomas A. ØSTERGAARD. *Upgrading the performance of district heating networks: Technical and non-technical approaches*. Mnichov: WIP Renewable Energie, 2019. ISBN 978-3-936338-49-2.
- [3] LUND, Henrik, Sven WERNER, Robin WILTSHIRE, Svend SVENDSEN, Jan Eric THORSEN, Frede HVELPLUND a Brian Vad MATHIESEN. 4th Generation District Heating (4GDH). *Energy* [online]. 2014, **68**, 1-11 [cit. 2023-05-13]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2014.02.089
- [4] Vytápění domácností. *Envirometr* [online]. [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.envirometr.cz/data/vytapeni-domacnosti>
- [5] FRONING, Sabine. *DHC/CHP/RES a smile for the environment* [online]. In: . Euroheat [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20090225073425/http://www.euroheat.org/documents/030520.Kiev.ppt>
- [6] *Pražská teplotárenská* [online]. Praha: Pražská teplotárenská a.s., 2023 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.ptas.cz/>
- [7] *Veolia* [online]. Veolia Energie ČR, a. s., 2023 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.vecr.cz/>
- [8] *ERÚ výsledné ceny tepla 2021*. Jihlava: ERÚ, 2023.
- [9] Elektrárna Mělník: Dodávka tepla. *Skupina ČEZ* [online]. ČEZ, a. s., 2023 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/uhelne-elektrarny-a-teplarny/uhelne-elektrarny-a-teplarny-cez-v-cr/elektrarna-melnik-58183>

- [10] *Spalovna Malešice* [online]. SIEGL s.r.o., 2023 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://siegl.cz/blog/zajimavosti/spalovna-malesice>
- [11] *Teplárny Brno* [online]. 2023 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.teplarny.cz/>
- [12] *ŠKO-energo* [online]. ŠKO-ENERGO s.r.o [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.sko-energo.cz/>
- [13] MAŠČUCH, Jakub. *Decentralizované energetické systémy II*. Praha, 2022.
- [14] PILAŘ, Lukáš a Jitka JENÍKOVÁ. *Alternativní a obnovitelné zdroje energie*.
- [15] PILAŘ, Lukáš. *Obnovitelné zdroje energie: Geotermální energie*. Praha, 2023.
- [16] *Česká republika přechází na nové zdroje vytápění, 4 miliony obyvatel a firmy dostanou cenově dostupné teplo i nadále* [online]. Praha: MPO, 2023 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/ceska-republika-prechazi-na-nove-zdroje-vytapeni--4-miliony-obyvatel-a-firmy-dostanou-cenove-dostupne-teplo-i-nadale--256716/>
- [17] *Využití tepla z jaderných energetických zdrojů: Konference s mezinárodní účastí. 1*. Praha: Ústřední informační středisko pro jaderný program, 1976.
- [18] *Stavba horkovodu z Temelína do Budějovic bude mít dva roky zpoždění* [online]. oenergetice [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/teplarenstvi/stavba-horkovodu-z-temelina-do-budejovic-bude-mit-dva-roky-zpozdeni>
- [19] ČEZ.CZ. *Teplo z Temelína zlepšuje ovzduší v Týně nad Vltavou* [online]. Atominfo.Cz [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2017/03/teplo-z-temelina-zlepsuje-ovzdusi-v-tyne-nad-vltavou/>
- [20] LOCATELLI, Giorgio, Chris BINGHAM a Mauro MANCINI. Small modular reactors: A comprehensive overview of their economics and strategic aspects. *Progress in Nuclear Energy* [online]. 2014, **73**, 75-85 [cit. 2023-05-21]. ISSN 01491970. Dostupné z: doi:10.1016/j.pnucene.2014.01.010
- [21] KIM, Keung Koo, et al. SMART: the first licensed advanced integral reactor.

*Journal of Energy and Power Engineering*. 2014, (8), 94-102.

