

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

## JADERNÁ ELEKTRÁRNA JE ZELENÝ ZDROJ ENERGIE

THE NUCLEAR POWER PLANT – THE GREEN SOURCE OF ENERGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. MARTIN HYNČICA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Ing. OLDŘICH MATAL, CSc.

BRNO 2010



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2009/2010

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Martin Hynčica

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Jaderná elektrárna je zelený zdroj energie**

v anglickém jazyce:

### **The Nuclear Power Plant – The Green Source of Energy**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Porovnání jaderné energetiky s dalšími způsoby masové produkce elektřiny schopné pokrýt potřeby lidstva. Při porovnání se zaměřit na emise, odpady a další negativní vlivy na životní prostředí a veřejné zdraví, vztažené na jednotku výkonu, porovnané s přínosem pro obyvatele. Při porovnání neopomenout také obnovitelné zdroje energie.

Cíle diplomové práce:

- Souhrnné porovnání jaderné energetiky s ostatními způsoby výroby elektrické energie.
- Jaké vykazuje jaderná elektrárna vlivy na okolí?
- Jaké jsou perspektivy využití jaderných elektráren ve světě a v ČR?
- Jaká jsou bezpečnostní rizika provozu jaderné elektrárny?
- Jak je řešeno ve světě a v ČR nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem?

Seznam odborné literatury:

- 1) Státní energetická koncepce České republiky
- 2) Zpráva Nezávislé odborné komise pro posouzení energetických potřeb České republiky v dlouhodobém časovém horizontu (tzv. Pačesova komise)
- 3) Oponentní posudek ke Zprávě Nezávislé odborné komise pro posouzení energetických potřeb České republiky v dlouhodobém časovém horizontu
- 4) Další zdroje informací jsou dostupné na internetu

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Oldřich Matal, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 3. 11. 2009

L.S.

---

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

**Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá jadernou energetikou a jejím vlivem na životní prostředí. V práci je popsán aktuální stav energetiky v ČR, zvláště energetiky jaderné a její výhledy do budoucna. Práce se zabývá nakládáním s odpady produkovanými jadernou elektrárnou a vyhořelým jaderným palivem. Autor se zabývá porovnáním jaderné elektrárny s ostatními zdroji elektrické energie, které jsou provozovány a s jejichž zastoupením v energetickém mixu se počítá i v budoucnu. Zaměřuje se nejen na zdroje využívající fosilní paliva, ale i obnovitelné zdroje energie. Tyto výroby elektrické energie autor porovnává z pohledu produkovaných odpadů na jednotku vyrobené energie, nároků na zastavěný prostor, bezpečnostních ukazatelů, ekonomických ukazatelů a dalších vlastností vybraných zdrojů.

**Abstract**

This diploma thesis deals with nuclear energetics and its impact to the environment. Present state of the energetics, mainly nuclear energetics, in the Czech Republic is discussed here. Also perspective of nuclear energetics is given. The thesis describes nuclear power plant waste handling and also spent nuclear fuel handling. Nuclear power plant is compared with other sources of electric energy, which are counted to the energetic mix. The author focuses on fossil fuels and also on the renewable energy sources. The amount of produced waste to the unit of produced energy, built up area, safety and economic indicators and other parameters are followed for each source of energy.

**Klíčová slova**

jaderná elektrárna, radioaktivní odpady, vyhořelé jaderné palivo, uzavření palivového cyklu, obnovitelné zdroje energie, vliv jaderné elektrárny na životní prostředí

**Key words**

nuclear power plant, nuclear waste, spent nuclear fuel, closed fuel cycle, renewable energy sources, nuclear power plant impact on environment



HYNČICA, M. *Jaderná elektrárna je zelený zdroj energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 73 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Oldřich Matal, CSc.





### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Jaderná elektrárna je zelený zdroj energie* vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Oldřicha Matala, CSc. a Ing. Jana Hory a uvedl v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 28. 5. 2010

---

podpis autora



*Rád bych poděkoval prof. Ing. Oldřichu Matalovi, CSc.  
a Ing. Janu Horovi za odborné vedení mé práce,  
za podnětné připomínky a cenné rady, kterými přispěli  
k vypracování této diplomové práce.*



**OBSAH**

|  |           |
|--|-----------|
| ÚVOD .....   | 15        |
| <b>1 AKTUÁLNÍ STAV A OČEKÁVANÝ VÝVOJ ČESKÉ ENERGETIKY .....</b>                              | <b>16</b> |
| 1.1 Aktuální stav energetiky v ČR .....  | 16        |
| 1.1.1 Zemní plyn, uhlí, uran v české energetice.....   | 17        |
| 1.1.2 Alternativní zdroje energie.....   | 19        |
| 1.1.3 Spotřeba energií v ČR .....  | 20        |
| 1.2 Budoucnost české energetiky .....  | 22        |
| 1.2.1 Státní energetická koncepce .....  | 22        |
| 1.2.2 Cíle SEK.....  | 22        |
| 1.2.3 Energetické scénáře.....   | 24        |
| <b>2 VLIVY JE NA JEJÍ OKOLÍ.....</b>   | <b>26</b> |
| 2.1 Vlivy JE na okolí.....   | 26        |
| 2.1.1 Znečištění ovzduší.....  | 26        |
| 2.1.2 Vliv JE na mikroklima .....  | 26        |
| 2.1.3 Ionizující záření.....   | 27        |
| 2.1.4 Odpadní vody neaktivní .....   | 27        |
| 2.1.5 Plynné a kapalné výpusti obsahující radionuklidy.....                                  | 28        |
| 2.1.6 Elektromagnetické záření.....  | 29        |
| 2.1.7 Hluk.....  | 30        |
| 2.1.8 Vliv JE na půdu .....  | 30        |
| 2.1.9 Vliv na krajinu.....   | 30        |
| 2.1.10 Dopady na zdraví obyvatel, sociální a ekonomické vlivy.....                           | 30        |
| 2.1.11 Další vlivy JE na okolí .....   | 31        |
| <b>3 NAKLÁDÁNÍ S RADIOAKTIVNÍMI ODPADY A VYHOŘELÝM JADERNÝM PALIVEM V ČR A VE SVĚTĚ.....</b> | <b>32</b> |
| 3.1 Ukládání nízko a středněaktivních odpadů.....  | 33        |
| 3.1.1 Úložiště Richard a Bratrství.....  | 33        |
| 3.1.2 Úložiště Dukovany.....   | 34        |
| 3.2 Ukládání vysoce aktivních odpadů .....   | 34        |
| 3.2.1 Kontejnery CASTOR .....  | 34        |
| 3.2.2 Palivový cyklus v ČR.....  | 36        |
| 3.2.3 Uzavření palivového cyklu, VJP jako cenná surovina.....                                | 38        |
| 3.2.4 Výstavba hlubinného úložiště v ČR.....   | 41        |
| 3.3 Nakládání s RaO ve světě.....  | 42        |
| 3.3.1 Výstavba HU ve světě.....  | 43        |
| <b>4 PERSPEKTIVA VYUŽITÍ JE VE SVĚTĚ A V ČR.....</b>   | <b>44</b> |
| 4.1 Vývojové generace jaderných elektráren .....   | 44        |
| 4.1.1 JE s reaktory GEN I, GEN II a GEN III .....  | 45        |
| 4.1.2 JE s reaktory GEN IV .....   | 45        |

---

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.2      | Výstavba nových jaderných zdrojů v ČR a ve světě .....                                     | 47        |
| 4.2.1    | Přístavba 3. a 4. bloku ETE .....  | 49        |
| 4.2.2    | Dostavba 3. a 4. bloku JE Mochovce .....   | 52        |
| 4.2.3    | Dostavba JE Bohunice.....  | 52        |
| 4.3      | Možnosti dalšího využití jaderné energetiky .....  | 54        |
| 4.3.1    | Využití ve vodíkové energetice a průmyslových procesech .....                              | 54        |
| 4.3.2    | Mobilní jaderná elektrárna.....  | 56        |
| 4.3.3    | Využití JE pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla.....                                  | 58        |
| <b>5</b> | <b>POROVNÁNÍ JE S OSTATNÍMI PRODUCENTY ELEKTRICKÉ ENERGIE (VLASTNÍ NÁZOR AUTORA) .....</b> | <b>60</b> |
| 5.1      | Doba výstavby .....  | 60        |
| 5.2      | Výkonové ukazatele, roční doba využití .....   | 61        |
| 5.3      | Investiční náklady .....   | 62        |
| 5.4      | Finanční náklady na výrobu EE.....   | 64        |
| 5.5      | Nároky na zastavěný prostor .....  | 65        |
| 5.6      | Vliv na životní prostředí .....  | 66        |
| 5.7      | Srovnání provozní bezpečnosti JE a ostatních zařízení pro výrobu EE .....                  | 68        |
| <b>6</b> | <b>ZÁVĚR.....</b>  | <b>70</b> |
| <b>7</b> | <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>   | <b>71</b> |
| <b>8</b> | <b>SEZNAM ZKRATEK.....</b>   | <b>72</b> |

## ÚVOD

Společně se zvyšováním životní úrovně dnešní společnosti roste celosvětově i spotřeba energií, včetně energie elektrické. Celosvětově je pro výrobu elektrické energie nejvíce využíváno elektráren spalujících fosilní paliva. Fosilní zdroje se však stávají problematickými a velice diskutovanými. Prvním problémem jsou emise, především emise tzv. skleníkových plynů, a jejich prokázaný negativní vliv na životní prostředí. Druhým problémem fosilních paliv je jejich očekávaný nedostatek a zužování dostupných zásob. Je tak zřejmá snaha o využívání stávajících zdrojů fosilních paliv co nejefektivnějším a nejekologičtějším způsobem. Z výše uvedených důvodů se do zájmu energetiků dostalo hledání nových nízkoemisních zdrojů elektrické energie, které budou bezpečné jak provozně, tak i z hlediska stability dodávky elektrické energie.

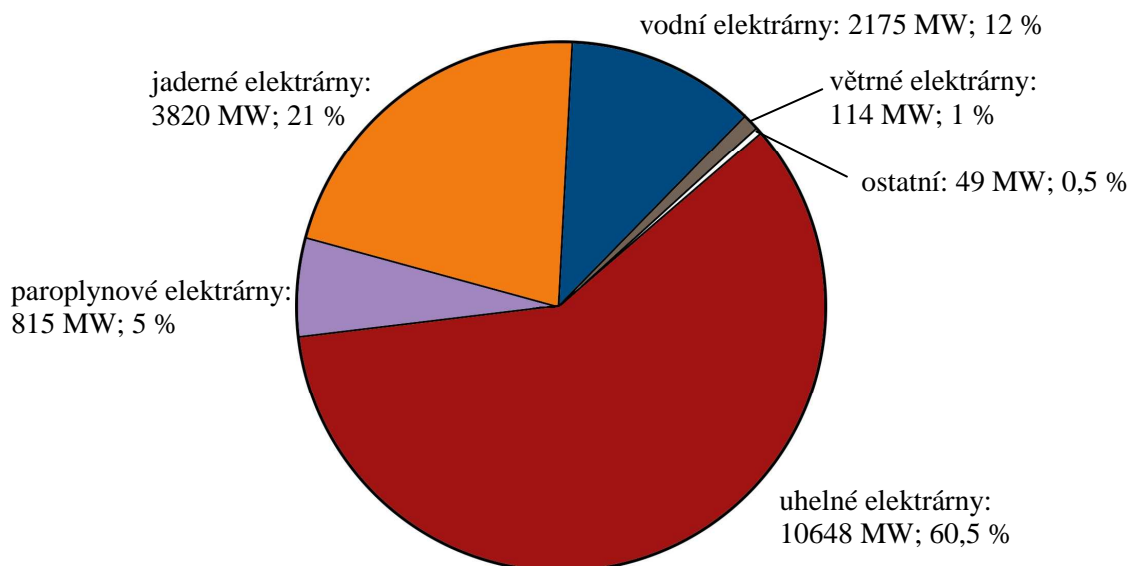
Do popředí energetického mixu většiny států se tak postupně dostávají relativně nové technologie pro výrobu elektrické energie. Mezi ně nepochybně patří technologie využívající jadernou energii vzniklou štěpením jader štěpitelných materiálů, dnes většinou zastoupenými uranem. Dalšími moderními metodami je využívání obnovitelných zdrojů energie. Tyto metody využívají energii ze Slunce, kinetickou energii vody a větru, nebo energii akumulovanou v biomase. Od využívání těchto zdrojů očekává odborná veřejnost především zpomalení růstu produkce škodlivých emisí, nebo dokonce obrácení tohoto trendu a tedy snížení množství energetikou produkováných škodlivých emisí.

Autor v této práci uvádí svůj vlastní názor na využitelnost jednotlivých technologií pro výrobu elektrické energie v potřebném množství. Uvádí výhody i nevýhody při využívání vybraných zdrojů elektrické energie. Práce je zaměřena na popis jaderné energetiky, jsou zde popsány současné i teprve vyvíjené typy jaderných elektráren a jejich perspektiva využití.

# 1 AKTUÁLNÍ STAV A OČEKÁVANÝ VÝVOJ ČESKÉ ENERGETIKY

## 1.1 Aktuální stav energetiky v ČR

Celkový instalovaný elektrický výkon v ČR byl 17561 MW na konci roku 2007 (Obr. 1). Aktuálně je toto číslo vyšší, asi 17724 MW (zvýšen modernizací třetího bloku EDU, spouštěním malých paroplynových soustav, větrných a solárních elektráren). Podle ERÚ (Energetický regulační úřad) je z celkového výkonu přes 12,2 GWe vyráběno v zařízeních společnosti ČEZ. Zbytek výkonu produkuje více než dvacet společností s jednotkovým výkonem nad 50 MW, např. Sokolovská uhelná, Energetický a průmyslový holding (EPH), Dalkia Česká republika a další. Výroba elektrické energie neustále stoupá, přičemž většinový podíl na výrobě má uhlí a postupně se navyšuje podíl elektřiny z jaderné energetiky. Struktura výroby z konce roku 2007 je uvedena na Obr. 1. Je zde uveden i procentuální podíl jednotlivých zástupců výroby na celkové výrobě elektrické energie v ČR.



Obr. 1 Struktura instalovaného výkonu pro ČR [2]

Struktura výroby elektrické energie v sobě stále ukazuje struktury národního hospodářství minulého režimu s orientací zejména na hutnictví a těžké strojírenství, která byla postavena na předdimenzovaném a velice spolehlivém instalovaném výkonu parních elektráren a tepláren na uhlí. Později tyto zdroje byly doplněny provozem Elektrárny Dukovany (EDU). Tyto zdroje jsou dále doplněny dobře regulovatelnými teplárnami na zemní plyn a špičkovým výkonem v akumulačních a přečerpávacích vodních elektrárnách. Největší změnou ve výrobě elektřiny od roku 2000 bylo spuštění dvou bloků JE Temelín a tím přínos 2000 MW výkonu. Česká elektroenergetika je dnes stabilizovaná, soběstačná a závislá především na dvou tuzemských zdrojích, a to na uhlí a na jaderném palivu, což je pro nás výhodné. Dovození závislost ČR je nejvíce na ropě a zemním plynu, který dovážíme z východních zemí [2].



### 1.1.1 Zemní plyn, uhlí, uran v české energetice

Česká republika je stát, který je zcela závislý na dovozu zemního plynu z Ruska, Norska a Spolkové republiky Německo. Z celkové spotřeby pokrývají dodávky z Ruska cca 75 %, jednou čtvrtinou je pokryta norským plynem. Z vlastní těžby je pokryto pouze 1 % roční spotřeby. Zásobování ČR i států EU z uvedených zemí probíhá většinou prostřednictvím tranzitních plynovodů. Oproti většině ostatních států Evropské unie se tuzemské plynárenství odlišuje především tím, že se pouze zanedbatelný podíl zemního plynu využívá na výrobu elektřiny. Vzhledem k tomu je pro tuzemské plynárenství typický značný rozdíl mezi spotřebou v zimních a letních měsících, který se dlouhodobě pohybuje v poměru 4 až 5 ku 1. Ještě vyšší poměr, a to 7 až 8 ku 1, se projevuje mezi minimálním a maximálním dnem spotřeby v průběhu roku. Vyrovnaní nerovnoměrnosti mezi odběrem ze zdrojů a spotřebou zajišťují zejména podzemní zásobníky zemního plynu. Ty slouží k uskladňování plynu v letním období a k těžbě plynu v zimním období při denních spotřebách vyšších, než je smluvený maximální denní nákup plynu [2].

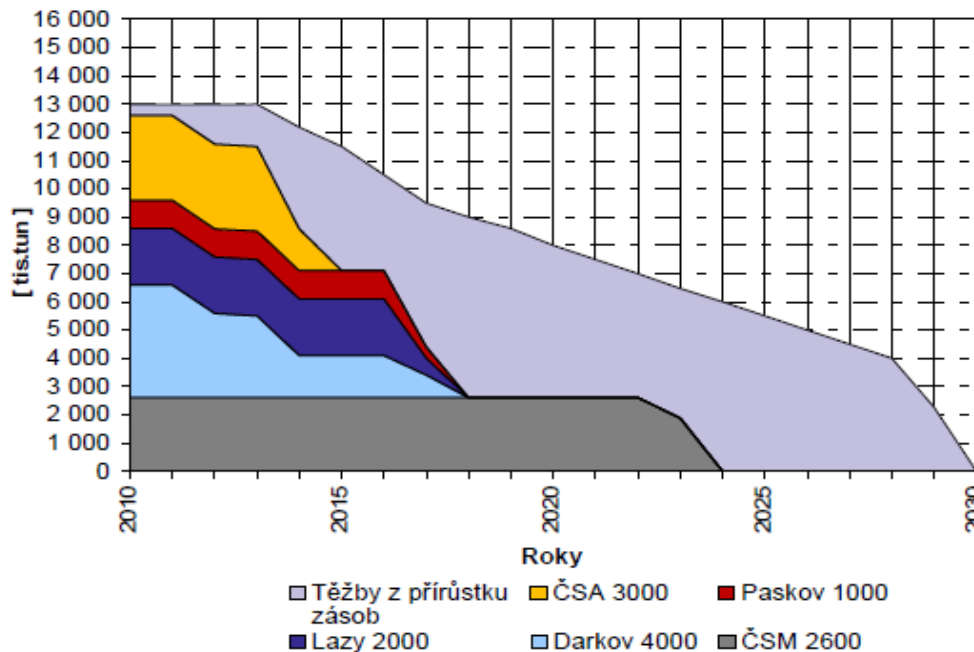
Co se týče zásob uhlí (černého i hnědého), patří Česká republika do patnáctého místa v pořadí zemí disponujících jeho zásobami. Využívání těchto zásob je však přímo spojeno s vývojem poptávky a cen uhlí na trhu a také na dopadu těžby těchto surovin na ekologii a životní prostředí. Hnědého uhlí se vytěží za rok kolem padesáti milionů tun (v roce 2007 to bylo 49,346 mil.tun). Tato hodnota se bude s největší pravděpodobností snižovat [2].

Dle výsledků Státní bilance zásob byly vyhodnoceny vytěžitelné zásoby hnědého uhlí k začátku roku 2007 a 2008, viz Tab. 1. Hodnoty platí v případě dodržení aktuálních územních limitů těžby. Pokud by došlo k prolomení těchto ohraničení, potom by např. jen v dole ČSA bylo k dispozici téměř milion tun kvalitního hnědého uhlí. Prolomení územních limitů je v současné době tedy aktuální téma. Proti jsou však samozřejmě obyvatelé lokací v blízkosti lomů. Předpokládané ukončení těžby hnědého uhlí je stanoveno před rokem 2060.

Tab. 1 Zásoby uhlí v ČR v roce 2007 a 2008 (v tisících tun) [2]

| Pánev              | Společnost             | Důl/lom          | Vytěžitelné zásoby k 1. 1. 2007 | Vytěžitelné zásoby k 1. 1. 2008 |
|--------------------|------------------------|------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Severočeská uhelná | Mostecká uhelná, a.s.  | ČSA              | 49 900                          | 45 000                          |
|                    |                        | Hrabák           | 220 900                         | 210 300                         |
|                    |                        | Centrum          | 400                             | 200                             |
|                    |                        | <b>Celkem MU</b> | <b>271 200</b>                  | <b>255 500</b>                  |
|                    | Severočeské doly a.s.  | Libouš           | 297 800                         | 285 800                         |
|                    |                        | Bílina           | 211 400                         | 202 200                         |
|                    |                        | <b>Celkem SD</b> | <b>509 200</b>                  | <b>488 000</b>                  |
| Sokolovská         | Sokolovská uhelná a.s. | Jiří             | 125 500                         | 117 700                         |
|                    |                        | Družba (+Marie)  | 72 900                          | 69 600                          |
|                    |                        | <b>Celkem SU</b> | <b>198 400</b>                  | <b>187 300</b>                  |
| <b>Celkem ČR</b>   |                        |                  | <b>981 300</b>                  | <b>932 900</b>                  |

Černého uhlí se v ČR ročně vytěží mezi 10 a 15 milionů tun. Zásoby jsou napočítány do roku 2024. Záměr těžebních společností však je ve stávajících dolech zahájit těžbu pod hloubkou 1000 metrů, což by zajistilo dostupnost černého uhlí až do roku 2030. Průběh spotřeby ČU je zobrazen na Obr. 2 s i bez prolomení limitů těžby a zahájením těžby ve větších hloubkách.



Obr. 2 Očekávaný průběh spotřeby zásob černého uhlí v ČR z jednotlivých dolů [2]

Jak již bylo řečeno, dalším domácím zdrojem energie v ČR je přírodní uran. Pojem domácí zde není zcela přesný. I když je uran vytěžen na našem území, je nutné odvézt jej do zpracovatelského závodu. Tam dojde ke zpracování a obohacení uranu a dále k výrobě palivových kazet. V případě EDU je to ruská společnost TVEL. Pro ETE je dodavatelem americká firma Westinghouse, avšak je již dojednán přechod na palivo od ruského výrobce TVEL. Geologické zásoby uranu v ČR dosahují kolem 100 tisíc tun kovu. Vytěžitelné zásoby se mohou pohybovat kolem 50 tisíc tun uranu (pro srovnání: v letech 1945–2004 se vytěžilo cca 110 tun). Největší ložisko je v okolí Hamru na Jezeře. Netěží se zde však, protože ekologické dopady zde aplikované těžby jsou mimořádně nepříznivé, takže sanace a rekultivace území by cenu kovu neúnosně prodražila.

Těžba uranu probíhá v dole Rožná I v Dolní Rožínce, které je majetkem státního podniku DIAMO. Dalším uranovým dolem je Stráž ve Stráži pod Ralskem. V tomto dole se už netěží, ale přírodní uran se zde získává v malých množstvích při provádění sanačních a likvidačních prací po dřívější těžbě. Spolu s pravděpodobným rozvojem jaderné energetiky v ČR se dá očekávat zvýšení těžby uranu na území republiky. Vytipované lokality pro těžbu jsou ložiska Hamr pod Ralskem, Stráž pod Ralskem, Břevniště pod Ralskem, Osečná-Kotel, Brzkov a Jesenice-Pucov. Jsou uváděna rovněž nadějná ložiska Hvězdov, Mečichov, Holičky a další [2].

Dalším zdrojem pro produkci elektrické energie je tedy využití uranu v jaderné energetice. Jaderných elektráren se využívá pro výrobu EE v 15 z 27 států EU. Jejich budoucnost je neustále omílána v mnoha diskuzích. To podporuje nejistotu u investorů, kteří odkládají své rozhodnutí o výstavbě dalších zdrojů, čímž by mohla být česká energetika v budoucnu velice oslabena. V EU bylo více než 50% instalovaných jaderných zdrojů na výrobu elektřiny

postaveno před více jak dvaceti lety. V případě uhelných elektráren je 50 % starších více než 30 let a dalších 20 % starších než 20 let. Většina instalovaného výkonu je tak již za polovinou své životnosti. S postupným dožíváním elektráren se dá očekávat, že bude přibývat jednání o nahrazování těchto zdrojů novými, mezi nimiž se mohou objevit i elektrárny jaderné [1],[2].

### 1.1.2 Alternativní zdroje energie

Alternativní, neboli obnovitelné zdroje energie jsou rozvíjeny jako důležitá součást energetického mixu, protože jako jediné nezatěžují životní prostředí, např. emisemi skleníkových plynů. Představují taktéž jediné v současné době dostupné energetické zdroje, které jsou prakticky nevyčerpatelné [2]. Jako výhodu z hlediska energetické bezpečnosti lze považovat i to, že snižují naši závislost na dovozech paliv a energie, částečnou výhodou může být i decentralizovanost těchto zdrojů.

V poslední době jsou velice diskutovaným a nejvíce rozvíjeným zdrojem energie fotovoltaické (sluneční) elektrárny. Základem fotovoltaických panelů jsou křemíkové destičky, které využívají polovodičového jevu a přímo přeměňují dopadající fotony na elektrickou energii. Energetická účinnost takové přeměny je u dostupných panelů 12 až 15 %. V současné době dochází k přechodu od článků starší koncepce (křemíkové články na bázi destiček) k tenkovrstvým článkům druhé generace (články na bázi tenkých vrstev a filmů např. slitiny  $\text{CuInSe}_2$ ,  $\text{CdTe}$ ). Přechází se i k novým konstrukcím fotovoltaických článků, jejichž výroba je energeticky méně náročná a je výrazně méně limitována dostupností surovin pro výrobu [2]. Na konci roku 2007 bylo v ČR instalováno necelých 5 MW slunečních elektráren. Na konci roku 2009 už dosáhl instalovaný výkon fotovoltaických elektráren 411 MW, což je až o 100 MW více než se očekávalo. Přitom pouze za rok 2009 se výkon slunečních elektráren v tuzemsku rozšířil o víc než 350 MW [3]. Masivní rozvoj solárních elektráren podpořila především povinná vysoká výkupní cena elektřiny (cca 13,50 Kč/kWh) a dotace od státu na výstavbu. Očekává se, že solární boom bude v roce 2010 pokračovat s ještě větší silou než dříve. Odhaduje se, že ke konci roku 2010 celkový instalovaný výkon fotovoltaických elektráren v České republice přesáhne 1000 MW. Letošní rok je však zřejmě posledním, kdy bude díky státní podpoře možné elektřinu ze slunce prodat za mimořádně příznivé ceny. Energetický regulační úřad (ERÚ), který se snaží rozmach solárních elektráren zastavit, sice pro letošek snížil výkupní cenu o pět procent, investice do fotovoltaiky přesto zůstávají extrémně výhodné. ERÚ se snaží od roku 2011 změnit zákon o obnovitelných zdrojích tak, aby mohl snižovat výkupní ceny elektřiny o více než pět procent ročně. Od roku 2011 chce úřad snížit výkupní cenu elektřiny ze slunce o 25 až 30 procent [3].

Dalším alternativním (obnovitelným) zdrojem u nás je biomasa. Ta se využívá několika způsoby. Nejjednodušším a nejrozšířenějším je spalování, dále se využívá zplyňováním, vyhníváním s produkcí bioplynu nebo fermentací, jejíž produktem je alkohol užívaný jako palivo [2]. Kotle na spalování biomasy je nejvíce využívána při kombinované výrobě elektřiny a tepla.

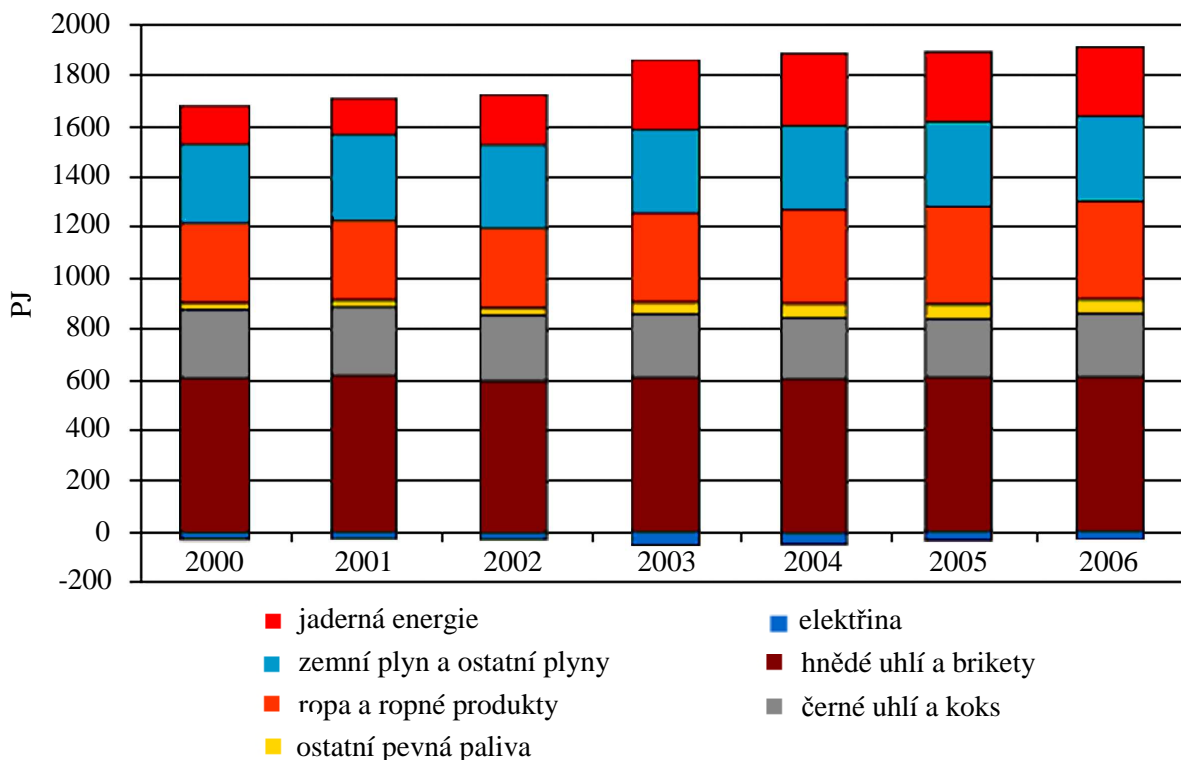
Z obnovitelných zdrojů však dnes mají největší podíl na výrobě elektrické energie vodní elektrárny. Většina vodních toků na území ČR zde pramení a odtékají mimo území, jejich hlavní energetický potenciál je tedy až mimo naše území. I to je jedním z důvodů, proč se řadíme mezi země hydroenergeticky chudé. Většina využitelných vodních toků je už tak dnes využívána. Instalovaný výkon v ČR je asi 2190 MW. Z to je 1015 MW výkonu instalováno v klasických průtokových elektrárnách. V přečerpávacích elektrárnách, zajišťujících špičkové spotřeby energie, je instalováno 1175 MW. Přečerpávací elektrárny jsou v ČR v provozu tři, a to Dlouhé stráně, Dalešice a Štěchovice. V budoucnu se tak počítá s navyšováním výkonu

spíše jen modernizací a růstem hlností u stávajících vodních děl, než budováním nových vodních zařízení.

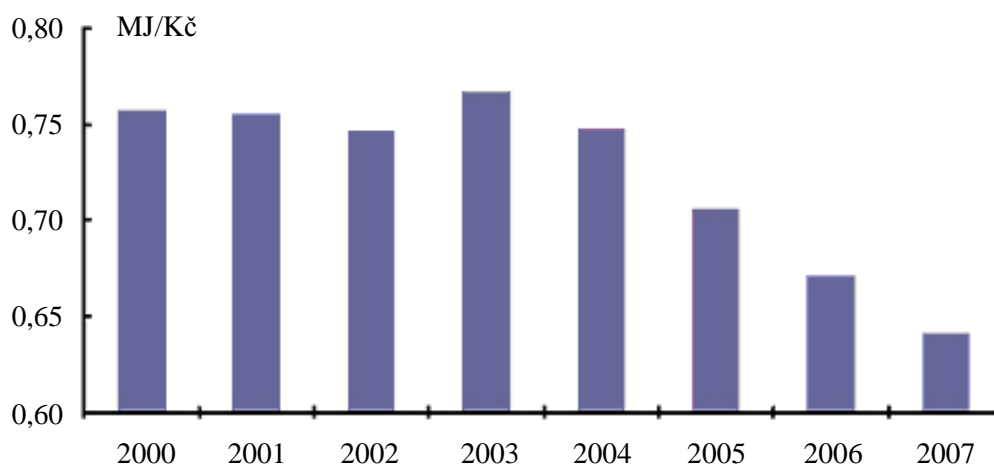
Posledním alternativním zdrojem elektrické energie v ČR jsou větrné elektrárny. Ty zaznamenávají také velký rozvoj, ne však takovým tempem jako elektrárny fotovoltaické. V roce 2003 byl instalovaný výkon větrných elektráren 10,6 MW, v roce 2005 výkon 22 MW a na konci roku 2009 byl 191 MW výkonu. Trendy v budování větrných elektráren zastavují výstavbu jednotek o „menších“ výkonech v řádech 600 kW, prosazuje se budování větrných elektráren o výkonech 2 až 6 MW [2].

### 1.1.3 Spotřeba energií v ČR

Podle údajů Ministerstva průmyslu a obchodu (MPO) je roční spotřeba energie ČR okolo 2000 PJ (např. 1908,4 PJ za rok 2007). Tato spotřeba vykazuje v posledních letech mírný nárůst při současně klesající energetické náročnosti ekonomiky, jak je vidět na Obr. 3 a Obr. 4.



Obr. 3 Roční spotřeby energií v ČR [2]

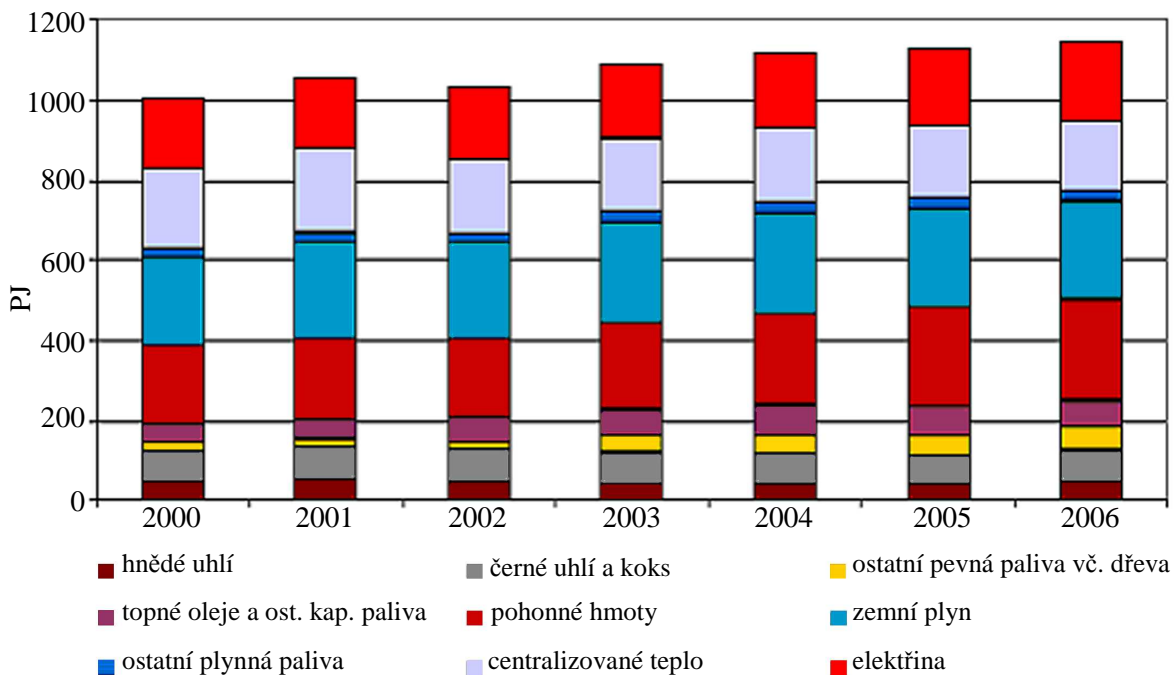


Obr. 4 Průběh energetické náročnosti ekonomiky [2]

Tento fakt je potvrzen i tím, že po roce 2000 rostla ekonomika v průměru ročně o 4,5 %, spotřeba energetických zdrojů rostla ročně jen o 2 %. I přes tento příznivý trend snižování energetické náročnosti HDP, je v ČR náročnost tvorby HDP o třetinu vyšší než průměr v EU. Energetická náročnost tvorby HDP je vyjádřena v potřebné energii na cenovou jednotku, v tomto případě MJ/Kč [2].

K tomuto vyjádření náročnosti tvorby HDP se dá přistupovat dvěma způsoby. Optimistickým přístupem by bylo tvrzení, že je zbytečné obávat se vysoké energetické náročnosti, protože v ČR s očekávaným přiblížením se k parametrům ekonomik EU klesne i energetická náročnost ČR na průměr EU. To potvrzuje i trend v posledních letech. Například při srovnání ČR se zeměmi OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development), je měrná spotřeba primárních energetických zdrojů (PEZ) a energetická náročnost v ČR nižší (tento průměr výrazně zhoršuje měrná náročnost v USA a Kanadě). Druhým, pesimističtější přístupem je nespolehat se na snižující se tendenci energetické náročnosti. ČR má velkou výhodu domácích zdrojů v porovnání s EU. V dalších letech se bude dovozní energetická závislost zvyšovat. Dnes je hodnota dovážených zdrojů energie 42 % s uvážením vývozu (při nezahrnutí vývozu činí dovážené zdroje 60 % spotřeby PEZ v ČR). Tato hodnota se však bude nadále zvyšovat v důsledku omezení vývozu PEZ do zahraničí. Blížící se konec levných domácích zdrojů (hnědé a černé uhlí) přinutil pověřené orgány, tedy vládu prostřednictvím MPO, k nezbytným zásadním rozhodnutím ohledně budoucího směřování české energetiky.

Stejně jako u primárních energetických zdrojů, i u konečné spotřeby energií odběrateli je vidět nárůst spotřeby, viz Obr. 5. V obrázku je rozkreslena i struktura konečné spotřeby energie v ČR. Zdánlivě přiměřená spotřeba elektrické energie (cca 17 % konečné spotřeby) je však ve skutečnosti velmi vysoká. Je třeba brát na zřetel, že čistá elektrická energie je vyráběna s průměrnou energetickou účinností 33 %. Tato nízká efektivnost je především důsledkem stáří vybavení české energetiky. Většina zařízení byla vybudována v 70. letech minulého století [1],[2],[6].



Obr. 5 Formy spotřebované energie [2]

## 1.2 Budoucnost české energetiky

### 1.2.1 Státní energetická koncepce

Státní energetická koncepce (SEK) je dokument schválený vládou České republiky. Je nedílnou součástí hospodářské politiky státu. SEK popisuje zájmy a cíle České republiky v sektoru energetiky, ukazuje i na nástroje realizace energetického hospodaření. SEK vyjadřuje odpovědnost státu za spolehlivé zajištění dlouhodobě bezpečné dodávky energie za přijatelné ceny a za vytváření podmínek pro její efektivní využití, kdy nebude ohrožovat životní prostředí a bude v souladu se zásadami udržitelného rozvoje. Na základě analýz současného stavu české energetiky stanovuje SEK cíle, kterých se má dosáhnout v oblasti energetiky ve výhledu příštích 20 až 40 let [1].

Dlouhodobé vize Státní energetická koncepce o podobě budoucího energetického hospodářství České republiky se dají obecně vyjádřit třemi body: nezávislost, bezpečnost a udržitelnost rozvoje.

Koncepce se snaží vést energetiku k co nejmenší závislosti na cizích zdrojích energie, hlavně na zdrojích pocházejících z politicky nestabilních a rizikových oblastí. Klade také důraz na bezpečný provoz všech zdrojů energie, především jaderné bezpečnosti, dále na spolehlivost a stálost dodávek energie. Snahou SEK je také v rozumné míře decentralizace energetických systémů. Poslední vizí je získávání energií s minimálním dopadem na životní prostředí, ovšem s ohledem na dostupné finanční zdroje.

### 1.2.2 Cíle SEK

Aktuální cíle SEK jsou definovány čtyři, z nichž každý obsahuje několik dílčích cílů. Ty jsou seřazeny podle své důležitosti.