- [22] INGERSOLL, D.T., Z.J. HOUGHTON, R. BROMM a C. DESPORTES. NuScale small modular reactor for Co-generation of electricity and water. *Desalination* [online]. 2014, **340**, 84-93 [cit. 2023-04-19]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2014.02.023
- [23] *ADVANCES IN SMALL MODULAR REACTOR TECHNOLOGY DEVELOPMENTS* [online]. Vienna: IAEA, 2022, [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_booklet\\_2022.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf)
- [24] NOVOTNÝ, Lukáš. *Aplikace malého modulárního jaderného reaktoru pro důlní projekty v Kanadě*. Praha, 2021. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Jan Syblík.
- [25] VUJIĆ, Jasmina, Ryan M. BERGMANN, Radek ŠKODA a Marija MILETIĆ. Small modular reactors: Simpler, safer, cheaper?. *Energy* [online]. 2012, **45**(1), 288-295 [cit. 2023-05-21]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2012.01.078
- [26] GARDNER, Timothy. U.S. approves design for NuScale small modular nuclear reactor. *Reuters* [online]. [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://www.reuters.com/business/energy/us-approves-design-nuscale-small-modular-nuclear-reactor-2023-01-20/>
- [27] BAROCH, Pavel. V USA CERTIFIKOVALI HISTORICKY PRVNÍ MODULÁRNÍ REAKTOR. *Týdeník Hrot* [online]. [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://www.tydenikhrot.cz/clanek/v-usa-certifikovali-historicky-prvni-modularni-reaktor>
- [28] KOLEKTIV AUTORŮ. *DOPADOVÁ STUDIE ODCHODU OD ENERGETICKÉHO SPALOVÁNÍ UHLÍ V MORAVSKOSLEZSKÉM KRAJI*. 2020.
- [29] BUCHHOLZ, Sebastian. *Advanced and innovative safety features of LW SMRs* [online]. In: . [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: [https://www.nuclearenergy.polimi.it/wp-content/uploads/2022/07/3.-ELSMOR\\_summerSchool\\_advancedSafetyFeatures.pdf](https://www.nuclearenergy.polimi.it/wp-content/uploads/2022/07/3.-ELSMOR_summerSchool_advancedSafetyFeatures.pdf)
- [30] ADAMOV, E. O., A. V. KAPLIENKO, V. V. ORLOV, V. S. SMIRNOV, A. V. LOPATKIN, V. V. LEMEKHOV a A. V. MOISEEV. Brest Lead-Cooled Fast Reactor: From Concept to

- Technological Implementation. *Atomic Energy* [online]. 2021, **129**(4), 179-187 [cit. 2023-04-19]. ISSN 1063-4258. Dostupné z: doi:10.1007/s10512-021-00731-w
- [31] Russia notes progress with fast reactor technology. *World Nuclear News* [online]. [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/NN-Russian-notes-progress-with-fast-reactor-technology-23081601.html>
- [32] SLEZDIK, David. *The BWRX 300* [online]. In: . [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://fermi.ee/wp-content/uploads/2020/02/15.45-ge-hitachibwrx-300-david-sledzik.pdf>. 2020.
- [33] POMOGAEV, Aleksandr. *BWRX-300 ISOLATION CONDENSER SYSTEM ANALYSIS*. Lappeenranta, 2022. Diplomová práce. Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT. Vedoucí práce Juhani Hyvärinen.
- [34] Construction of CAREM underway. *World nuclear news* [online]. London: World Nuclear Association [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/NN-Construction-of-CAREM-underway-1002144.html>
- [35] MARCEL, Christian Pablo, et al. *CAREM-25: A Safe Innovative Small Nuclear Power Plant*. 2017. ISSN 1137-2885.
- [36] MAGAN, H. Boado, D. F. DELMASTRO, M. MARKIEWICZ et al. CAREM Project Status. *Science and Technology of Nuclear Installations* [online]. 2011, **2011**, 1-6 [cit. 2023-04-19]. ISSN 1687-6075. Dostupné z: doi:10.1155/2011/140373
- [37] KOLEKTIV ÚJV ŘEŽ A.S. A CVŘ. *Energy Well Studna energie* [online]. In: . [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: [https://www.tespo-eng.cz/images/zpravy/24-21-rocnik-konference-technologie-pro-elektrarny-a-teplarny-na-tuha-paliva-minulosti/Medlov\\_FHR\\_vl.pdf](https://www.tespo-eng.cz/images/zpravy/24-21-rocnik-konference-technologie-pro-elektrarny-a-teplarny-na-tuha-paliva-minulosti/Medlov_FHR_vl.pdf)
- [38] ZHANG, Zuoyi, Zongxin WU, Dazhong WANG, Yuanhui XU, Yuliang SUN, Fu LI a Yujie DONG. Current status and technical description of Chinese 2×250MWth HTR-PM demonstration plant. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2009, **239**(7), 1212-1219 [cit. 2023-04-19]. ISSN 00295493. Dostupné z: doi:10.1016/j.nucengdes.2009.02.023
- [39] KOSTIN, V. I., Yu. K. PANOV, V. I. POLUNICHEV a I. E. SHAMANIN. Floating power-