**Prvním cílem** je maximalizace energetické efektivity. Tento cíl směřuje k vyřešení jednoho z největších problémů české ekonomiky, a to vysoké energetické náročnosti tvorby

hrubého domácího produktu (HDP). V porovnání s ostatními zeměmi Evropské Unie (EU) jsme v tomto měřítku spotřeby značně nad průměrem, a to až o třetinu. Vzhledem k prozatímní energetické soběstačnosti však nebylo v minulosti k tomuto problému přihlíženo. Pozitivní je, že tempo snižování této náročnosti máme vzhledem k EU nadprůměrné. Dalším krokem ke splnění prvního cíle SEK jsou preference zdrojů a energetických technologií, které budou s největší účinností využívat primární energetické zdroje (PEZ). Primární energetické zdroje jsou souhrnem tuzemských nebo dovezených energetických zdrojů vyjádřených v energetických jednotkách. Snahou je též využívat kombinovanou výrobu energie a tepla. SEK se snaží dosáhnout energetické efektivity maximální úsporou tepla a EE v budovách sféry podnikatelské, komunální i domácností. Stejně jako úspory tepla, podporuje SEK úspory elektrické energie, například cestou využívání energeticky úsporných spotřebičů [1].

**Druhým cílem SEK** je zajištění efektivní výše a struktury spotřeby PEZ. Tento cíl směřuje k dosažení maximální možné a co možná nejdelší energetické nezávislosti státu na cizích zdrojích energie. Stát se zavazuje k optimálnímu využití všech vytěžitelných zásob hnědého i černého uhlí a dalších paliv vyskytujících se na území ČR. SEK podporuje také využívání všech obnovitelných zdrojů energie (zdrojů využívajících sluneční energii, energii větru, vody a biomasu) za účelem výroby tepelné a elektrické energie.

Důležitým prostředkem k osamostatnění české energetiky je bezpochyby podpora využívání jaderné energie. Cílem SEK je optimalizovat podíl jaderné energetiky v rámci dlouhodobě bezpečného energetického mixu, samozřejmě při respektování všech předpisů pro zajištění jejího bezpečného provozu. Tímto krokem by se významně přispělo i ke snižování ekologického zatěžování území státu, především snížením produkce skleníkových plynů [1].

**Cílem číslo tři** je naplňování vize bezpečnosti a udržitelného rozvoje. Stát se zavazuje k prosazování a používání nejlepších dostupných technologií, které budou mírné k životnímu prostředí. Tímto chce stát zajistit trvalé snižování emisí, produkci neodbouratelných odpadů a znečišťujících látek ve všech skupenstvích, zejména skleníkových plynů, aby dostal mezinárodních závazků ČR. Ty vyplývají hlavně z tzv. Kjótského protokolu. Součástí třetího cíle SEK je i příslib odstraňování látek, které se do prostředí dostaly dřívějším spalování některých látek a při provozu jaderných zařízení při výrobě tepelné a elektrické energie. Tento příslib vznikl na popud Stockholmské Konvekce, která vykládá o persistentních organických polutantech (POPs).

Posledním, **čtvrtým cílem SEK** je dokončení transformace a liberalizace energetického hospodářství. Tímto cílem se SEK snaží splnit vizi bezpečnosti a udržitelného rozvoje, přizpůsobit se na model energetického hospodářství EU. Snahou je vytvoření vysoce konkurenčního prostředí ve výrobě a distribuci všech druhů energie, čímž lze nejlépe udržovat nízkou hladinu cen všech energií. SEK podporuje takové regulační a podnikatelské prostředí, které bude vytvářet podmínky pro operativní a libovolnou volbu dodavatele energie a s tím spojenou nižší závislost na jednom dodavateli [1].

Jak již bylo řečeno, budoucnost energetického hospodářství v ČR je popsána v prioritách a cílech SEK. Energetické hospodářství bude směřovat k vysokému zhodnocení energetických zdrojů a zvýšení efektivity technologií. To se zhodnotí nejlépe na energetické náročnosti tvorby HDP. Do roku 2030 se očekává snížení až na 0,45 MJ/Kč. Dále se očekává snížení zatěžování životního prostředí. Česká republika dodržuje závazky ze všech mezinárodních smluv týkajících se vlivu energetického hospodářství na životní prostředí. Prognóza popisuje i změnu struktury spotřeby PEZ. Očekává se, že těžba a spotřeba hnědého uhlí klesne do roku 2030, až o 40 %. Stát se snaží o co nejdelší prodloužení využívání hnědého uhlí, především

rozumně přehodnocenými aktuálními limity těžeb. Takto vzniklé zdroje uhlí budou využity při obnově dožívajících elektráren a hnědé uhlí bude dále nejvýznamnějším primárním energetickým zdrojem, který bude užít pro výrobu elektřiny v moderních a čistých uhelných technologiích. K velkému zvýšení využití ve struktuře PEZ dojde u zemního plynu, kde se očekává nárůst spotřeby o 20 % do roku 2030. U jaderného paliva se predikuje spotřeba dvaapůlkrát vyšší, než byla v roce 2000. U obnovitelných zdrojů se v budoucnu odhaduje postupné navyšování využití. SEK v roce 2004 stanovila, že do roku 2010 bude 8 % produkované elektřiny v ČR vyráběno z OZE, do roku 2020 stanovila hodnotu na 13 %. Je však jasné že tyto hodnoty nejsou splnitelné. Skutečné hodnoty využití OZE, i přes jejich velký rozmach, jsou dnes 6 až 7 %. V rámci celé EU jsou cíle stanoveny na 20 % využití OZE na výrobu elektrické energie. Masivní využití obnovitelných zdrojů však sebou nese zvýšení cen energií, kvůli vyšším výkupním cenám z těchto zdrojů oproti zdrojům klasickým (fosilním a jaderným). Porovnání nákladů na výrobu elektřiny v obnovitelných a klasických zdrojích elektrické energie bude uvedeno dále.

Spotřeba čisté elektrické energie v podobě elektřiny poroste, počítá se s meziročním růstem spotřeby asi 1,3 %. Česká elektrizační soustava má nyní exportní charakter, což se podle odhadu po roce 2015 změní a stane se závislou na dovozech ze zahraničí. Dovozy elektřiny by měly pokrýt nedostatek instalovaného výkonu v době plánovaných obnov elektráren, které proběhnou do roku 2020. V období mezi roky 2020 a 2025 se očekává spuštění na prvních nových jaderných blocích. Do roku 2030 by se měla zahájit výstavba celkově čtyř až pěti nových jaderných bloků. Očekává se, že jaderná energetika bude po roce 2025 největším zdrojem pro výrobu elektřiny.

Dovoz energetických zdrojů bude stále výrazněji převyšovat vývozy. V dovozech PZE bude k roku 2030 dominovat jaderné palivo (35 %) následované zemním plynem (34 %), kapalnými palivy (14,5 %) a černým uhlím a koksem (9 % celkového dovozu energetických zdrojů) [1],[2].

### 1.2.3 Energetické scénáře

Energetické scénáře byly vytvořeny pomocí modelu EFOM/ENV (Energy Flow Optimization Model / ENViromentaly) [2]. Tento model reaguje na ekonomiku, energetiku a životní prostředí. Je uznávaný Evropskou unií jako model pro vytváření studií o rozvoji energetických hospodářství. Soubor energetických scénářů byl základem pro přípravu Státní energetické koncepce. Scénáře obsahují energetické, ekologické a sociální parametry možných směrů vývoje energetického hospodářství do roku 2030, v závislosti na variantách tempa růstu HDP a opatřeních státu k ovlivnění vývoje energetického hospodářství. Cílem všech scénářů je vytvořit optimální stav mezi poptávkou a nabídkou na trhu s energií, při vynaložení minimálních nákladů a při respektování ekologických, politických a sociálních omezení.

Při tvoření energetických scénářů byly brány v úvahu klíčové momenty:

- prodloužení či neprodloužení životnosti JE Dukovany (EDU),
- možnost výstavby nových jaderných elektráren,
- racionální přehodnocení územních ekologických limitů těžby hnědého uhlí,
- ceny a dostupnost paliv na světovém trhu,
- zpřísnění národních limitů na emise skleníkových plynů.

Kombinací uvedených možností byly vytvořeny následující varianty:

- setrvačnost (žádné zásadní změny),



- neprodloužení životnosti JE Dukovany,
- racionální přehodnocení územních ekologických limitů těžby HU,
- racionální přehodnocení územních ekologických limitů těžby HU + neprodloužení životnosti EDU,
- nejaderná varianta (zastavení JE Temelín a neprodloužení životnosti EDU),
- jaderná varianta (prodloužení životnosti EDU + možná výstavba nových jaderných zdrojů),
- varianta s omezenými zdroji (vysoké ceny paliv na světovém trhu + možné prodloužení životnosti EDU + možná výstavba nových jaderných zdrojů + možné prolomení limitů těžby),
- varianta se zpřísněným emisním stropem CO<sub>2</sub> (redukce o 35 % v roce 2030 proti roku 2000 + možné prodloužení životnosti EDU + možná výstavba nových jaderných zdrojů).

Z vyjmenovaných variant scénářů vznikla následující představa o budoucnosti českého energetického hospodářství. Jaderná energetika bude dále podporována, nedojde k žádnému omezení v provozu stávajících dvou JE. V EDU již probíhá postupná modernizace s cílem navyšování výkonu a prodloužení životnosti jejích čtyř bloků. Přípravné práce probíhají už i na dostavbě dvou jaderných bloků v lokalitě ETE, v plánu je i dostavba jednoho bloku v EDU a společného bloku se Slovenskou republikou v Mochovcích. V oblasti uhelné energetiky probíhají diskuze o prolomení územních těžebních limit v západních Čechách, připravuje se modernizace elektrárny Pruněřov II. Při rekonstrukci elektrárny Pruněřov II pravděpodobně dojde i ke zvýšení výkonu u tří z pěti bloků z 210 na 250 MW a snížení znečišťování ovzduší a okolí elektrárny. V energetickém mixu ČR se počítá i s OZE, avšak v rámci jejich udržitelného rozvoje s ohledem na jejich regulovatelnost a dostupnost [1],[2],[6].

## 2 VLIVY JE NA JEJÍ OKOLÍ

V rámci udržitelného rozvoje společnosti a minimalizace dopadů rozvoje na životní prostředí, probíhá před realizací každého záměru proces posuzování vlivu na životní prostředí, tzv. EIA proces (Environmental Impact Assessment). Toto posouzení a následná zpráva je podkladem pro udělení povolení pro realizaci daného záměru. Bez výsledku z posouzení EIA nesmí žádný povoluující úřad (např. stavební úřad) dát svolení k provedení záměru.

V rámci procesu EIA jsou podle zákona č. 100/2001 sb. posuzovány veškeré stavby, zaváděné technologie, jakákoliv těžba a lidské činnosti. Týká se tedy i povolení stavby a provozu JE. V případě výstavby nového jaderného zdroje v ETE je posuzováno také zdůvodnění výstavby takového zdroje, konkrétní technické řešení, a možné společné působení se stávajícími zařízeními na životní prostředí [15]. Schvalovací dokumenty jsou zpracovávány agenturou CENIA, která je zřízená jako organizace pod kontrolou Ministerstva životního prostředí (MŽP).

### 2.1 Vlivy JE na okolí

#### 2.1.1 Znečištění ovzduší

Při provozu jaderné elektrárny se neuvažuje o znečišťování ovzduší ve stejném smyslu jako u elektráren fosilních. Jaderná elektrárna v provozním režimu tedy není producentem znečištění, jako jsou prachové částice, skleníkový plyn  $\text{CO}_2$ , látky typu  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  nebo  $\text{CO}$ . S produkcí těchto látek se v souvislosti s JE uvažuje pouze při její výstavbě a to z automobilové dopravy, nebo při provádění souvisejících zemních prací. Množství vytvořených emisí však nepřevyšuje množství emisí produkovaných při stavbách jiných průmyslových zařízení podobných rozměrů. Při provozu se pak o JE uvažuje jako o producentovi výše jmenovaných látek pouze při zkušebním provozu záložních dieselaagregátových stanic. Ty však nejsou trvalým zdrojem znečištění, jejich provoz lze u jednotlivých stanic určovat nejvýše v desítkách hodin ročně. Dalším možným zdrojem znečištění by mohly být chemikálie používané pro chemickou úpravnu chladicí vody ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{KOH}$ , čpavek a jiné). Ty se však v chladicí vodě objevují v tak nízkých koncentracích, že jejich potenciální dopad na životní prostředí je zanedbatelný.

#### 2.1.2 Vliv JE na mikroklima

Pojem mikroklima označuje podnebí pro velmi malé území. Vliv JE na klimatické podmínky v jejím okolí je především prostřednictvím chladících věží a jejich výstupem, tedy vodní párou. Vystupující pára je také označována jako parní vlečka. Tato vlečka může na mikroklima působit hned několika způsoby.

Ze vzniklých vleček mohou vypadávat kapky vody s obsahem rozpuštěných solí, nebo suspendovaných pevných částic, vlečka může také stínit svou viditelnou částí. Vystupující pára způsobuje také zvýšení vlhkosti v přízemních hladinách. To může způsobit námrazu a mlhu, nebo zapříčinit vznik oblaků, z nichž mohou vypadávat srážky. Všechny změny klimatu však mají charakter pouze lokální. K ovlivnění dochází tedy nejvíce přímo nad územím JE a v nejbližším okolí, s rostoucí vzdáleností všechny tyto vlivy mizí [14]. Při hledání vhodných lokalit pro výstavbu JE je jedním z kritérií umístění v nezastavěné oblasti. Vyjmenované vlivy na mikroklima se tak obydlených aglomerací nedotknou.

### 2.1.3 Ionizující záření

K provozu zařízení s jaderným reaktorem neodmyslitelně patří vznik ionizujícího záření. Zdroj záření, tedy palivo v jaderném reaktoru, je umístěn za řadou bariér, které zajišťují, že ionizující záření má vliv pouze v nejbližších prostorách reaktoru uvnitř kontejnmentu. Díky tomuto systému bariér by se záření během provozu nemělo dostat do okolního prostředí. Nejnebezpečnějším materiálem produkujícím ionizující záření je vyhořelé jaderné palivo (VJP). Nakládání s VJP je popsáno v kapitole 3. Je bezpečně uskladněno způsobem (mezisklad VJP), u kterého se nevyklučuje možnost opakovaného využití štěpitelných materiálů z VJP, nelze jej proto prozatím označovat jako odpad. Dalším zdrojem ionizujícího záření z JE jsou plynné a kapalné výpusti z primárního okruhu a kontrolovaného pásma. Ty budou probrány dále.

### 2.1.4 Odpadní vody neaktivní

Co se týče odpadních vod, je JE v základu stejným producentem jako jiné průmyslové zástavby. Jsou to dešťové, splaškové, nebo průmyslové odpadní vody vzniklé z provozu a údržby zařízení. Tyto odpadní vody bývají běžně svedeny do stanice čistírny odpadních vod a posléze vypuštěny do příslušejících vodních toků (např. pro ETE je to vodní dílo Kořensko).

Dalšími odpadními vodami je odluh z okruhu cirkulační chladicí vody spolu s odpadními vodami z chemické úpravy vody (CHÚV), tzv. technologické odpadní vody. Ty jsou po vyčištění v čistírně odpadních vod a radiochemické kontrole v záchytné jímce spolu se všemi ostatními odpadními vodami vypuštěny dále do příslušného vodního toku. Například pro NJZ v Temelíně jsou očekávané objemy odpadních technologických vod uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2 Očekávané množství odpadních vod z NJZ v Temelíně [14]

|                                   | Blok 2×1000 MW<br>[t/rok] | Blok 2×1200 MW<br>[t/rok] | Blok 2×1600 MW<br>[t/rok] |
|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| <b>Odluhy a odpady z<br/>CHÚV</b> | 7 000 000                 | 8 400 000                 | 11 200 000                |

Pro porovnání je v Tab. 3 uvedena očekávaná spotřeba surové vody pro NJZ v Temelíně v různých výkonových alternativách. Pro doplňování primárního a sekundárního okruhu se počítá se surovou vodou z vodního díla Hněvkovice upravovanou na demivodu, stejně jako u provozovaných bloků v ETE. Pro zásobování chladicího okruhu vodou se v případě ETE odebíraná voda díky její dostačující kvalitě nijak neupravuje [14].

Spotřeba surové vody v ETE je dnes 1,6 až 2 m<sup>3</sup> za sekundu. Očekává se, že po dostavbě nových dvou jaderných bloků vzroste spotřeba na 5 až 5,4 m<sup>3</sup> za sekundu. I přes tento nárůst spotřeby se s vodním dílem Hněvkovice počítá jako s dostatečným zdrojem surové vody.

Tab. 3 Očekávaná spotřeba surové vody pro NJZ v Temelíně [14]

|                                  | <b>Blok 2×1000 MW</b><br>[t/rok] | <b>Blok 2×1200 MW</b><br>[t/rok] | <b>Blok 2×1600 MW</b><br>[t/rok] |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| <b>Demivoda</b>                  | 320 000                          | 385 000                          | 518 000                          |
| <b>Voda do chladících okruhů</b> | 40 000 000                       | 47 999 000                       | 63 994 000                       |
| <b>Celková spotřeba</b>          | 40 320 000                       | 48 384 000                       | 64 512 000                       |

Vypouštění odpadních vod má za následek i tepelné zatížení příslušného vodního díla určeného pro chlazení jaderného zatížení. V případě dvou bloků ETE je maximální teplota výpustí 32,5 °C. Teplotní rozdíl vody v řece Vltavě mezi místem odběru chladicí vody a výpustí odpadních vod z elektrárny je malý, a to 0,6 až 1,3 °C. Tento rozdíl dále mísením vody klesá až na zanedbatelné hodnoty [14].

### 2.1.5 Plynné a kapalně výpusti obsahující radionuklidy

Vedle VJP jsou pro životní prostředí nebezpečné plynné a kapalně výpusti z primárního okruhu a kontrolovaného pásma. Radioaktivitu plynných výpustí způsobují radioizotopy Kr, Xe, tritium H<sub>3</sub>, nebo Ar41. Aktivitu kapalných výpustí způsobuje z 99 % tritium, dále Co, Cs, Sr, Cr a další. Omezení pro vypouštění těchto radionuklidů jsou stanovené v každém státě příslušnými vyhláškami dozorného orgánu, v ČR tedy SÚJB. Z nich se vyvozují přesné limity a podmínky pro provozovatele jednotlivých bloků JE.

Plynné a kapalně látky obsahující radionuklidy pronikají do životního prostředí asi třemi různými způsoby.

Prvním únikem, se kterým se při provozu jaderného bloku počítá, je obměna chladicí vody z primárního okruhu. Důvodem je vznik a hromadění radioaktivního tritia H<sub>3</sub> a dalších radionuklidů. Tritium nejde z chladicí vody kvůli velké chemické a fyzikální podobnosti k lehké vodě odstranit. Kumulace těchto radionuklidů by představovala i vyšší zatížení obsluhujícího personálu při výměnách paliva, kdy dochází k otevření primárního okruhu. Druhou možností úniku jsou plynné výpusti z odvětrávání kontejnmentu a z odplyňování vody z primárního okruhu, odcházející ventilačním komínem přes filtrační zařízení do životního prostředí. V kontejnmentu se radionuklidy objeví i při výměně paliva, kdy dojde k otevření primárního okruhu a samovolnému odparu chladiva z hladiny do prostor kontejnmentu [16].

Poslední cestou úniku plynných a kapalných látek obsahující radionuklidy jsou netěsnosti ucpávek cirkulačních čerpadel primárního okruhu. Ty jsou zachytávány a odváděny spolu s odluhy a vodou z primárního okruhu k blokové čistící stanici odpadních vod [14].

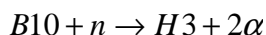
Zde je voda separačními metodami zbavena radioaktivních látek a odvedena do záchytných jímek, kde je kontrolován obsah radionuklidů. Při splnění daných limitů je voda dále ředěna a vypuštěna. Vypouštění vod z jímek probíhá diskontinuálně, obsah radionuklidů ve vodách vypouštěných z JE tak nemá konstantní úroveň.

Všechny úniky látek tedy procházejí separačními zařízeními pro snížení obsahu radionuklidů. Účinnost těchto zařízení bývá až 99 % [16]. Zbývající procento ke stoprocentní účinnosti způsobuje zatěžování životního prostředí ionizujícím zářením. Princip zpracování kapalných odpadů je popsán v Kapitole 3. Produktem těchto separačních metod jsou odpady, které jsou ukládány v úložiscích.

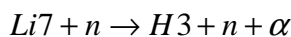
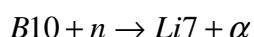
### 2.1.5.1 Vznik tritia v JE, možnosti snížení vzniku tritia

Dominantním radionuklidem ve výpustích elektráren je, jak již bylo řečeno, tritium. Jedná se o čistý beta zářič s poločasem rozpadu 12,28 roků. Způsobů, jak může vzniknout tritium v jaderném reaktoru, je několik.

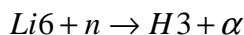
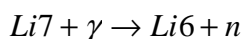
Prvním z nich je reakce neutronů s izotopem B10, obsaženém v bóru, který je v podobě kyseliny borité  $H_3BO_3$  rozpuštěn v chladivu primárního okruhu. Kyselina boritá je v lehkovodních reaktorech použita jako absorbátor neutronů pro udržení žádané reaktivity soustavy. Bór je přítomen i v řídicích tyčích reaktoru. Princip vzniku tritia z bóru je popsán rovnicí:



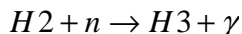
Z bóru může tritium vznikat i jiným postupem, podle rovnic:



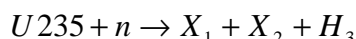
Další možností vzniku tritia je reakce neutronu s izotopem Li6, který je v chladivu přítomen jako nečistota z chemikálií používaných pro úpravu vody. Li6 může vzniknout také působením gama záření na izotop Li7 v aktivní zóně reaktoru, podle rovnic



Třetím způsobem vzniku tritia je působení neutronového toku na vodík ve formě deuteria, tedy vodíku obsaženém ve vodě podle rovnice



Čtvrtým způsobem vzniku tritia v jaderném reaktoru je při štěpení paliva, kdy při štěpení uranu, nebo plutonia vznikají dva štěpné produkty  $X_1$ ,  $X_2$ , lehký produkt, a často právě tritium. Tritium pak mikroskopickými defekty v materiálu pokrytí paliva proniká do chladiva [16].



Způsoby, jakými by mohly být omezeny úniky radionuklidů do okolí, vyplývají už ze způsobů jejich vzniku. Řešením by tak bylo nahrazení materiálů regulačních tyčí s obsahem bóru za jiné (nahrazení bórové oceli BC4 slitinou AgInCd, nebo slitinami obsahující Ha, nebo Ga [16]. Zlepšení by přineslo i použití lepších materiálů a technologií pro výrobu pokrytí, které by omezily průnik tritia z paliva do chladiva. Dalším způsobem je omezení dávkování, nebo nahrazení chemikálií přidávaných do primárního okruhu ( $H_3BO_3$ , LiOH) jinými, které se pod vlivem neutronů nemění na radionuklidy. Řešením, které by neomezovalo vznik radionuklidů, ale pouze jejich únik do okolí, by bylo vyvinutí účinnějších separačních metod pro odstranění radionuklidů z vod a plynů, nebo celkové omezení vypouštění vod a plynů.

### 2.1.6 Elektromagnetické záření

Každé elektrické zařízení při svém provozu produkuje elektromagnetické záření. Problematikou vlivu elektromagnetických polí se v ČR zabývají dva dokumenty, a to Technická norma ČSN 33 2040 „Ochrana před účinky elektromagnetického pole 50 Hz v pásmu vlivu zařízení elektrizační soustavy“ a nařízení vlády č.480/2000 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením [14]. S ohledem na tyto dokumenty jsou potenciálními

zdroji všechny komponenty elektrárny přímo zapojené do výroby elektrické energie. Patří sem tedy generátory včetně budičů, vývody vysokého napětí zapouzdrženými vodiči z generátorů do blokového transformátoru, blokový transformátor, vyvedení výkonu z blokového transformátoru do přenosové soustavy vysokého napětí, i komunikační spoj mezi elektrárnou a centrálním dispečinkem. Všechna zařízení jsou konstruována a provozována tak, že splňují všechna ustanovení uvedených dokumentů. Trasa vyvedení výkonu mimo areál JE je vždy volena s ohledem na stávající aglomerace tak, aby se v rámci možností minula oblastem s dočasným, nebo trvalým pobytem osob.

### 2.1.7 Hluk

Součástí každé schvalovací dokumentace EIA je i hluková studie. Hladina hlukového zatížení se v lokalitě JE zvyšuje už se samotnou výstavbou JE. Původci hluku jsou stavební zařízení a dopravní prostředky. I za provozu je v okolí JE zvýšená hladina zvuku oproti přirozenému pozadí. Toto zvýšení je však minimální, nijak negativně nepůsobí na životní prostředí. V rámci provozu JE jsou dominantními zdroji hluku turbíny, kompresory, motory čerpadel atd. Tyto zdroje bývají umístěny uvnitř stavebních konstrukcí, při správném řešení jejich zvukové izolace nebývají v okolí elektrárny vyjmenovaná zařízení slyšet. Zdroje zvuku, které se však projevují do okolí elektrárny jsou proudění páry v chladicích věžích, sání a výstupy vzduchotechniky a odfuky páry z pojistných ventilů atd.

### 2.1.8 Vliv JE na půdu

Pro provoz JE je nutné skladování chemikálií pro technologie CHÚV, olejů pro olejové hospodářství a dalších nebezpečných látek. V případě jejich úniku představují potenciální nebezpečí nejen z hlediska kontaminace půdy. Pod všemi zařízeními, která s těmito látkami pracují, bývají pro zajištění bezpečnosti vybudovány záchytné vany. Jejich objemová kapacita je vždy dimenzována na celý objem náplně, který by mohl uniknout [14].

Z hlediska možné kontaminace půdy se u JE uvažuje s nebezpečím i v rámci výstavby. Uvažuje se znečištění ropnými látkami z mechanismů použitých při výstavbě. Proto se po celou dobu výstavby klade důraz na odpovídající stav používané techniky. V případě vzniku havarijní situace jsou v havarijním plánu zařazeny bezprostředně po vzniku nehody sanační práce, které mají minimalizovat znečištění půdy. Při vzniku takovéto situace se počítá s odvezením kontaminované zeminy k další odborné likvidaci.

### 2.1.9 Vliv na krajinu

Při uvažování vlivů JE na krajinný vzhled jsou dominantním prvkem chladicí věže. Pro zajištění přirozené ventilace dosahují tyto věže výšek více než sto metrů, běžně až 150 metrů. Výška věže závisí na výkonu chlazeného jaderného bloku, dále také na počtu věží v projektu pro uchlazení jednoho bloku.

Například v ETE je výška komínů 154,8 metrů, jejich viditelnost je podle výpočtů z území o plochy 3658 km<sup>2</sup>, což představuje území o poloměru více než 35 kilometrů [14]. Dalšími objekty ovlivňující krajinný ráz jsou budovy jaderných bloků, dosahující výšek 50–80 metrů. Zásahem do krajiny jsou i stožáry pro vyvedení elektrického výkonu a příslušné rozvodné stanice.

### 2.1.10 Dopady na zdraví obyvatel, sociální a ekonomické vlivy

Co se týče dopadu provozu JE na zdraví obyvatel, nejvíce sledovaným vlivem je ionizující záření. Přímé zjišťování dopadu radionuklidů z JE na lidský organismus není možné, protože případné ozáření osob je pod úrovní citlivosti používaných měřících metod. Dalším možným

vlivem je ovlivnění psychického stavu obyvatel [14]. V oblastech přilehlých jaderným elektrárnám bývá prováděno monitorování zdravotního stavu obyvatelstva. V těchto průzkumech se však žádné vlivy jaderné elektrárny na zdraví lidí neprokazuje. Výsledky tak dobře slouží k vyvracení některých obav vyskytujících se v obyvatelstvu a klamných dojmů o zvýšení výskytu závažných onemocnění nebo jiných projevů narušení zdraví ve vybraných lokalitách.

Provozování i výstavba jaderné elektrárny přináší kromě produkce elektrické energie i jiné výhody. Obě dvě etapy poskytují pracovní pozice všech úrovní, čímž je v daném regionu zvednuta úroveň sociální i ekonomická.

### **2.1.11 Další vlivy JE na okolí**

Při výběru vhodné lokality pro nový jaderný zdroj, ale i při jeho následném provozu se sledují i další vlivy na okolí. Řadí se mezi ně vliv na horninové prostředí, vliv na faunu, flóru a ekosystémy. Dalšími kritérii jsou přítomnost chráněných území, národních parků, nebo dopad na hmotný majetek a kulturní památky [14],[15].

### 3 NAKLÁDÁNÍ S RADIOAKTIVNÍMI ODPADY A VYHOŘELÝM JADERNÝM PALIVEM V ČR A VE SVĚTĚ

Všechny země, včetně těch, které nevyužívají jaderné technologie v energetice, jsou producenty odpadů produkujících ionizující záření. Producentem těchto odpadů může být zdravotnictví, různé odvětví průmyslu, archeologie, speciální sanační práce atd. Odpady produkující ionizační záření, které nevznikly při provozu energetických zařízení, se souhrnně nazývají institucionální odpady. Ve srovnání s jinými nebezpečnými odpady je v ČR podíl radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva poměrně malý, tvoří setiny procent všech vzniklých nebezpečných odpadů.

Podle zákona o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření, tzv. atomového zákona, musí být nad všemi výše jmenovanými odpady udržována kontrola. Za tímto účelem byla v ČR na základě atomového zákona založena státní organizace Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO). Úkolem SÚRAO je tedy zajišťovat bezpečné ukládání radioaktivních odpadů dosud vyprodukovaných i budoucích v souladu s požadavky na jadernou bezpečnost a ochranu člověka i životního prostředí [4].

Činnosti SÚRAO jsou kontrolovány státními odbornými dozory, v čele se Státním úřadem pro jadernou bezpečnost (SÚJB). Vedení SÚRAO má na starosti tzv. Rada SÚRAO, jejímiž členy jsou zástupci ministerstva průmyslu a obchodu, ministerstva financí, životního prostředí, dále zástupci hlavních producentů radioaktivních odpadů, regionů měst a obcí s provozovanými úložišti a zástupci širší veřejnosti. Činnosti SÚRAO jsou financovány z jaderného účtu. Tento účet je finanční zásobou, kterou vytváří z většinové části společnost ČEZ společně s ostatními původci radioaktivních odpadů. Účet je řízen Českou národní bankou a kontrolován ministerstvem financí. Například společnost ČEZ přispívá za každou vyrobenou MWh v jaderné elektrárně na tento účet 50Kč. Pro dva bloky ETE je tedy odvedená částka přibližně určena následujícím výpočtem:

$$50 \frac{\text{Kč}}{\text{kWh}} \cdot 1000 \text{ MW} \cdot 2 \text{ bloky} \cdot 24 \text{ hodin} \cdot 365 \text{ dní} \cdot 0,8 \approx 700 \cdot 10^6 \text{ Kč}$$

Poslední součinitel ve výpočtu vyjadřuje tzv. faktor způsobilosti bloku. Ten určuje, jakou část celého roku je zařízení v pohotovosti a provozu.

V Tab. 4 jsou uvedeny již vložené a očekávané vklady na jaderný účet.

Tab. 4 Struktura vkladů jaderného účtu [4]

|                            | 2009 [tis.Kč] | odhad na rok 2010 [tis.Kč] | odhad na rok 2011 [tis.Kč] |
|----------------------------|---------------|----------------------------|----------------------------|
| <b>Odvody ČEZ</b>          | 1 355 000     | 1 355 000                  | 1 355 000                  |
| <b>Odvody ostatní</b>      | 5 000         | 5 000                      | 5 000                      |
| <b>Výnos z investování</b> | 325 000       | 345 000                    | 365 000                    |
| <b>Celkem</b>              | 1 685 000     | 1 705 000                  | 1 725 000                  |

Veškerý radiačně aktivní odpad se dělí podle intenzity produkujícího ionizujícího záření na nízko (NAO), středně (SAO) a vysoceaktivní (VAO). Jejich třídění podle měrné



radioaktivity je uvedeno v Tab. 5. Skladování nebo konečné ukládání jednotlivých odpadů se provádí odlišnými, již zaběhnutými a z pohledu jaderné bezpečnosti ověřenými způsoby.

Tab. 5 Kategorie radioaktivních odpadů podle měrné úrovně aktivity [17]

| Kategorie odpadů | Úroveň radioaktivity [ $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ] |
|------------------|--|
| NAO              | $3,7\cdot 10^4$ – $3,7\cdot 10^8$                      |
| SAO              | $3,7\cdot 10^8$ – $3,7\cdot 10^{13}$                   |
| VAO              | $>3,7\cdot 10^{13}$                                    |

### 3.1 Ukládání nízko a středněaktivních odpadů

Nízkoaktivní odpady a středněaktivní odpady tvoří objemově nejrozsáhlejší třídu. Vznikají v kapalně či pevné formě při provozu, ale i vyřazování jaderných zařízení a při provozování zdrojů ionizujícího záření. Tyto RAO mají relativně nízkou hladinu aktivity, nemusí se tak skladovat v hlubinných úložištích, lze je ukládat do přípovrchových úložišť. Technologie jejich zpracování a úpravy před uložením jsou dostatečně propracované a jsou v ČR zavedeny [4]. Česká republika má několik úložišť těchto odpadů, a to v areálu jaderné elektrárny Dukovany, úložiště Richard v Litoměřicích nebo Bratrství v Jáchymově.

#### 3.1.1 Úložiště Richard a Bratrství

V úložišti Richard i Bratrství se ukládají jen institucionální radioaktivní odpady s nízkou aktivitou a s poločasem rozpadu kolem 30ti let. Úložiště Richard je umístěno nedaleko Litoměřic, kde se již od poloviny 19.století těžil vápenec. Za druhé světové války tu Němci začali budovat podzemní továrnu s názvem Richard. Od roku 1960 se prostory upravovaly a začaly používat jako úložiště radioaktivních odpadů. Prostory úložiště jsou v hloubce asi 70 metrů pod povrchem. Celkový objem úložiště je asi  $170\,000\text{ m}^3$ , z čehož je  $8400\text{ m}^3$  samotných úložných prostor. Zbytek představují obslužné chodby. Odpady se převážejí v pozinkovaných sudech, zvenku natřených antikoročním asfaltovým nátěrem. Každý sud se váží a jsou měřeny jeho radiologické parametry. O každém skladovaném sudu se vede dokumentace tak, aby se dala zpětně zjistit historie a obsah sudu. V úložišti se odpady lisují do stolitrových sudů, které jsou po uzavření vloženy do větších, dvěstelitrových sudů. Volný prostor mezi sudy je vyplněn betonem, který tak vytváří stínící vrstvu. Takovýchto sudů se v úložišti ukládá přibližně 200 za rok. V současné době je zde uloženo více než dvacet tisíc sudů [4].

V celém úložišti probíhá monitorování pracovního prostředí, např. na přítomnost radonu. Kontroluje se také stabilita samotného důlního díla. Ochranu proti úniku radioaktivity do životního prostředí zajišťují dvě bariéry. Tou první je vrstva betonu v samotných sudech s odpadem. Druhou bariérou proti úniku nebezpečných látek jsou geologické podmínky úložiště. Jsou to vrstvy jílovitých slínovců, které jsou nad i pod prostorem úložiště. Spolehlivost izolace prostor je dokládáno i monitorováním vod v okolním prostředí.

Naše druhé úložiště radioaktivních odpadů je v Jáchymově. Jmenuje se Bratrství podle bývalého uranového dolu, který tu vznikl v minulém století. Jako úložiště tyto prostory fungují od roku 1974. Úložiště je tvořeno hlavní chodbou o délce 330 m a pěticí skladovacích komor. I v úložišti Bratrství se pravidelně sleduje stav prostor jeho okolí, vše s ohledem na důlní i jadernou bezpečnost.

Nejstarším, a dnes už nepoužívaným úložištěm NAO je úložiště Hostim, nedaleko Berouna. Prostor o objemu 1600 m<sup>3</sup> se takto začal využívat v padesátých letech. Ukládání bylo ukončeno v polovině šedesátých let. Pro zabezpečení proti vstupu nepovolaných osob bylo úložiště zajištěno zabetonováním. I zde SÚRAO z bezpečnostních důvodů neustále měří radioaktivitu. Měření dokazuje, že zde žádná radioaktivita do okolí neproniká [4].

### 3.1.2 Úložiště Dukovany

Úložiště v areálu EDU slouží pro ukládání NAO a SAO vzniklých při provozu obou našich jaderných elektráren. Od roku 2005 je v tomto úložišti možno ukládat i omezené množství institucionálních odpadů zpracovaných v ÚJV Řež. Jaderná elektrárna není zdrojem jen vysoceaktivních odpadů, tedy vyhořelého jaderného paliva, ale i nízkoaktivních v podobě pevných odpadů a odpadních vod. Kontaminované odpadní vody se zabezpečují tak, že se nejdříve odpaří voda v tzv. odparkách. Zahuštěný zbytek odpadní vody se pak smísí s bitumenovou směsí (tzv. bitumenace). Kontaminovaná směs se potom slévá pro uskladnění do dvěstělitrových sudů. Pevné nízkoaktivní odpady z JE představují pracovní oděvy, ochranné pomůcky, ale i papír či plasty které mohly přijít do prostředí s ionizujícím zářením. Úložiště Dukovany je v provozu od roku 1995, a je tak nejnovějším, největším a nejmodernějším zařízením pro ukládání NAO v ČR. I když leží v areálu elektrárny vlastněném společností ČEZ, dohled nad jeho provozem má SÚRAO.

Celkový prostor 55 tisíc m<sup>3</sup> je rozdělen do 112 jímek. Do každé z nich se uloží do šesti vrstev 1620 sudů s odpadem. U každého sudu jsou do databáze zaznamenávány údaje o jeho obsahu, celkové váze, a jeho umístění v jímce. Díky tomu je známo i rozložení radioaktivních látek v jímce. Celé úložiště v EDU pojme 180 tisíc sudů. Tento objem je dostatečný pro uložení všech NAO a SAO z obou našich jaderných elektráren a to i v případě prodloužení jejich životnosti na čtyřicet let [4]. Toto úložiště slouží i pro ukládání vyřazených kontaminovaných součástí zařízení z provozu elektrárny. Po zaplnění celé kapacity jímky se volné prostory mezi sudy vyplní betonem a izolují se tak od okolního prostředí. Posledním krokem při ukládání je přikrytí jímky železobetonovými panely a zabezpečení proti vnikání vlhkosti do jímky. Takto uložené odpady nevykazují nijak vyšší radioaktivitu, než je přirozené pozadí okolí elektrárny.

## 3.2 Ukládání vysoce aktivní odpadů

Nejobjemnější složku vysoceaktivních odpadů (VAO) tvoří vyhořelé jaderné palivo (VJP). Označení VJP za odpad však není přesné. V ČR prozatím není vyjasněno budoucí nakládání s VJP, je možné jeho opakované využití v moderních reaktorech. Před samotným vyjmutím paliva z reaktoru se reaktor musí bezpečně odstavit, vychladit a otevřít. VJP, které obsahuje radionuklidy s vysokou aktivitou a dlouhým poločasem rozpadu, se po vyjmutí z aktivní zóny reaktoru umístí do bazénu vyhořelého paliva. Ten je umístěn v těsné blízkosti samotného reaktoru. V tomto bazénu se palivo dále dochlazuje po dobu asi pěti let. Všechny operace spojené s přesunem paliva z reaktoru do bazénu musí být kvůli stínění prováděné pod vrstvou vody.

Z bazénu vyhořelého paliva se kazety s palivem ukládají do skladovacích kontejnerů. V českých JE se používají kontejnery typu CASTOR.