- generating unit with a KLT-40S reactor system for desalinating sea water. *Atomic Energy* [online]. 2007, **102**(1), 31-35 [cit. 2023-04-19]. ISSN 1063-4258. Dostupné z: doi:10.1007/s10512-007-0004-4
- [40] Small nuclear reactors for power and icebreaking. *World Nuclear News* [online]. [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: [https://www.world-nuclear-news.org/NN\\_Small\\_nuclear\\_reactors\\_for\\_power\\_and\\_icebreaking\\_0710112.html](https://www.world-nuclear-news.org/NN_Small_nuclear_reactors_for_power_and_icebreaking_0710112.html)
- [41] Rosatom plans first land-based SMR for Russian Far East. *World Nuclear News* [online]. [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Rosatom-plans-first-land-based-SMR-for-Russian-Far>
- [42] DIAKOV, Anatoli C., Alexander M. DMITRIEV, Jungmin KANG, Alexey M. SHUVAYEV a Frank N. VON HIPPEL. Feasibility of Converting Russian Icebreaker Reactors from HEU to LEU Fuel. *Science & Global Security* [online]. 2007, **14**(1), 33-48 [cit. 2023-05-25]. ISSN 0892-9882. Dostupné z: doi:10.1080/08929880600620575
- [43] *Canadian small nuclear reactor: SMR roadmap* [online]. Canadian nuclear association, 2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://smrroadmap.ca/>
- [44] Formal licence review begins for Canadian SMR. *World Nuclear News* [online]. [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Formal-licence-review-begins-for-Canadian-SMR>
- [45] REYES, José N. NuScale Plant Safety in Response to Extreme Events. *Nuclear Technology* [online]. 2017, **178**(2), 153-163 [cit. 2023-04-19]. ISSN 0029-5450. Dostupné z: doi:10.13182/NT12-A13556
- [46] DE HAAS, Simon, David CHU, Kevin ELLIS et al. Integrated Design of a Reactor Core for the Rolls-Royce Small Modular Reactor Project. In: *Volume 1: Operations and Maintenance, Engineering, Modifications, Life Extension, Life Cycle, and Balance of Plant; Instrumentation and Control (I&C) and Influence of Human Factors; Innovative Nuclear Power Plant Design and SMRs* [online]. American Society of Mechanical Engineers, 2018, s. - [cit. 2023-04-19]. ISBN 978-0-7918-5143-2. Dostupné z: doi:10.1115/ICONE26-81311