### 3.2.1 Kontejnery CASTOR

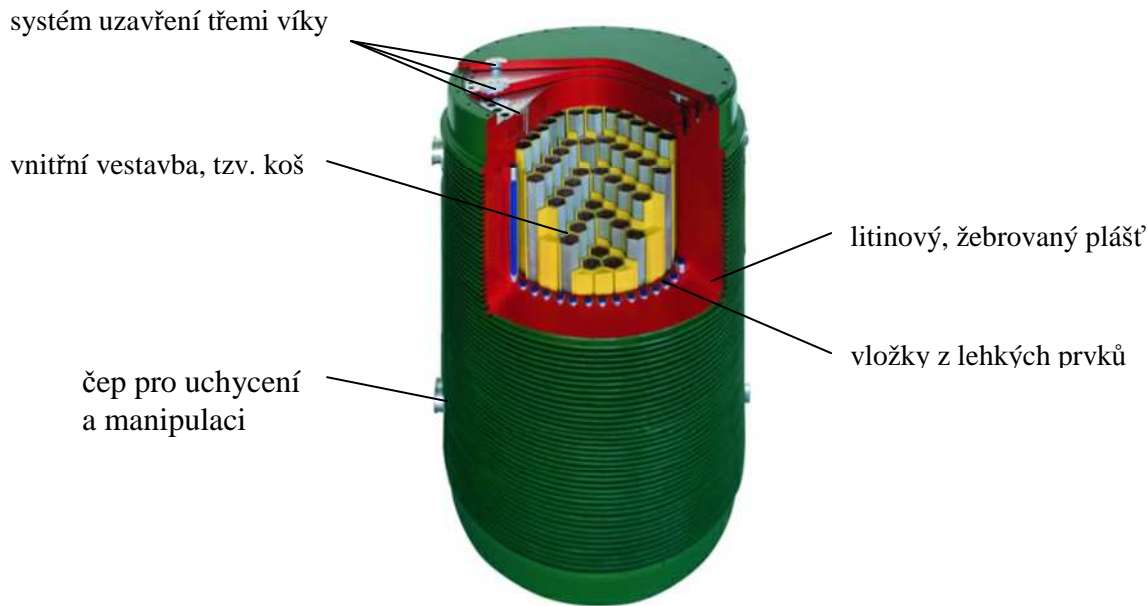
Kontejner CASTOR (Cask for storage and transport of radioactive material) je silnostěnný, hermeticky těsný kontejner s vnitřní vestavbou určený pro skladování i transport VJP zároveň.

Kontejner pro palivo z EDU nese označení 440/84, pro ETE 1000/19. Kapacita kontejnerů je 84 a 19 palivových kazet.

Kontejner pro skladování VJP musí splňovat několik požadavků. Musí dostatečně odvádět zbytkové teplo z vyhořelého paliva do okolního prostředí, odstínit ionizující záření z vyhořelého paliva a zajistit těsnost, tedy hermetické oddělení prostoru s vyhořelým palivem od životního prostředí. Důležitou vlastností kontejneru je udržet podkritičnost skladovaných palivových souborů.

Odolnost kontejnerů bývá pro ověření jejich bezpečnosti zkoušena při speciálních zkouškách. Kontejner musí být odolný teplotě a tlaku. Je konstruován pro dlouhodobý rozsah okolních teplot od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+38\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Krátkodobě, po dobu 30 minut, musí odolat i teplotě  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Zkoušky odolnosti působení tlaku se provádí ponořením do vody do hloubky až 200 m. Kontejner bývá zkoušen i proti mechanickému poškození a poškození nárazem. Kontejner musí odolat pádu z výšky 9 m na speciální tuhou podložku, nebo z výšky jednoho metru na trn. Bez poškození musí vydržet pád tělesa o hmotnosti 500 kg z výšky 9 m. Test je úspěšný, pokud i po této sérii simulovaných havarijních událostí jsou všechny základní funkce kontejneru zachovány v plném rozsahu. Při transportu se kontejner umístí do speciálního rámu s tlumiči, zajišťující bezpečnost při převozu. Po absolvování příslušných zkoušek uděluje danému typu kontejneru Státní úřad pro jadernou bezpečnost certifikát pro použití.

Kontejner je vyroben z tvárné litiny s kuličkovým grafitem. Tento materiál splňuje mechanické požadavky. Dobře stíní všechny druhy záření, díky dobré tepelné vodivosti výborně odvádí zbytkové teplo zevnitř kontejneru na povrch. Pro zlepšení odvodu tepla z povrchu je kontejner po obvodu horizontálně žebrován. Vnitřní vestavba, tzv. koš, pro umístění palivových článků je vyroben z hliníku se zvýšeným obsahem bóru. V plášti kontejneru je navíc vložka z lehkých prvků, která zajišťuje neutronové stínění. Prvkem pro zajištění bezpečnosti je i systém uzavření kontejneru pomocí třech vík. První víko udržuje uvnitř kontejneru naplněného heliem podtlak, druhé víko udržuje v prostoru mezi prvním a druhým víkem, taktéž naplněného heliem, přetlak. Třetí víko má ochrannou funkci proti vnějším vlivům. Tímto jednoduchým způsobem je zajištěno, že plyny vzniklé uvnitř kontejneru neproniknou případnými netěsnostmi do okolí. Pod víky je použito dvojité těsnění v podobě O kroužků, jedno z ocelového materiálu Helicoflex a druhé z eleastomeru. Kontejner CASTOR 440/84 má vnější průměr 2,66 metrů a výšku 4,2 metrů. Hmotnost prázdného kontejneru je 93,7 tun, naplněného obalového souboru 112 tun.



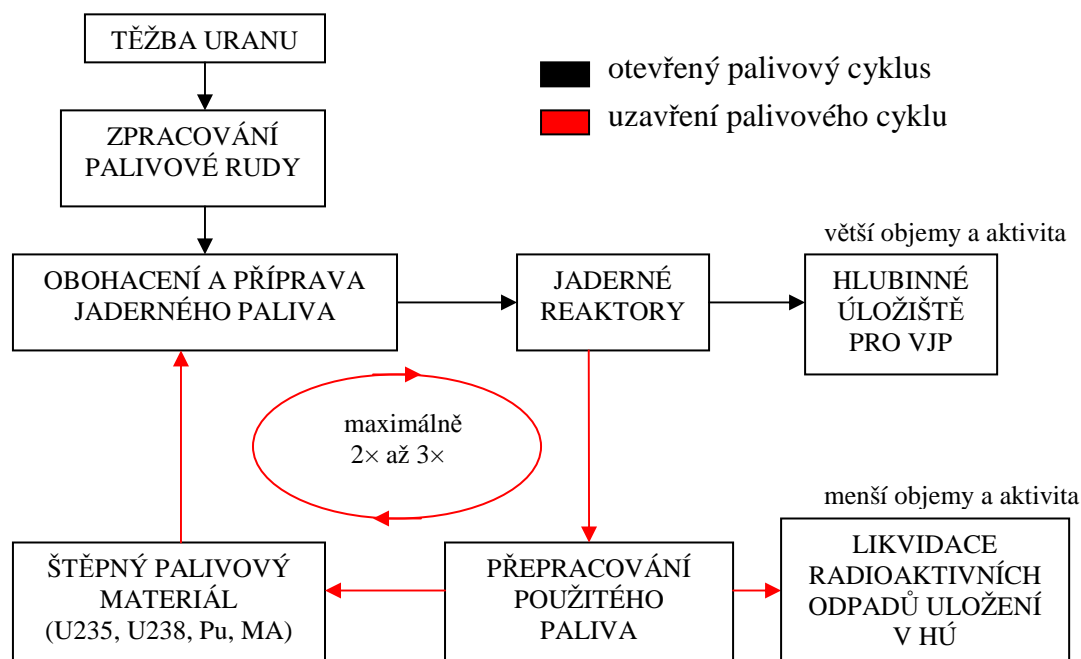
Obr. 6 Řez kontejnerem typu CASTOR 1000/19 [4]

Do kontejneru typu CASTOR se ukládá vyhořelé palivo z EDU i ETE, počítá se s ním i pro uskladňování v teprve budovaném skladu na území ETE.

Podle současně používaných technologií pro skladování VJP se palivo po vložení do kontejneru CASTOR ukládá do meziskladu vyhořelého paliva. Palivo z obou našich jaderných elektráren se skladuje v meziskladech v areálu EDU. První mezisklad, který je v provozu od roku 1995, se zaplnil do plné kapacity v roce 2006. Kapacita tohoto skladu je 60 kontejnerům, což je asi 600 tun paliva. V roce 2006 zahájil provoz druhý sklad s úložnou kapacitou 134 kontejnerů, tedy 1340 tun paliva. Tento mezisklad by měl vystačit na uložení paliva ze všech šesti provozovaných jaderných bloků v ČR. Oba dva mezisklady jsou provozovány jako suché. Médium zajišťující chlazení kontejnerů je vzduch. Nový mezisklad v areálu ETE je právě ve výstavbě, uvedení do provozu se plánuje v roce 2013. Očekává se, že v těchto meziskladech bude VJP uskladněno až do doby, než dojde ke konečnému uložení v hlubinném úložišti, nebo k dalšímu využití v reaktorech novějších generací [4],[18].

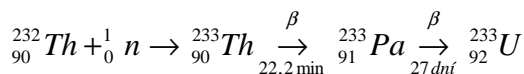
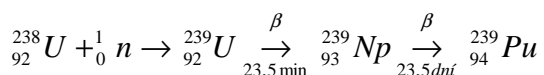
### 3.2.2 Palivový cyklus v ČR

Palivový cyklus představuje souhrn všech činností od těžby přírodních zdrojů přes jeho energetické využití až po nakládání s použitým jaderným palivem. Cyklus jaderného paliva lze rozdělit na dvě části, a to přední a zadní. Přední částí se rozumí těžba uranové rudy, její chemická a mechanická úprava, příprava pro obohacování, samotné obohacování, výroba palivových článků a jejich energetické využití v jaderném reaktoru. Zadní část palivového cyklu je spojena s vyjmutím paliva z reaktoru a jeho dalším nakládáním. Podle způsobu využití paliva v zadní části cyklu se palivový cyklus rozděluje na otevřený a uzavřený, Obr. 7. Dosavadní způsob nakládání s palivem v ČR odpovídá cyklu otevřenému.



Obr. 7 Schéma otevřeného a uzavřeného palivového cyklu [5]

Palivový cyklus začíná samotnou těžbou uranové rudy. Uran není v přírodě nijak vzácný prvek. Jeho světové zásoby jsou odhadovány až na  $10^{15}$  tun. Uran se v přírodě objevuje v uranových břidlicích, jílu, uhlí, ale i v mořské vodě. Vykytuje se jako směs izotopů uranu. Většinový podíl zastupuje  $U^{238}$  (99,28 %), dále  $U^{235}$  (0,715 %) a  $U^{234}$  (0,005 %). Dalším palivem, které se nachází volně v přírodě, je thorium. To se vyskytuje ve směsi dvou izotopů,  $Th^{232}$  (99,99 %) a zbytkově jako  $Th^{228}$ . Thorium se označuje jako tzv. množivý nuklid, neboť slouží jako materiál pro přípravu nového jaderného paliva v jaderném reaktoru. Jako další paliva lze označit tzv. paliva umělá, jejichž základem jsou již zmiňované izotopy  $U^{238}$  a  $Th^{232}$ . Z nich pomocí zachytu neutronu vznikají izotopy  $U^{233}$  a  $Pu^{239}$  podle rovnic



Izotopy  $Pu^{239}$  a  $U^{233}$  jsou využitelné jak v rychlých reaktorech, tak i v reaktorech využívající tepelné neutrony.

Po vytěžení rudy dochází k mechanické a chemické úpravě. Výsledkem tohoto upravování je uranový koncentrát, tzv. žlutý koláč  $U_3O_8$ . Obsah uranu ve žlutém koláči vyráběném v ČR je asi 65 procent, dále obsahuje asi 12 procent síranů a další sloučeniny. Žlutý koláč dále vstupuje do procesů čištění a převádí se na fluorid uranický  $UF_4$  a fluorid uranový  $UF_6$ . Fluorid uranový je velice těkavá látka, která může jednoduše změnou tlaku a teploty měnit skupenství. Záměrně se převádí na plynné skupenství, čímž je sloučenina uranu připravena pro proces obohacování [5].

Cílem procesu obohacování je zvýšení obsahu izotopu  $U^{235}$  v jaderném palivu. V současné době jsou známé a používané tři metody obohacování. Nejstarší a nejvíce rozšířená je metoda plynné difúze. Metoda využívá rozdílných hmotností plynných molekul  ${}^{235}UF_6$  a  ${}^{238}UF_6$ . Směs těchto dvou izotopů prochází kaskádami pórovitých překážek s velikostí pórů menší jak

0,01 mikrometrů. Lehčí molekuly obsahující izotop U235 procházejí přepážkami s menším odporem a dochází tak k separaci žádaných izotopů U235. Další metodou obohacování je metoda odstředivání. Opět se zde využívá nestejných hmotností dvou izotopů uranu, na které působí odstředivé síly v použitých centrifugách. Těžší molekuly s U238 se zdržují dále od osy rotace, lehčí molekuly U235 se odebírají ze středu centrifugy ven k dalšímu stupni odstředění. I poslední metoda využívá rozdílných atomových hmotností obou izotopů. Plynný UF<sub>6</sub> proudí zakřivenou dýzou. Při oddělování se uplatňují na molekulách různých atomových hmotností dynamické síly při proudění plynu. Všechny tři metody obohacování jsou technologicky a energeticky velice náročné operace. Po dokončení obohacování je plynný UF<sub>6</sub> zpětně převeden na UO<sub>2</sub>. Výsledné obohacení uranu bývá 3 až 5 % U235, zbylá část je zastoupena U238.

Po procesu obohacení přechází kovový UO<sub>2</sub> do závodu výroby jaderného paliva, do tzv. přepracovatelského závodu. Pro EDU je tímto závodem ruská společnost TVEL. V ETE se odebírá palivo od americké firmy Westinghouse. V roce 2010 však i ETE přechází na palivo ruského výrobce. Zde se palivo v podobě válečků plní a uzavírá do zirkoniových trubek. Takto vzniklé palivové proutky se kompletují do tzv. palivových kazet. Tím je palivo připraveno pro využití v reaktoru. Po energetickém využití paliva v reaktoru je tzv. přední část palivového cyklu ukončena [5], [17].

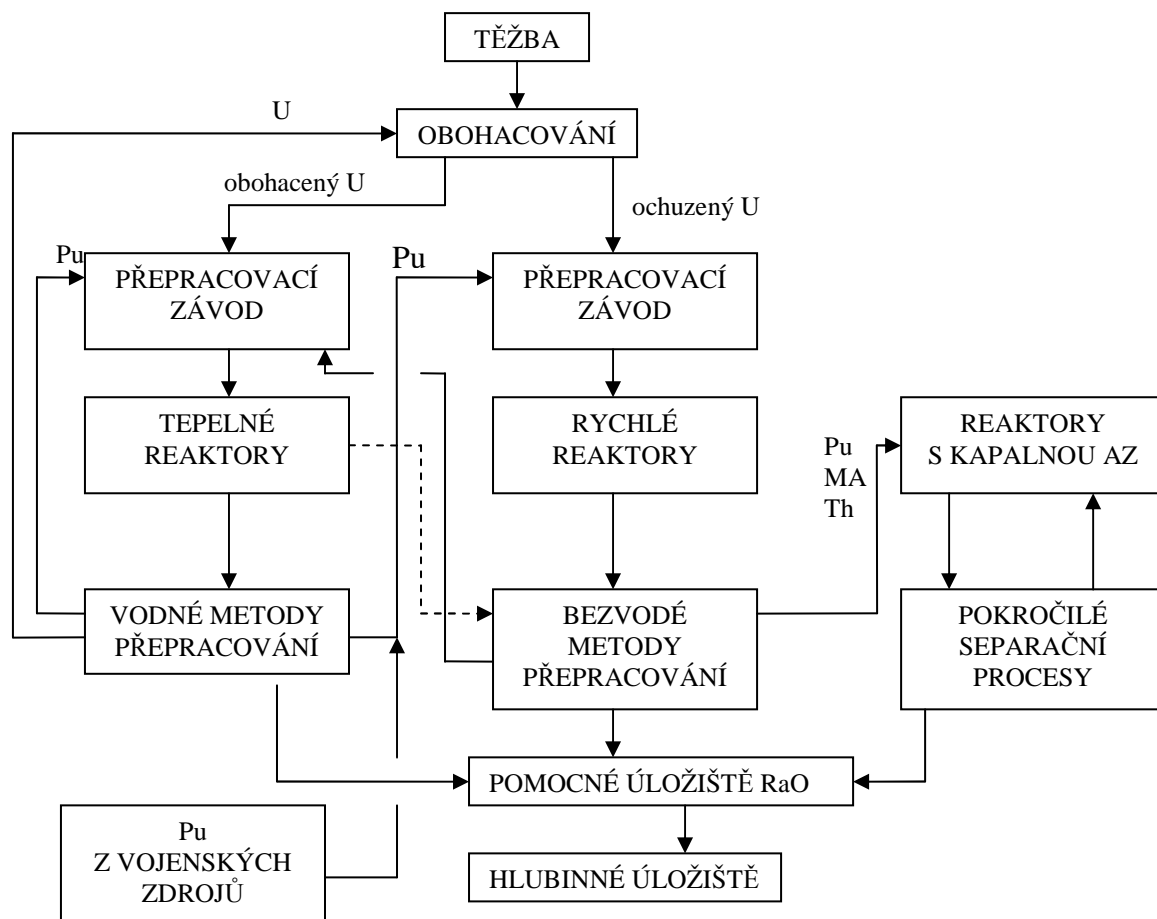
### 3.2.3 Uzavření palivového cyklu, VJP jako cenná surovina

Důvodů, proč uzavřít palivový cyklus je několik. Je to zvýšení energetické využitelnosti uranu, zkrácení doby potřebné k uložení vysoceaktivních odpadů a zmenšení objemů ukládaných odpadů. Vize o uzavření palivového cyklu jsou uskutečnitelné pomocí metod přepracování a transmutace VJP (Partitioning & Transmutation). Úkolem přepracování a transmutace je oddělení a využití štěpitelných látek z VJP, tedy U, Pu a dalších tzv. minoritních aktinoidů (Np, Am, Cm). Pomocí transmutačních technologií mohou být některé dlouhodobé štěpné produkty transmutovány na izotopy s nižšími poločasy rozpadu (např. Tc99, I129, nebo Cs135). Pro transmutaci těchto štěpných produktů se uvažuje s použitím reaktorů typu ADS (Accelerator Driven System) [17]. Tyto metody jsou však stále ve fázi vývoje a výzkumu.

Přepracování jaderného paliva je záležitostí jen průmyslově velice vyspělých zemí, jako je Francie, Rusko, Německo, nebo Velká Británie. Přepracovávání bylo například v USA svým vlastním zákonem zakázáno. Důvodem byla obava ze zneužití štěpitelných materiálů. V České republice přepracovatelský závod není a ani se s jeho výstavbou nepočítá.

Na Obr. 8 je schematicky uveden princip očekávaného uzavření palivového cyklu. Při uzavření palivového cyklu se předpokládá využití jak stávajících typů reaktorů, tedy druhé a třetí generace, tak i reaktorů generace čtvrté (GEN IV). VJP z tepelných reaktorů by procházelo přepracováním ve vodných technologiích. Žádaným produktem této metody je U, Pu, nebo jejich směs v podobě MOX paliva. Tyto materiály by byly využitelné buď opět v tepelných reaktorech (jen asi dvakrát, nebo třikrát), nebo v reaktorech rychlých. V rychlých reaktorech se počítá se štěpením Pu239 vzniklého z U238, dále se štěpitelnými materiály z přepracovatelských závodů (MA), nebo s Pu původně určeným pro vojenské účely. VJP z rychlých reaktorů by procházelo bezvodými metodami přepracování, které by opět oddělovaly štěpitelný materiál. Tento materiál by se stal palivem pro reaktory GEN IV s kapalnou AZ. VJP z reaktorů s kapalnou AZ by se přepracovávalo v pokročilých bezvodých metodách přepracování, založených na principu elektrorafinace štěpných produktů. Dále nevyužitelné produkty štěpení ze všech jmenovaných přepracovatelských metod by byly bezpečně uloženy v hlubinném úložišti.

Reaktory čtvrté generace jsou však stále ve fázi výzkumu, jejich komerční využití ve větším měřítku se očekává až během první poloviny tohoto století. Jediným komerčně využívaným reaktorem GEN IV je rychlý reaktor v JE BN 600 s výkonem 600 MW v Bělojarské JE na území Ruska. Další JE s rychlým reaktorem je dnes z technických důvodů neprovozovaná elektrárna SUPERPHÉNIX s výkonem 1200 MW.

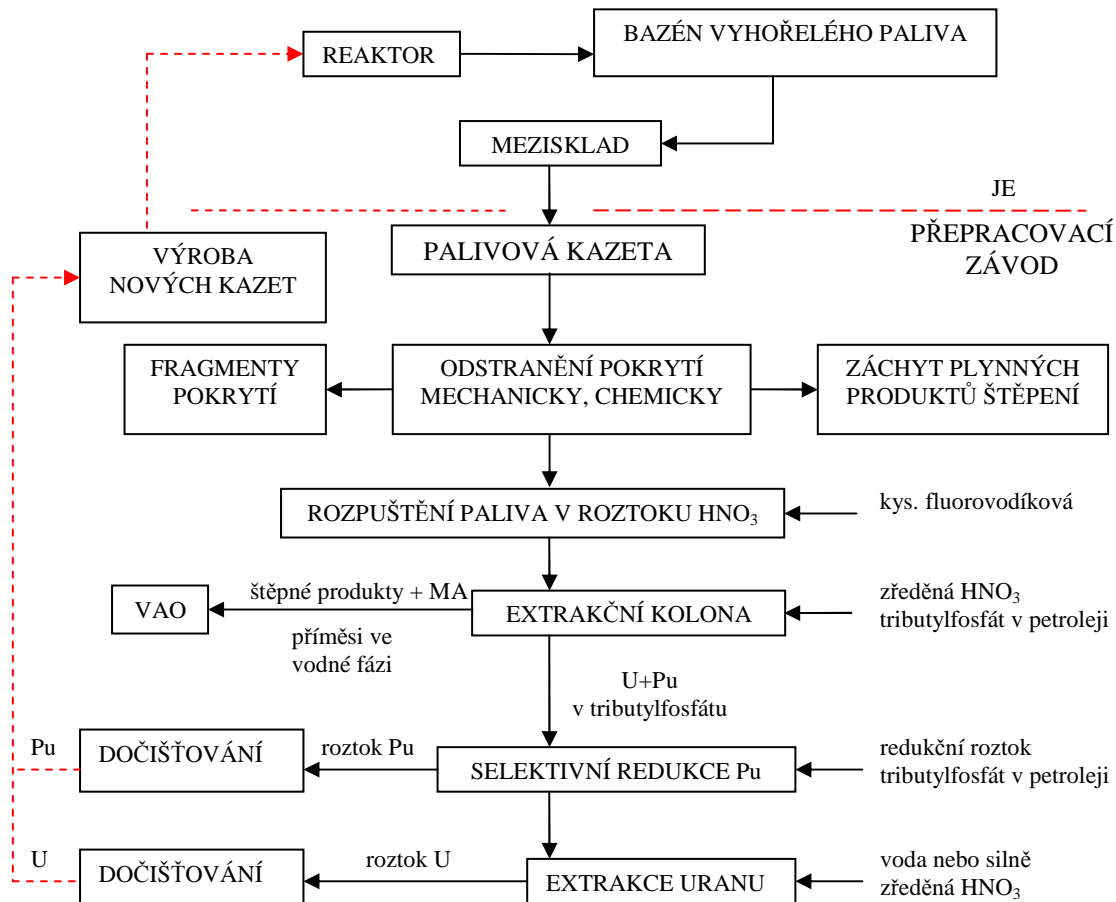


Obr. 8 Schéma možného budoucího uzavření palivového cyklu [5]

Metody zpětného využití jaderného paliva, které již byly uvedeny, jsou podle jejich principu rozděleny do dvou skupin, a to na metody vodné a bezvodé.

### 3.2.3.1 Vodné metody přepracování VJP

Základem vodných metod je zpracování použitého paliva ve vodných roztocích. Nejrozšířenější je metoda PUREX, Obr. 9.



Obr. 9 Schéma principu vodné metody přepracování PUREX [5]

Ta využívá dobré extrahovatelnosti složek uranu a plutonia z dusičnanových roztoků. Je nutná přítomnost extrakčního činidla, v tomto případě tributylfosfátu. Produkty metody PUREX jsou separovány U a Pu v podobě  $UO_2$  a  $PuO_2$ . Ty se vrací zpět do závodu výroby nového paliva. Jako odpad z metody PUREX odchází štěpné produkty a zbytkové množství MA (Np, Am, Cm). Uran a plutonium z technologie PUREX se můžou využít například pro výrobu paliv MOX (mixed oxide). Některé země, jako Francie, Německo nebo Švýcarsko, již částečně využívají palivo MOX i v lehkovodních reaktorech spolu s palivem  $UO_2$  (tvoří asi třicet procent palivové vsázky). Další možností je využití paliva MOX v rychlých reaktorech.

Štěpné produkty, které se separují během přepracování paliva, jsou postupně zahušťovány až do pevné fáze a zalévány do skla. Odpady jsou tak bezpečně fixovány a připraveny pro konečné uložení. Díky vodným metodám přepracování se snižuje objem odpadů pro konečné uložení a lépe se využívají přírodní jaderná paliva. Výhodou metody PUREX je nízká pracovní teplota, cca na úrovni pokojové teploty. Nevýhodou vodných metod je nebezpečí spuštění řetězové reakce při překročení kritických koncentrací štěpitelných látek při rozpouštění paliva. Kritičnost závisí i na tom, v jakém rozpouštědle je látka rozpouštěna, na geometrickém uspořádání nádob s roztokem i na koncentraci látek pohlcující neutrony. Další nevýhodou jsou velké objemy vysoceaktivních kapalných odpadů, které se musí ukládat. Aplikace vodné metody neřeší uspokojivě problém nekontrolovatelného zneužití štěpných produktů [5].



### 3.2.3.2 Bezvodé procesy

Metody bezvodé byly vyvíjeny později až po metodách s vodnými roztoky. Principy bezvodých metod však zatím nejsou využívány, kvůli jejich nevýhodám, které budou uvedeny dále.

Mezi výhody bezvodých procesů patří např. možnost zpracování VJP dříve po vyjmutí z reaktoru než u vodných metod, dále kompaktnost celého zařízení. V takovémto zařízení je možné oproti vodným metodám přepracovávat i větší množství VJP najednou, protože v soustavě není přítomná moderující látka, jako u vodných metod. Tím se může zvětšit kritický objem látky. Bezvodé metody však mají i své nevýhody, např. nižší čistota U a Pu. Ve výstupním produktu se objevují i radioaktivní štěpné produkty. Další nevýhodou je i finanční náročnost provozu spojená s udržováním zařízení a náklady na materiály, které odolávají kontaktu s reaktivními regenty za vysokých teplot v rozmezí 300 až 500 °C.

S bezvodými procesy se však začíná počítat v souvislosti s výzkumem technologií pro transmutaci VJP, především s procesem frakční destilace fluoridů [17],[19].

### 3.2.4 Výstavba hlubinného úložiště v ČR

S přijetím tzv. atomového zákona se ČR zavazuje, že zajistí bezpečné nakládání s radioaktivními odpady. I v případě VAO a VJP je finální uložení úkolem pro SÚRAO, jako zástupce státu. I přes slibný rozvoj nových technologií, které by mohly využívat obrovské zásoby energie ve vyhořelém jaderném palivu, zbude z jaderné energetiky určité množství dlouhodobých a vysoce radioaktivních odpadů. Ty bude třeba na mnoho tisíc let izolovat od životního prostředí. Jako nejvýhodnější, a jediná dále diskutovaná varianta odstranění VAO je považována varianta uložení v hlubinném úložišti.

Cílem hlubinného ukládání vyhořelého jaderného paliva a vysoce aktivních odpadů je zajistit trvalou izolaci uložených materiálů od životního prostředí bez možnosti jejich vyjmutí. Princip HÚ je založen na pasivní bezpečnosti, tedy na systému fungujícím bez dalšího nutného dohledu člověka. Úložný systém se skládá z bariérového systému, který se skládá z vhodné kombinace umělých a přírodních (geologických) bariér. Projekt HÚ v ČR počítá s uložením vyhořelých palivových kazet v kontejnerech z oceli vysoce legované niklem, titanem, nebo chromem. Jiné projekty HÚ, např. ve Švédsku a Finsku použijí měděné kontejnery. Ukládané palivo s malým zastoupením U235 nemůže být kritické, pokud by v soustavě nebyl přítomen moderátor, např. voda. Proto musí být kladen důraz na zajištění těsnosti obalových souborů proti vnikání vody, nebo jakékoliv vlhkosti. S ohledem na odolnost proti vlhkosti jsou vybírány i další stupně bariér. Další bariérou po kontejneru by tak měl být např. bentonit. Celý tento systém bude uložen v hloubce až 500 metrů v horninovém masivu. Všechna místa možného budoucího úložiště v ČR jsou tvořena žulovým (granitickým) podložím. Žula se projevila jako vhodný materiál, který nijak nevede k degradaci vnitřních bariér úložiště [4].

Výzkumné práce na výběru lokality pro hlubinné úložiště probíhaly již začátkem devadesátých let minulého století. Práce zadávané MŽP byly zaměřené na výběr geologicky vhodných lokalit. V roce 1991 jich takto bylo určeno více než třicet. Postupným uvažováním dalších kritérií bylo vybráno šest oblastí, na kterých bude prováděn podrobnější průzkum. Jsou to Lubenec-Blatno v Ústeckém kraji, Pačejov u Horažďovic, Pluhův Žďár-Lodhěrov na Jindřichohradecku, Božejovice-Vlksice na Táborsku a Rohozná a Budišov na Vysočině. S ohledem na odpor obyvatel z jmenovaných lokalit byly výzkumné práce v roce 2004 pozastaveny. SÚRAO se snaží pro obnovení průzkumných prací získat od dotčených obcí ve výše jmenovaných oblastech souhlas. I kvůli této skutečnosti byly do výběru zařazeny dva vojenské újezdy, VÚ Boletce v Jižních Čechách a VÚ Hradiště v Karlovarském kraji.

V těchto dvou lokalitách bude probíhat podrobnější výzkum pomocí družicových a leteckých snímků, a dále geofyzikální a geochemická měření v terénu. Jednotlivé etapy vybudování HÚ jsou představené v Tab. 6 [4]. Z důvodů nulových zkušeností s výstavbou zařízení podobných hlubinnému úložišti je časový plán výstavby HÚ v ČR pouze orientační. Zahájení provozu HÚ proto není pevně dáno, SÚRAO ho plánuje se v letech 2065 až 2085.

Tab. 6 Etapy výstavby hlubinného úložiště v ČR [4]

| Úkol   | Rok          |
|--|--------------|
| Na základě provedení příslušných geologických prací a vyhodnocení výsledků zařadit do územních plánů dvě lokality (hlavní a záložní) pro hlubinné úložiště                                     | 2015         |
| Na základě provedení příslušných geologických prací a vyhodnocení výsledků doložit vhodnost jedné lokality pro umístění hlubinného úložiště  | 2025         |
| Připravit veškerou projektovou a podpůrnou dokumentaci pro zahájení výstavby podzemní laboratoře a realizaci dlouhodobých experimentů pro doložení a potvrzení bezpečnosti hlubinného úložiště | 2030         |
| Zahájení výstavby HÚ   | 2050         |
| <b>Zahájit provoz úložiště</b>   | 2065 až 2085 |

Na přípravě hlubinných úložišť a provozování podzemních laboratoří se podílejí odborníci z celého světa. Podmínkám pro naši republiku nejbližší jsou výsledky mezinárodních výzkumů probíhajících od roku 1983 v podzemní laboratoři umístěné v žulovém masivu ve Švýcarsku nedaleko Grimsel [4]. Finanční úspory na vlastním vývoji, ale i získání zkušeností a poznatků z této laboratoře přiměly SÚRAO k podepsání smlouvy se společností NAGRA, která mezinárodní výzkum v lokalitě Grimsel zajišťuje [4],[18].

### 3.3 Nakládání s RaO ve světě

Co se týče nakládání s nízko a středně aktivními odpady ve světě, jsou tamní používané postupy téměř totožné s postupy zavedenými v ČR. NAO a SAO jsou uzavírány do sudů, které jsou následně uloženy v přípovrchových, nebo podpovrchových úložištích. Rozdílné mohou být např. metody zpracování kapalných odpadů. V ČR se toto děje metodou tzv. bitumenace, tedy odpařováním v odparkách a fixací odpadů v asfaltové směsi. Ve světě jsou však využívány i jiné metody, např. cementace, nebo nitrifikace.

Oproti ČR je však v některých zemích rozdílné nakládání s VJP. Jak již bylo řečeno, v českých JE se po vyjmutí VJP z bazénu dochlazování paliva uloží do kontejneru CASTOR a do tzv. meziskladu. Tento typ meziskladu je suchý, chladícím médiem je vzduch. Jinak je

tomu například ve Švédsku. Zde se ukládá VJP do centrálního podzemního meziskladu CLAB, který je umístěn na pobřeží Baltského moře u JE Oskarshamn. Je uloženo asi 25metrů pod zemským povrchem. Tvoří jej dlouhá chodba a čtyři bazény s úložnou kapacitou pro 8000 tun VJP. Jedná se tedy o typ mokrého meziskladu VJP.

Jiný způsob provedení meziskladu VJP je například ve Velké Británii. Jedná se o tzv. kobkové suché sklady. Ty mají podobu velkých betonových zásobníků se skladovacími dutinami. V každé skladovací dutině je umístěn jeden nebo více palivových článků uzavřených v kovových trubkách a naplněných inertním plynem. Chlazení je zajištěno buď přirozenou cirkulací vzduchu, nebo kombinací přirozeného a nuceného oběhu [4],[17].

### 3.3.1 Výstavba HU ve světě

Ve všech zemích využívajících jadernou energetiku se postupně hromadí VJP a VAO. Tyto země, stejně jako ČR, jsou tak zatíženy úkolem konečného uložení těchto materiálů. Podle přístupu k výstavbě a pokročilosti v přípravě výstavby HÚ lze země produkující VJP a VAO rozdělit do tří skupin.

První skupinu tvoří země, které mají pro HÚ vybranou vhodnou lokalitu. Ve vybrané lokalitě budují, nebo už provozují podzemní laboratoře. Tyto laboratoře slouží pro ověřování geologických podmínek a pro vytvoření přesného konstrukčního řešení budoucího úložiště. Země patřící do této skupiny jsou Švédsko, Finsko, USA, Francie, Německo, Švýcarsko a Japonsko. Očekávané zahájení provozu HÚ v těchto zemích je v letech 2035 až 2040.

Geologické materiály, v kterých mají tyto státy zbudované podzemní laboratoře, a taky jediné materiály, které jsou zkoumány pro výstavbu HÚ jsou:

- a) granitity, neboli žuly (Kanada, Švýcarsko, Švédsko),
- b) tufy (USA),
- c) sůl (Německo, USA),
- d) jíly (Japonsko)

Do druhé skupiny mohou být řazeny země jako Česká republika, Slovensko, Maďarsko, Belgie, nebo Španělsko. V těchto zatím nebyla vybrána lokalita pro HÚ. Je to většinou z důvodu odporu obyvatel daných lokalit s výstavbou. V potenciálních oblastech tak probíhá průzkum pouze v omezené míře a vývoj konstrukce HÚ probíhá jen na základě teoretických podkladů.

V poslední, třetí skupině, jsou země, které ještě nemají jasnou představu o nakládání s VJP. V těchto zemích jsou tak s výstavbou HÚ na úplném začátku. VJP skladují v meziskladech. Země s tímto scénářem jsou Nizozemsko, Velká Británie a některé země východní Evropy využívající JE [17].

## 4 PERSPEKTIVA VYUŽITÍ JE VE SVĚTĚ A V ČR

V oblasti energetiky má světová, ale i tuzemská politická scéna v současnosti závažný úkol, a tím je hledání a budování nových zdrojů energie. Při řešení tohoto úkolu je třeba uvážit dva hlavní problémy, především dostupnost k daným zdrojům a jejich negativní vliv na životní prostředí. Jako řešení obou těchto problémů se jeví jaderná energetika. Jaderná elektrárna při svém provozu neprodukuje žádné, dnes tolik diskutované, skleníkové plyny ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ). Jaderná energetika se všude ve světě řadí k nejdostupnějším a nejlevnějším zdrojům energie. Skutečnost, že cena elektrické energie vyrobené v jaderném zdroji je stejná, nebo nižší než cena energie vyrobené v uhelné, nebo plynové elektrárně, je způsobená velmi nízkými palivovými náklady. Další výhodou je i to, že v této ceně bývají zahrnuty už i náklady spojené s odstraňováním odpadů, vyřazování zařízení z provozu a další náklady.

Celosvětově je instalovaný výkon jaderných elektráren asi 370 000 MW, čímž je pokryto asi 16 % spotřeby světové elektřiny. Nejvíce jaderných zdrojů je provozováno v USA, ve Francii, Japonsku, Velké Británii a Rusku. Jaderná energetika hraje velmi významnou roli v zemích EU. Z jaderných elektráren zde pochází přibližně jedna třetina veškeré vyrobené elektřiny. V České republice fungují nyní jaderné elektrárny v Temelíně a Dukovanech s celkovým výkonem téměř 4000 MW. Tímto výkonem je pokryto kolem třiceti procent celkové spotřeby elektřiny v České republice, odpovídá tak průměru EU [6].

Jaderná elektrárna Temelín leží v Jihočeském kraji, v blízkosti Českých Budějovic. První záměry pro provedení stavby ETE byly vydány v roce 1979, schváleny byly o rok později. Vypracování projektu bylo zadáno podniku Energoprojekt Praha, který jej dokončil v roce 1985, a podle něj začala o dva roky později samotná výstavba elektrárny. Výstavba byla dokončena v roce 2000 a byla tak připravena pro zkušební provoz. V roce 2003 získala ČR spuštěním dvou bloků ETE svůj největší energetický zdroj. Elektřina je zde vyráběna pomocí dvou výrobních bloků s reaktory VVER 1000 typ V 320.

Jaderná elektrárna Dukovany je naší nejstarší jadernou elektrárnou. Projekt vznikl už v 70. letech minulého století, kdy tehdejší vláda podepsala s bývalým Sovětským svazem dohodu o vybudování dvou jaderných elektráren. Jednou z nich byla elektrárna Dukovany a druhá elektrárna v Jaslovských Bohunicích na Slovensku. Jednotlivé bloky EDU byly spouštěny postupně v letech 1985 až 1987, kdy elektrárna dosáhla plného projektového výkonu 1760 MW. Původní projekt vybavil EDU čtyřmi tlakovodními reaktory ruské koncepce s označením VVER 440/213. V posledních letech se na EDU provádí modernizace. Cíle modernizace jsou zvýšení výkonů jednotlivých bloků na 500 MW (3. blok už tento výkon má), zkracování doby odstávek, prodloužení životnosti elektrárny až na 60let a další.

Podle organizace World Association of Nuclear Operators (WANO) patří EDU k nejlepším 20 % provozovatelů jaderných elektráren ve světě. ETE do této vybrané skupiny bohužel zatím nepatří, z důvodu problémů při dosavadním provozu, což se podepsalo na ukazatelích popisujících disponibilitu výroby elektrické energie. Problémy při provozu však nebyly v primární, tedy jaderné části elektrárny, šlo o problémy s prototypem parní turbíny.

### 4.1 Vývojové generace jaderných elektráren

Jaderné elektrárny prošly za dobu jejich využívání určitým vývojem, který dále pokračuje. Za více než 50 let éry energetického využívání jaderných reaktorů byly vyvinuty různé druhy reaktorů. Po celou dobu vývoje se klade velký důraz na bezpečnost. Dalo by se říct, že s každou novou vývojovou generací se bezpečnost zvýšila o jeden řád.

#### 4.1.1 JE s reaktory GEN I, GEN II a GEN III

K jaderným elektrárnám s těmito reaktory patří většina dnes provozovaných a budovaných elektráren. První JE, tzv. „první generace“ (GEN I), byly budovány v 50. letech minulého století. Většina reaktorů tehdy stavěných byly kusově stavěné reaktory, dalo by se říct prototypy. Z počátku však nešlo o reaktory energetické, ale byly stavěny za účelem výroby plutonia. Za první komerčně využívanou jadernou elektrárnu dodávající elektřinu do sítě je považována elektrárna Calder Hall ve Velké Británii, spuštěná v roce 1956. První generace reaktorů byla vlastně takovým ověřovatelem zvolených koncepcí jaderných reaktorů. Tyto reaktory byly po skončení jejich životnosti vyřazovány z provozu. Jednalo se hlavně o reaktory typu MAGNOX, budované ve Velké Británii. Šlo o koncepci reaktoru s grafitovým moderátorem, chlazené oxidem uhličitým. Poslední funkční reaktor tohoto typu je v elektrárně Wylfa ve Velké Británii, ukončení jeho provozu proběhne zřejmě během roku 2010.

Do druhé generace jaderných reaktorů (GEN II) se řadí valná většina dnes provozovaných reaktorů. Znakem elektráren s reaktory GEN II je jejich výroba v sériích. Největším představitelem této generace jsou lehkovodní tlakové reaktory, jsou to reaktory s označením PWR a VVER. Ty využívá více než polovina dnes provozovaných jaderných elektráren ve světě. Druhým nejvíce užívaným typem reaktorů této generace jsou lehkovodní varné reaktory BWR. Dalšími typy reaktorů jsou kanadský CANDU, britský typ AGR (vylepšený MAGNOX), nebo ruská koncepce RBMK, kterou proslavila hlavně černobylská havárie.