- [47] *UK SMR: A national endeavour* [online]. In: . Rolls Royce [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20171026100433/https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/nuclear/a-national-endeavour.pdf>
- [48] Two sites added to Rolls-Royce SMR's UK factory shortlist. *World Nuclear News* [online]. London: World Nuclear Association [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Two-sites-added-to-Rolls-Royce-SMR-s-UK-factory-sh>
- [49] *Status Report – UK SMR (Rolls-Royce and Partners)* [online]. In: . Vídeň: IAEA [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: [https://aris.iaea.org/PDF/UK-SMR\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/PDF/UK-SMR_2020.pdf)
- [50] CHANG, M.H., K.K. KIM a J.W. YEO. ADVANCED DESIGN FEATURES ADOPTED IN SMART. *SMALL AND MEDIUM SIZED REACTORS: STATUS AND PROSPECTS*. Vídeň: IAEA, 2002, , 244-256. ISSN 1563–0153. IAEA-SR-218/28.
- [51] Thorium Molten Salt Reactor (TMSR). *Thorium energy world* [online]. [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <http://www.thoriumenergyworld.com/china.html>
- [52] Chinese molten-salt reactor cleared for start up. *World Nuclear News* [online]. [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Chinese-molten-salt-reactor-cleared-for-start-up>
- [53] *Status report 66 - VBER-300 (VBER-300)* [online]. In: . [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://aris.iaea.org/PDF/VBER-300.pdf>
- [54] ZELIANG, Chireuding, Yi MI, Akira TOKUHIRO, Lixuan LU a Aleksey REZVOI. Integral PWR-Type Small Modular Reactor Developmental Status, Design Characteristics and Passive Features: A Review. *Energies* [online]. 2020, **13**(11) [cit. 2023-04-19]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en13112898
- [55] *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. Praha, 2023 [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/ines/stupnice-ines/>
- [56] *INES: The international nuclear and radiological event scale* [online]. In: . International Atomic Energy Agency [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/sites/default/files/ines.pdf>

- [57] *Bezpečnost jaderné energie*. Praha: Úřad pro jadernou bezpečnost ČR. ISSN 1210-7085.
- [58] MLADÝ, Ondřej. *PRAVDĚPODOBNOSTNÍ HODNOCENÍ BEZPEČNOSTI: PSA 2020 VYBRANÉ ASPEKTY*. VÚ pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti ČEZ, a.s., 2020.
- [59] MLADÝ, Ondřej. *PRAVDĚPODOBNOSTNÍ HODNOCENÍ BEZPEČNOSTI*. Brno, 2000.
- [60] *PRA Procedures Guide: A Guide to the Performance of Probabilistic Risk Assessments for Nuclear Power Plants*. 1 Chapters 1–8. NUREG/CR-2300.
- [61] *Probabilistic Safety Analysis Procedures Guide*. U.S. Nuclear Regulatory Commission. NUREG/CR-2815, BNL-NUREG-51559.
- [62] ČESKÁ REPUBLIKA. *Vyhláška č. 162/2017 Sb.: Vyhláška o požadavcích na hodnocení bezpečnosti podle atomového zákona*. In: . 2017.
- [63] *Pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti-bezpečnostní návod BN-JB-1.6*. In: . Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2021.
- [64] PREHRADNÝ, Jan. *Rizika a způsob jejich oceňování*.
- [65] WALKER, J. Samuel. *Three mile island a nuclear crisis in historical perspective*. University of California Press, 2004. ISBN 0-520-23940-7.
- [66] ALARA – As Low As Reasonably Achievable. *Center for disease control and prevention* [online]. CDC [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.cdc.gov/nceh/radiation/alara.html>
- [67] *PSA/PRA*.
- [68] KOLEKTIV AUTORŮ. *PSA Probabilistic Safety Assessment*. Brno, 2019.
- [69] *Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants: Specific Safety Guide No. SSG-3*. Vídeň: IAEA, 2010. ISBN 978–92–0–114509–3.
- [70] *DEVELOPMENT AND APPLICATION OF LEVEL 2 PROBABILISTIC SAFETY ASSESSMENT FOR NUCLEAR POWER PLANTS: SPECIFIC SAFETY GUIDE*. Vídeň:

IAEA, 2010. ISBN 978–92–0–102210–3.