Třetí generace reaktorů svými projekty navazuje na úspěšně provozované reaktory GEN II. Reaktory GEN III jsou projektovány s důrazem na zlepšení spolehlivosti, ekonomiky a hlavně bezpečnosti provozu zařízení. Je u nich patrné standardizované provedení, čímž se může zkrátit doba povolovacích procesů, ale i snížit náklady a čas potřebný pro výstavbu. Očekávaná standardní životnost u tohoto typu elektráren je oproti dřívějším generacím prodloužena na šedesát let. Významným rysem reaktorů této generace je také zařazení systémů pro zachycení roztavené aktivní zóny. Uplatňují se také vyhořívající absorbery v palivu, obsahující bór, nebo gadolinium, které zrovnoměří vyhoření a prodlouží kampaň použití paliva [12]. Další generace reaktorů je označována jako GEN III+. Jedná se vlastně o reaktory GEN III, u kterých je kladen důraz na pasivní bezpečnostní prvky, tedy bezpečnostní zařízení fungující bez lidského zásahu. Jsou to prvky využívající přírodních sil, jako je gravitace, přírodní proudění, nebo konstrukční řešení odolávající vysokým tlakům a teplotám. Právě reaktory GEN III a GEN III+ by měly nahradit v nejbližších desetiletích dnes dosluhující jaderné elektrárny.

#### 4.1.2 JE s reaktory GEN IV

Od reaktorů GEN IV se očekává zintenzivnění využívání jaderné energetiky, především díky využití přírodních zdrojů jaderných materiálů pro štěpení a transmutaci, tedy U238 a Th232. Je v nich možné využití i materiálů původně vojenských, plutonia a dalších štěpitelných aktinoidů. Mezi další výhody těchto reaktorů patří vyšší stupeň vyhoření paliva, možnost transmutace jaderného paliva a tím následné zmenšení objemů vysoce aktivních látek, které by se musely ukládat v HÚ. Očekává se, že při použití těchto typů reaktorů se sníží i riziko zneužití jaderných materiálů.

Jak už bylo řečeno, s reaktory GEN IV spolu s přepracovacími technologiemi se počítá jako s důležitým článkem pro uzavření palivového cyklu. Dnešní jaderná energetika využívá jako palivo většinou izotop U235, toto palivo je zatím dostupné a tedy i levné. To je hlavním důvodem, proč se metody přepracování příliš nepoužívají. V budoucnu, až dojde k nedostatku paliva U235, logicky dojde ke zdražování tohoto paliva a použití přepracovacích metod spolu s reaktory GEN IV se tak stane výhodnějším.

Vývoj reaktorů GEN IV slibuje i ekonomické zvýhodnění provozu JE vybavené takovýmto reaktorem. Vytvoření modulových konstrukčních řešení a standardizovaných modelů elektráren, které by se mohly stavět v sériích, by usnadnily a zkrátily nejen dobu schvalování, ale i časy potřebné pro projektování a samotnou výstavbu elektrárny. Reaktory GEN IV budou díky vyspělejší technologii a jiným chladivům pracovat při vyšších teplotách, čímž by se zvýšila i účinnost výroby elektrické energie. Díky vysoké pracovní teplotě by bylo umožněno též jiné využití jaderné energie, například při odsolování mořské vody nebo při průmyslové výrobě vodíku.

Důležitým ekonomickým činitelem je i životnost jaderné elektrárny. Náklady spojené s výstavbou jaderné elektrárny jsou vysoké, vyšší než u ostatních způsobů výroby elektrické energie. Proto každé prodloužení životnosti JE zlepšuje její návratnost a celou ekonomiku provozu. Minimální projektová životnost JE s reaktory GEN IV je udávána šedesát let, optimistické názory deklarují životnosti v délce osmdesát až sto let.

V rámci vývoje reaktorů GEN IV vzniklo nadnárodní společenství, tzv. Mezinárodní fórum pro GEN IV. Jejímí členy jsou země využívající jadernou energii, tedy USA, Kanada, Brazílie, Japonsko, Rusko a celá Evropská unie. Toto společenství vybrala několik koncepcí reaktorů GEN IV, na jejichž vývoji se bude dále společně pracovat. Jsou to tyto typy:

#### **Plynem chlazený vysokoteplotní reaktor na termálních neutronech (VHTR)**

Jedná se o reaktor chlazený heliem, moderovaný grafitem. Při projekci se vychází ze zkušeností z reaktorů chlazených plynem provozovaných v Anglii typu Magnox a AGR, nebo experimentálních vysokoteplotních reaktorech, např. v Německu v Jülichu, nebo projekt HTR v Číně. U reaktorů typu VHTR se očekává vysoká výstupní teplota z reaktoru, a to až 1000 °C. Díky takto vysoké teplotě je reaktor vhodný i pro zapojení do technologií průmyslové výroby vodíku. Při této teplotě se dá očekávat vysoká účinnost při společné výrobě elektrické energie a vodíku, a to více než 50 %. Limitujícím činitelem jsou však stále materiály, které by odolaly této teplotě.

#### **Reaktor s nadkritickými parametry vody a páry (SCWR)**

Tento typ reaktoru vychází z koncepcí dvou nejvíce využívaných reaktorů, tedy PWR a BWR. Chladivem i moderátorem by byla opět lehká voda. Elektrárny s tímto typem reaktoru by měla být uspořádána jako jednookruhová, s nadkritickými parametry vody a s teplotami chladiva 500- 530 °C a tlakem v okruhu až 25 MPa.

#### **Reaktor s kapalnou aktivní zónou (MSR)**

Provozování tohoto typu reaktoru se plánuje v různých variantách, jak na rychlých, tak i tepelných neutronech. Palivem reaktoru s kapalnou aktivní zónou by byly uranové, nebo thoriové fluoridové soli, které by zároveň sloužily i jako chladivo. Velkou výhodou tohoto typu reaktoru je, že použité soli v reaktoru mají vysokou teplotu varu. Díky této skutečnosti by v primárním okruhu mohl být nízký tlak, v rozmezí 0,1 až 0,2 MPa, tedy téměř atmosférický.

Počítá se i s různými variantami převedení tepelné energie do okruhu s turbínou. První variantou by bylo uspořádání tříokruhové, v prvním okruhu by cirkulovala tavenina solí a paliva. V druhém okruhu, tzv. mezivýměníku, by kolovala tavenina bez paliva. Třetí okruh by byl parní, ve kterém by probíhal známý Rankin-Clausiusův, nebo cyklus Braytonův s plynovou turbínou, např. s CO<sub>2</sub>. Druhou variantou by bylo uspořádání dvouokruhové. V primárním okruhu by opět cirkulovaly soli s palivem, které by předávaly teplo plynu (CO<sub>2</sub>) s nadkritickými parametry do Braytonova cyklu. Očekávané pracovní teploty by byly až 700 °C, což by opět umožnilo zapojení do výroby vodíku. Tyto reaktory se zároveň jeví

jako nevýhodnější z hlediska uzavření palivového cyklu, díky výhodným možnostem využití vyhořelého jaderného paliva ze stávajících reaktorů [5],[10].

#### **Rychlý reaktor chlazený plynem (GFR)**

U reaktoru tohoto typu se uvažuje použít jako chladivo plyn helium. Výstupní teplota z reaktoru by byla 850-900 °C, byl by tedy vhodný pro použití k termochemické generaci vodíku. Elektrárna by měla být koncipována jako jednookruhová, plyn z reaktoru by byl veden přímo na turbínu [5].

#### **Rychlý reaktor sodíkem chlazený (SFR)**

Reaktory sodíkem chlazené jsou zatím jediným typem energeticky provozovaných rychlých reaktorů. Představiteli jsou komerčně provozovaná JE BN600, pokusný reaktor v japonské elektrárně Monju nebo dnes již odstavený reaktor Superphoenix ve Francii. Palivem by měl být U238 a směsné palivo MOX. Dosahovaná výstupní teplota chladiva je 500 a 550 °C, což je pro metodu termochemické výroby vodíku málo. Zkušenost s tímto typem reaktoru ve světě je více než tři sta reaktorů. I díky této skutečnosti se očekává masivnější nástup těchto reaktorů už kolem roku 2030 [5],[20].

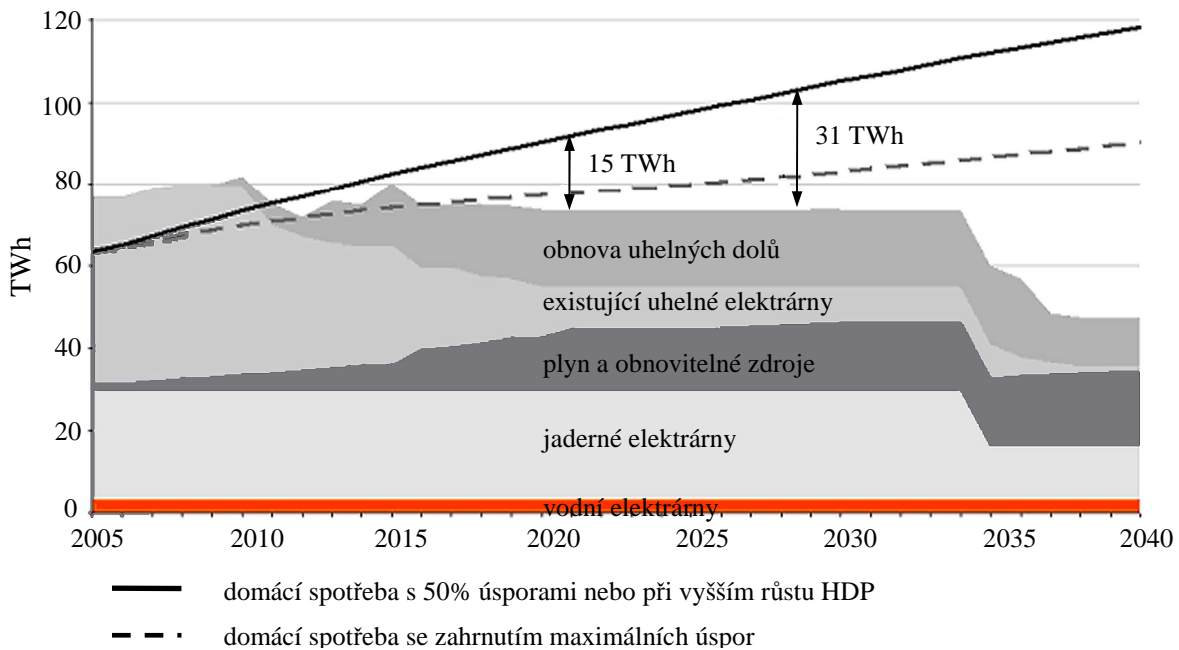
#### **Olovem chlazený rychlý reaktor (LFR)**

S reaktorem typu LFR jsou také velké zkušenosti. Jejich nejvýznamnější použití bylo na ruských ponorkách. Chladivem je kapalné olovo nebo eutektická slitina olova a bizmutu. Výstupní teplota tohoto reaktoru by měla být 550 °C, při použití vhodných materiálů by však mohla být až 800 °C, čímž by přibyla možnost použít reaktor ve vodíkové energetice. Palivem by bylo nitridické, nebo kovové palivo. Zajímavou vlastností při použití tohoto reaktoru by bylo, že při cirkulaci taveniny olova by bylo využito přirozené cirkulace. Jednalo by se tedy o výrazně vysokou stavbu.

Díky bohatým zkušenostem s reaktorem na jaderných ponorkách se reaktor využívá v jaderné energetice ve speciálním užití. Jedná se o malý reaktor s výkonem 10 až 100 MW. Reaktor je koncipován s cílem co nejdelších intervalů mezi výměnami paliva, v intervalech 10 až 20 let. Po vyhoření paliva, v tomto případě vysoce obohaceného uranu o izotop 235U by se reaktor dopravil zpátky do výrobního závodu, kde by bylo palivo vyměněno. Uplatnění mobilního reaktoru s takto malým výkonem je při tzv. ostrovním provozu, tedy v oblastech, kde je v jinak neobydlené oblasti větší město, nebo aglomerace lidí, či jiný spotřebič energie [6],[10],[20].

## **4.2 Výstavba nových jaderných zdrojů v ČR a ve světě**

Při uvážení výstavby nového energetického zdroje je na místě otázka, jestli je vůbec nový zdroj elektrické energie potřeba. V celém světě, tedy i v ČR, roste spolu s rozvojem všech oblastí techniky a zvyšováním životní úrovně spotřeba elektrické energie. Stávající výrobní kapacity, i přes svoji modernizaci a částečné navyšování výkonu, nebudou brzy schopné uspokojit nároky na spotřebu energie. Pro Českou republiku se odhaduje ztráta soběstačnosti ve výrobě elektrické energie mezi roky 2015 a 2025. Prognózy vývoje spotřeby a výroby elektřiny v ČR při neuvážení budování nových zdrojů jsou zobrazeny v Obr. 10. Možností jak uspokojit poptávku po elektrické energii by byla varianta vykupovat ji ze zahraničí z okolních zemí. Zprávy ze světa však hovoří o tom, že okolní země stojí taktéž před problémem, jak nahradit dožívající z většiny uhelné elektrárny a překonat deficit elektrické energie.



Obr. 10 Předpokládaný vývoj výroby a spotřeby elektrické energie [6]

Potřeba nových energetických kapacit do roku 2030 je v celé Evropě odhadována na 200 tisíc MW, což odpovídá například 200 blokům jaderné elektrárny Temelín [6].

Nabízí se tak otázka, jestli je vybudování takové výrobní kapacity do daného roku vůbec možné. Začátkem roku 2010 bylo v 29 státech světa v provozu 436 jaderných reaktorů s celkovou instalovanou kapacitou přes 370 000 MW [6]. Uvědomíme-li si, že většina reaktorů z tohoto počtu byla vybudována v průběhu 70. a 80. let dvacátého století, s dobrým politickým a finančním zázemím, není dostavení předpokládaného chybějícího výkonu nereálné.

Pro udržení samostatnosti České republiky v oblasti výroby elektřiny je nutné začít již s dostatečným předstihem s výstavbou nových výrobních zdrojů. Výstavba nových jaderných bloků splní kromě udržení soběstačnosti i jiné veřejné cíle. Výstavba takovýchto provozů přinese pracovní příležitosti českým zaměstnancům, obchodní příležitosti tuzemským dodavatelům a investice do rozvoje regionu, a umožní udržet v ČR vysokou lidskou kvalifikaci personálu v příslušných technických oborech [6].

Co se týká nově budovaných jaderných elektráren, je ve světě v současnosti ve výstavbě asi padesát nových jaderných elektráren ve třinácti zemích. Největší rozkvět jaderné energetiky zaznamenávají země s nejrychleji rostoucí ekonomikou. Staví se v Číně, Indii, Jižní Koreji a Japonsku. V Evropě je v současnosti ve výstavbě třetí blok jaderné elektrárny Olkiluto, což je koncept elektrárny GEN III, typu EPR. Ve Francii je připravována výstavba obdobného jaderného bloku s výkonem 1600 MW ve Flamanville. Očekává se, že do roku 2020 se v Evropě rozběhne masivnější výstavba elektráren s reaktory GEN III, tedy např. evropského typu EPR. V USA jsou licencovány nové typy reaktorů (např. AP 600, AP 1000) a vydána předběžná povolení se stavbou nových jaderných elektráren pro asi 8 lokalit.



### 4.2.1 Přístavba 3. a 4. bloku ETE

Nejvíce aktuální stavbou nového jaderného bloku v ČR je dostavba dvou bloků elektrárny Temelín. Výraz dostavba je správný, protože v původním projektu se počítalo s výstavbou čtyř bloků. Tento projekt však byl po přehodnocení potřeby zdroje o výkonu 4000 MW v roce 1990 tehdejší vládou zredukován a dostavěny byly pouze dva výrobní bloky.

Vybírání lokality vhodné pro výstavbu jaderné elektrárny je složitý proces. Je vybírána s ohledem na geografii, demografii, metrologii, hydrologii, geologii, hydrogeologii, seismiku, zdroje vody, tektonické zlomy, geodynamické jevy, změny povrchu vlivem hlubinné těžby nebo zdroje nerostného bohatství. Nutné je i přihlížení na podmínky infrastruktury, jako silničního a železničního napojení, vhodnosti z hlediska elektrické sítě a z mnoha dalších hledisek. Lokalita pro výstavbu jaderné elektrárny u nás v ČR musí vyhovovat i příslušné vyhlášce SÚJB 215/1997. Neméně důležitá jsou kritéria sociální, např. příznivé rozložení obyvatelstva pro možnost včasné ochrany v případě havárie, nebo nepřítomnost krasových jevů [6]. Pro čtyři bloky byla v lokalitě Temelín původně budována většina podpůrných systémů: pro pitnou a požární vodu, dešťovou a splaškovou kanalizaci, železniční a silniční síť, systém chemické úpravy vody a pro zdroj tzv. surové vody z Vltavy z nádrže Hněvkovice. Proto při rozhodování o lokalitě nového jaderného zdroje byla lokalita Temelína, jako případ už jednou schválené lokality, výhodnou volbou.

Dostavba ETE, vlastněné společností ČEZ, je dnes ve fázi úspěšných absolvování schvalovacích procesů. Dalším krokem je volba vhodného dodavatele technologie. Adepti, kteří se do soutěže o postavení dvou bloků ETE přihlásili, budou probráni dále.

Společnost ČEZ předpokládá, že procesy jednání před podáním nabídek od dodavatelů bude ukončen ještě v roce 2010 a v témže roce uchazeči představí své přesné nabídky. Během roku 2011 by měly probíhat projednávání nabídek a v první polovině roku 2012 bude vybrán vítěz soutěže. Zahájení samotné stavby se plánuje v roce 2013. První blok by měl být dokončen a spuštěn v roce 2020.

Při výběru vhodných kandidátů pro dostavbu ETE byly společností ČEZ zadány přesné požadavky. V projektu dostavby jsou požadovány dva tlakovodní bloky, kvůli světové rozšířenosti tohoto typu reaktoru, také kvůli zkušenostem s tlakovodním reaktorem v ČR. Každá jednotka má mít minimální výkon 1000 MW, životnost vyšší 60let s licencí schválenou v zemi původu i legislativou ČR. Bezpečnostní požadavky byly kladeny na ochranu do hloubky se čtyřmi až pěti bariérami, ochranami proti lidské chybě, vysokou spolehlivostí ochrany, či odolností proti zemětřesení [6]. Do užšího výběru společnosti ČEZ postoupily následující projekty, všechny patřící do vývojových generací III+.

#### 4.2.1.1 Projekt AP1000

Projekt AP1000 (Advanced Project) je projektem americké společnosti Westinghouse. Díky sofistikovanému dělení stavby na větší a menší moduly, dochází k možnosti provádění více kroků paralelně, a tím ke zkrácení doby realizace a také snížení nákladů na realizaci projektu. Projekt je rozdělen do asi 50 větších a 250 menších modulů. Díky rozdělení celé technologie na menší moduly je lepší i dopravitelnost celé technologie na místo stavby. V projektu je znát důraz na co největší zjednodušení celé technologie, což má za následky zlevnění nejen výstavby, ale i nákladů na provoz a údržbu. V projektu jsou aplikované pokročilé pasivní prvky bezpečnosti. Mezi ně patří systém odvodu zbytkového tepla, systém chlazení kontejnmentu, nebo systém vstřikování bóru. Autor projektu udává, že reaktor je díky nim i bez jakéhokoliv zdroje elektřiny a zásahu obsluhujícího personálu schopen se sám vychlazovat. Namísto elektrické energie potřebné pro pohon čerpadel jsou hnacími silami síly

přírodní, jako gravitace, přirozená cirkulace, nebo energie akumulovaná v podobě stlačeného plynu.