- [71] ČESKÁ REPUBLIKA. *Zákon č. 235/2004 Sb.: Zákon o dani z přidané hodnoty*. In: . 2004.
- [72] ČESKÁ REPUBLIKA. *Energetický regulační věstník: Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 4/2021 ze dne 16. září 2021, k cenám tepelné energie*. In: . Jihlava: ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD, 2021, ročník 21.
- [73] *Teplo Přerov* [online]. Přerov, 2023 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <http://www.teploprerov.cz/index.php?nid=1130&lid=cs&oid=114201>
- [74] Nahlížení do Katastru nemovitostí. *Český ústav katastrální a zeměměřičský* [online]. Praha: ČÚZK, 2023 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://nahliznidokn.cuzk.cz/VyberKatastrMapa.aspx>
- [75] ASUEGA, Anthony, Braden J. LIMB a Jason C. QUINN. Techno-economic analysis of advanced small modular nuclear reactors. *Applied Energy* [online]. 2023, **334** [cit. 2023-05-27]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2023.120669
- [76] MIGNACCA, B. a G. LOCATELLI. Economics and finance of Small Modular Reactors: A systematic review and research agenda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2020, **118** [cit. 2023-05-27]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2019.109519
- [77] PEARL, Larry. DOE approves up to \$1.4B to test 12-module NuScale reactor. *Utility Dive* [online]. Industry Dive [cit. 2023-05-30]. Dostupné z: <https://www.utilitydive.com/news/doe-approves-up-to-14b-to-test-12-module-nuscale-reactor/587265/>
- [78] *\$275 Million for NuScale VOYGR deployment in Romania announced* [online]. 2023 [cit. 2023-05-30]. Dostupné z: <https://www.ans.org/news/article-5039/275-million-for-nuscale-voygr-deployment-in-romania-announced/>



## Seznam obrázků

Obrázek 1 Graf vývoje počtu domácností napojených na SCZT [4].....	9
Obrázek 2 Mapa SCZT Pražská teplárenská [6] .....	10
Obrázek 3 Model reaktoru BWRX-300 [33].....	17
Obrázek 4 Řez reaktorem CAREM 25 [35].....	18
Obrázek 5 Carem-havarijní systémy [35] .....	19
Obrázek 6 Model Energy Well [37] .....	20
Obrázek 7 Palivové desky Energy well [37] .....	21
Obrázek 8 HTR reaktor a parogenerátor [38].....	21
Obrázek 9 Model modulu (vlevo) a 12 modulové elektrárny (vpravo) [22].....	23
Obrázek 10 NuScale-havarijní chlazení [22].....	25
Obrázek 11 Reaktor VBER-300 [53].....	28
Obrázek 12 Obrázek 11 Stupnice INES [55].....	29
Obrázek 13 Rizika [59].....	33
Obrázek 14 Rizika vybraných činností [59].....	34
Obrázek 15 Minimální kritické řezy [59] .....	35
Obrázek 16 Obrana do hloubky [64] .....	36
Obrázek 17 Diagram AND [67] .....	38
Obrázek 18 Diagram OR [67] .....	38
Obrázek 19 Strom poruch s vyjádřenými pravděpodobnostmi [64].....	39
Obrázek 20 Schéma systémů dieselového agregátu [67] .....	39
Obrázek 21 Strom poruch systému dieselového agregátu [67].....	40
Obrázek 22 Hierarchie výsledků PSA [59] .....	41
Obrázek 23 Přehled cen tepla ve velkých soustavách v ČR 2012-2023 [73] .....	47
Obrázek 24 Diagramy trvání výkonu .....	48
Obrázek 25 Samostatná roční diagram trvání odběru tepla Trmice .....	49
Obrázek 26 Průměrný potřebný měsíční výkon 2022 .....	50
Obrázek 27 Průměrný potřebný týdenní výkon 2022 .....	50
Obrázek 28 Trmický elektrárna a okolí [74] .....	51
Obrázek 29 Trmice-detail [74].....	51
Obrázek 30 Trmice – model záplav .....	52
Obrázek 31 Poměr CAPEX a OPEX .....	55
Obrázek 32 Kumulované NPV.....	56
Obrázek 33 Závislost ceny tepla na CAPEX a OPEX .....	56

Obrázek 34 Závislost LCOH na míře využití .....	57
Obrázek 35 Závislost LCOH na úrokové míře .....	57
Obrázek 36 Procentuální zastoupení CAPEX a OPEX.....	60
Obrázek 37 Kumulované NPV.....	61
Obrázek 38 Závislost LCOE na CAPEX a OPEX.....	61
Obrázek 39 Závislost ceny tepla na CAPEX a OPEX .....	62
Obrázek 40 Závislost LCOE na úrokové míře .....	62
Obrázek 41 Závislost LCOE na míře využití.....	63

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Malé modulární reaktory s perspektivou realizace [23].....	15
Tabulka 2 Výsledné hodnoty a porovnání se současností.....	64