Zajímavým prvkem pasivní bezpečnosti u projektu AP1000 je například systém dvouplášťového kontejnmentu. Vnitřní kontejnment je ocelová tlaková nádoba o průměru 39,6 metrů a tloušťce stěny 4,44 cm. Tato nádoba je bariérou proti úniku radioaktivity do okolí. Maximální únik je dán 0,1 hmotnosti vzdušiny uvnitř kontejnmentu za den. Venkovní plášť je postaven z vyztuženého železobetonu. Vnitřní průměr této stavby je 43 metrů, tloušťka stěny je 0,9 metrů. Horní část vnějšího kontejnmentu má konický tvar, je v ní umístěn zásobník vody. Díky přirozené cirkulaci v dutině vzniklé mezi vnitřním ocelovým a vnějším betonovým pláštěm kontinuálně proudí vzduch. Tímto způsobem je kontejnment neustále chlazen. V případě rychlého vzrůstu tlaku a tím i nárůstu teploty uvnitř ocelového kontejnmentu je nad ním umístěn zásobník, ze kterého v případě nutnosti rychlého ochlazení vytéká voda přímo na ocelový kontejnment. Uvnitř ocelového kontejnmentu je i soustava nádrží s borovanou vodou, kterou je možno použít k dochlazování reaktoru. Velkým kladem projektu AP1000 je vysoká seismická odolnost.

Projekt AP1000 je projektem s reaktorem GEN III+, který získal osvědčení od organizace Nuclear Regulatory Commission (NRC), což je dozorný orgán nad jadernou energií v USA, stejně jako SUJB v ČR.

Elektrárny s reaktorem AP1000 jsou v současné době ve výstavbě v Číně v lokalitách Sanmen a Haiyang, a to v počtu čtyřech bloků s předpokládaným dokončením do roku 2013. Další výstavba je plánovaná v Číně, USA a ve Velké Británii. Některé vybrané charakteristiky jsou uvedeny v Tab. 7.

Tab. 7 Vybrané charakteristiky projektu AP1000 [6]

| AP 1000                        |   |
|--------------------------------|---|
| Výkon (tepelný/elektrický)[MW] | 3415/1117   |
| Počet chladicích smyček        | 2   |
| Parogenerátory                 | vertikální, 2ks                                     |
| Palivo                         | max. 4,95 % obohacený UO <sub>2</sub> , možnost MOX |
| Výměna paliva                  | 20dní při 18ti měsíčním cyklu                       |
| Disponibilita bloku            | minimálně 93 %                                      |
| Celková účinnost výroby EE     | ~33%  |
| Projektová životnost           | 60let   |

Disponibilita, neboli faktor způsobilosti bloku, je provozní ukazatel bloku JE. Udává jakou část z určitého časového intervalu (např. jeden rok) je výrobní blok v provozu. Jde z něj tedy určit, jakou část roku trvají plánované i neplánované odstávky.

#### 4.2.1.2 Projekt EPR 1600

Projekt EPR je dílem francouzské společnosti Areva. Je řazený do vývojové generace GEN III+. Jedná se projekt elektrárny s tlakovodním reaktorem, který vznikl z bohatých

zkušeností provozovaných reaktorů západoevropských koncepcí, a to francouzského typu N4 a německého Konvoj.

Ochranná obálka u projektu EPR je dvouvrstvá. První, vnitřní, vrstva je z předepjatého betonu, druhá vrstva je železobetonová. Projekt EPR slibuje úsporu paliva, a tím i úsporu produkce radioaktivního odpadu až o 15 % proti konkurenčním jednotkám stejného výkonu. Díky použití vyhořívacích elementů z absorbátoru neutronů dochází i k plynulejšímu vyhořívání paliva. V tomto případě je použito gadolinium  $Gd_2O_3$ . Důležitým krokem v projektovém přístupu je zařazení havárie s tavením aktivní zóny mezi předpokládané projektové havárie. Roztavená aktivní zóna spolu s roztaveným dnem tlakové nádoby, tzv. korium, je podle projektu odvedena mimo šachtu reaktoru do záchytné nádrže. Dno této nádrže je následně chlazeno pomocí cirkulačního systému s vodou.

Projekt EPR se již realizuje v Olkiluoto ve Finsku, Flamanville ve Francii, a dvakrát v Taishanu v Číně. Několik vybraných charakteristik je uvedeno v Tab. 8

Tab. 8 Charakteristika projektu EPR 1600 [6]

| <b>EPR 1600</b>                |   |
|--------------------------------|---|
| Výkon (tepelný/elektrický)[MW] | 4500/1600                               |
| Počet chladících smyček        | 4                                       |
| Parogenerátory                 | vertikální, 4ks                         |
| Palivo                         | obohacený uran, možnost 50% využití MOX |
| Výměna paliva                  | 11 až 17dní při 12 až 24 měsíčním cyklu |
| Disponibilita bloku            | ~92%                                    |
| Celková účinnost výroby EE     | ~36%                                    |
| Projektová životnost           | 60let                                   |

#### 4.2.1.3 Projekt MIR-1200

Projekt MIR-1200 (Modernized International Reactor) je produktem ruských společností Atomstroyexport a Hidropress. Je to projekt odvozený od reaktoru VVER 1000, které jsou již v ETE provozovány. Společnost Atomstroyexport má s projektováním tlakovodních reaktorů obrovské zkušenosti: Všechny tehdy československé elektrárny na území ČR byly budovány podle projektových podkladů těchto ruských společností.

Jedná se o projekt kombinující aktivní i pasivní bezpečnostní prvky. Důležitým bezpečnostním prvkem je i zde systém pro zachycení roztavené aktivní zóny. Dalším pasivním prvkem pro zajištění bezpečnosti je systém pro vychlazení reaktoru přes parogenerátory, v době odstávky bloku.

Tento projekt se už ve světě realizuje, staví se v Novovoronežské a Leningradské elektrárně v Rusku. V menších výkonových provedeních byla ukončena výstavba v lokalitách Tianwan v Číně a Kudankulam v Indii. Vybrané charakteristiky jsou uvedeny v Tab. 9.

Tab. 9 Charakteristika projektu MIR-1200 [6]

| MIR 1200                       |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Výkon (tepelný/elektrický)[MW] | 3300/1113                      |
| Počet chladících smyček        | 4                              |
| Parogenerátory                 | horizontální, 4ks              |
| Palivo                         | obohacený uran, možnost MOX    |
| Výměna paliva                  | 20dní při 12-20 měsíčním cyklu |
| Disponibilita bloku            | ~92%                           |
| Celková účinnost výroby EE     | ~33%                           |
| Projektová životnost           | 60let                          |

#### 4.2.2 Dostavba 3. a 4. bloku JE Mochovce

Stejně jako v původním projektu pro ETE, tak i počáteční projekt pro elektrárnu Mochovce (EMO) počítal s výstavbou čtyř bloků.

Z finančních důvodů se však na začátku devadesátých let rozhodlo o dostavení prvních dvou bloků. Práce tak pokračovaly pouze na 1. a 2. bloku. Do té doby vystavěná zařízení na blocích 3 a 4 byla zakonzervována a bloky zůstaly nedostavěny. První a druhý blok byly uvedeny do provozu v letech 1998 a 2000. Jednání o dostavbě dvou bloků se rozběhla až po odkoupení Slovenských elektráren italskou státní společností Enel. Plán dostavby byl zveřejněn v roce 2007, v červnu roku 2009 byly podepsány smlouvy s dodavateli a zahájeny práce. Uvedení do komerčního provozu se plánuje na rok 2013 u 3. bloku, u 4. bloku o rok později. Životnost těchto dvou bloků je stanovena na dobu 40 let [13].

V prvních dvou již provozovaných blocích jsou použity reaktory VVER 440 typ 213, tedy stejně, jaké jsou použity v české EDU. Po modernizaci prvních dvou bloků EMO už jejich výkon není 440 MW, ale 470 MW. Před zastavením výstavby 3. a 4. bloku EMO byla už ve stavební konstrukci instalována tlaková nádoba reaktoru pro reaktor typu VVER 440 a některé další konstrukční prvky bloku. Z tohoto důvodu se při dostavbě EMO neuvažovalo o jiném typu reaktoru. Při dostavbě bude projekt zmodernizován podle posledních požadavků na jadernou bezpečnost. Oproti původnímu projektu budou použity nejnovější digitální systémy kontroly a řízení, vylepšení seismické odolnosti bloků, zvýšení kvality systémů požární ochrany a další aplikování provozních zkušeností získaných při dlouholetém provozu elektráren stejného typu. Kontroly Úradu jadrového dozoru Slovenskej republiky potvrzují, že i když je původní projekt již několik desítek let starý, po modernizaci plní a v některých ohledech i překračuje mezinárodní bezpečnostní požadavky.

#### 4.2.3 Dostavba JE Bohunice

V lokalitě Jaslovské Bohunice se v současnosti nacházejí tři jaderné bloky, jsou to A1, V1 a V2, každý po dvou reaktorech. Těžkovodní elektrárna A1 je od roku 1977 odstavena, odstaven byl první i druhý blok elektrárny V1 [13].

Spolu s růstem hospodářství a postupným uzavíráním výrobních bloků (V1 v EBO, elektrárna Vojany) začala být SR energeticky závislou na okolních státech. Proto i Slovenská

republika začala provádět kroky ke zpětnému získání energetické samostatnosti, k nimž patří i plánování výstavby nových jaderných zdrojů. Nové dva bloky, EMO 3 a 4, se spustí, jak již bylo řečeno, v letech 2013 a 2014. V současné době jsou ve SR tedy v provozu čtyři jaderné bloky. Přehled provozovaných jaderných bloků je v Tab. 10.

Co se týče instalovaného výkonu zdrojů elektrické energie, zastoupení jaderných elektráren je třetinové, tedy kolem 30 %. Avšak z hlediska množství vyrobené elektrické energie připadlo např. v roce 2007 na JE téměř 60% z celkově vyrobené elektřiny [13].

Tab. 10 Provozované jaderné bloky v SR [13]

| Elektrárna          | uvedení do provozu | Projektový výkon [MW]   |
|---------------------|--------------------|-------------------------|
| Bohunice V2-3.blok  | 1984               | 440                     |
| Bohunice V2-4.blok  | 1985               | 440                     |
| Mochovce EMO-1.blok | 1998               | 470<br>(po modernizaci) |
| Mochovce EMO-2.blok | 1999               | 470<br>(po modernizaci) |

Volba postavit novou jadernou elektrárnu v lokalitě Jaslovských Bohunic je výhodná. Stejně jako u ETE, lze zde využít stávající infrastrukturu a zkušenosti s výstavbou jaderných zdrojů, dostatečný zdroj vody (řeka Váh, vodní dílo Slňava) a dalších výhod plynoucích z dlouhé tradice jaderné energetiky v této oblasti. Projekt výstavby nových bloků v JE Bohunice je zatím stále ve fázi přípravných prací. O výstavbě nových bloků v EBO se začalo hovořit v roce 2008. Optimistické odhady hovoří o začátku výstavby v roce 2014.

Při výběru projektu nového jaderného zdroje (NJZ) se dá očekávat výběr z tlakovodních reaktorů z třetí vývojové generace, s instalovaným elektrickým výkonem 600 až 1600 MW. Mezi očekávanými projekty se objevují stejné projekty jako pro dostavbu JE Temelín. Navíc se uvažuje o dvou projektech s výkony 600 MW. Jsou to projekty AP 600 a VVER 640. Projekt AP 600 je dílem americké společnosti Westinghouse. Jedná se o téměř totožný koncept jako výše popisovaný AP 1000, jen s rozdílem menšího výkonu. AP 600 však doposud nebyl nikde realizován.

Projekt VVER 640 s reaktorem V-407 byl vyvinutý na základě zkušeností s provozem bloků VVER440 a VVER 1000. Jedná se o společné dílo ruských společností Atomenergoprojekt, OKB Gidropress a německé Siemens KWU. Tento projekt však zatím není licencovaný pro EU a nebyl prozatím nikde zrealizován. Vybrané technické parametry jsou uvedeny v Tab. 11. V projektu VVER 640 je pro zajištění vyšší bezpečnosti zvýšen objem chladiva v primárním okruhu a využito prvků pasivní bezpečnosti, jako např. systém nouzového odvodu tepla z PG, soustava nádrží s vodou pro chlazení aktivní zóny, nebo systém havarijního doplňování primárního okruhu [13].

Tab. 11 Charakteristika projektu VVER 640 [13]

| <b>VVER 640</b>                       |                         |
|---------------------------------------|-------------------------|
| Výkon (tepelný/elektrický)[MW]        | 1800/645                |
| Počet chladících smyček               | 4                       |
| Parogenerátory                        | horizontální, 4ks       |
| Palivo                                | obohacený uran až na 5% |
| Střední tlak v primárním okruhu [MPa] | 15,7                    |
| Disponibilita bloku                   | ~92%                    |
| Celková účinnost výroby EE            | 33,3%                   |
| Projektová životnost                  | 60let                   |

### 4.3 Možnosti dalšího využití jaderné energetiky

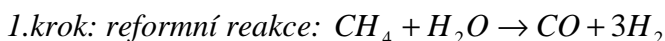
#### 4.3.1 Využití ve vodíkové energetice a průmyslových procesech

Při uvažování o využití jaderné energie jiným způsobem, než k výrobě elektrické energie se nabízí například propojení jaderné energetiky s vodíkovou. Vodík není klasické palivo, jako takový se samotně nikde neobjevuje. Vodík tak není přímo využitelný k produkci primární energie, aby se tak stalo, musí projít energeticky náročnou procedurou. Dá se říci, že vodíková energetika je jednou z těch nejčistších. Její nevýhodou však je, že pro výrobu vodíku ve využitelné formě je třeba buď elektřiny, nebo vysokopotenciálního tepla. Uplatnění vodíku se očekává nejvíce v dopravě. Nahrazení klasických spalovacích motorů vodíkovými technologiemi slibuje velkou úsporu v produkci oxidu uhličitého. Další uvažované aplikace vodíku jsou záložní zdroje elektrické energie, zdroje elektřiny pro mobilní zařízení, nebo jako palivo pro kogenerační jednotky.

##### 4.3.1.1 Výroba vodíku

Existuje mnoho způsobů, jak lze vyrobit vodík. V celosvětové průmyslové produkci vodíku je na prvním místě výroba z fosilních paliv, metodou tzv. parního reformingu.

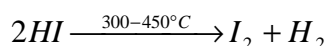
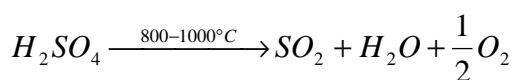
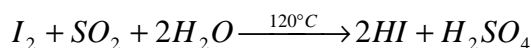
a) Metoda parního reformingu vychází z následujících rovnic:



V prvním kroku se za přítomnosti katalyzátoru do vodní páry (500 – 950 °C, 0,3 - 2,5 MPa) přivádí metan, tedy hlavní složka zemního plynu. Směs metanu a páry reaguje za vzniku vodíku a oxidu uhelnatého a menšího podílu oxidu uhličitého. Reakce probíhá za výše zmíněných teplot a tlaků v reforméru. Poté následuje navyšování množství produkovaného vodíku konverzí CO z reforméru s další přidanou párou [7]. Nevýhodou této metody je, že při ní vzniká velké množství oxidu uhličitého.

b) Další, velice známou metodou, je elektrolýza. Zdrojem energie pro proces elektrolýzy je elektřina, což je díky její vysoké ceně ekonomickou nevýhodou. Použití této metody je výhodné tam, kde je dostatek vody a možnost výroby levné elektřiny. Dobrým příkladem takové lokality je například Island se svou geotermální energií. Účinnost elektrolýzy je 80-90 %, ovšem při účinnosti výroby elektrické energie na úrovni 30 % je účinnost celého procesu jen 25 až 30 %.

c) Metodou, se kterou se do budoucna počítá jako se spojovacím článkem mezi jadernou a vodíkovou energetikou, je tzv. termochemický S-I cyklus. Při termochemickém štěpení vody je voda rozdělena na kyslík a vodík pomocí řady chemických reakcí, které jsou vyvolané dodanou tepelnou energií. S-I cyklus můžeme popsat rovnicemi ve třech krocích:

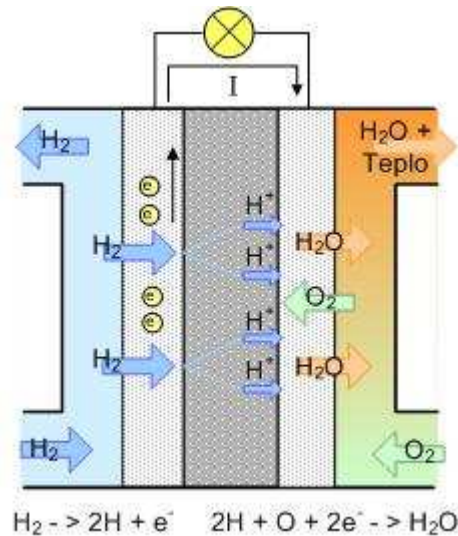


V prvním kroku reaguje vstupující voda s jódem a oxidem siřičitým za vzniku kyseliny sírové a jodovodíkové. Jedná se o exotermickou reakci, kdy se z reakce odvádí teplo o teplotě 120 °C. Nejvyšší teploty, 800 až 1000 °C, vyžaduje endotermický rozklad kyseliny sírové. Rozklad kyseliny jodovodíkové a současná produkce vodíku vyžaduje teploty nižší (450 °C). Výhodou výroby vodíku termochemickou metodou je vysoká účinnost pohybující se v rozmezí 40-50 %. Přitom platí úměra, čím vyšší je přiváděná teplota, tím je vyšší celková účinnost [7].

#### 4.3.1.2 Zpětná přeměna vodíku na elektrickou energii

Vyrobený vodík lze zpětně použít pro výrobu elektřiny díky palivovým článkům. Výrobu vodíku tedy můžeme chápat jako určitou akumulaci energie, ovšem s velkými ztrátami. Princip palivového článku je znázorněn na Obr. 11.

Palivový článek se skládá ze dvou elektrod, na jejichž povrchu se nachází slabá vrstva uhlíku obsahující malé množství platiny sloužící zde jako katalyzátor. Elektrody jsou od sebe odděleny tenkou polymerní membránou, která propouští kladně nabitě ionty - protony (u katexové membrány). Vodík je přiváděn na anodu, kde na vrstvě katalyzátoru dochází k jeho disociaci na kladné ionty (protony) a elektrony. Protony procházejí skrze polymerní vrstvu, elektrony jsou nuceny procházet externím okruhem a mohou tedy v podobě elektrické energie konat práci. Na katodě pak sloučením dvou kladně nabitých vodíkových iontů (protonů), dvou elektronů a atomu kyslíku vzniká voda (vzhledem k provozní teplotě palivového článku obvykle v podobě páry). Na stranu katody je přiváděn čistý kyslík nebo častěji kyslík jako součást vzduchu [7]. Účinnosti vodíkových palivových článků jsou 35 až 50 %, podle použitého typu a zatížení [7],[8],[10].



Obr. 11 Princip výroby elektřiny v palivovém článku [7]

### 4.3.2 Mobilní jaderná elektrárna

První myšlenky o mobilní jaderné elektrárně vznikly už v sedmdesátých letech minulého století v americké společnosti Westinghouse. Název projektu byl Floating Nuclear Power Plant (FNPP), uvažovalo se tedy o elektrárně pohyblivé po vodě. Projekt však nebyl nikdy uskutečněn z finančních a politických důvodů. V minulosti uskutečněný projekt tohoto typu byl vojenský projekt s označením MH-1A. Jednalo se jaderný reaktor osazený do lodi s výkonem 10 MW, který dodával elektrickou energii v Panamském zálivu, Obr. 12.



Obr. 12 Mobilní JE MH-1A [8]

V minulosti vznikaly tzv. mobilní JE také v Rusku. Jednalo se o plavidla, které byly osazené reaktory chlazenými slitinou olova a bizmutu z ruských ponorek. Tyto pak byly zakotveny na pobřežích Ruska a používány pro tzv. ostrovní výrobu EE.

Dalším podobným ruským projektem, který je dnes ve fázi výstavby v Petrohradě, je projekt ruské národní společnosti Rosatom. Tato společnost má již dlouholeté bohaté zkušenosti s plavidly s jaderným pohonem. Projekt s názvem Akademik Lomonosov (Obr. 13) je již od dubna roku 2007 ve výstavbě, dokončení prototypu se očekává v roce 2011. Bude mít podobu plavidla o délce 144 metrů a šířce 30 metrů bez vlastního pohonu. Jedinou možností, jak s elektrárnou pohybovat bude použití vlečných lodí. Obslužný personál bude tvořit 69 lidí.



Toto zařízení bude osazeno dvěma tlakovodními reaktory typu KLT-40S využívající obohacené oxidické palivo o U235, které jsou modifikací již používaných reaktorů na ledoborcích. Ty budou mít společný výkon 70 MW, nebo 300 MW. Mobilní JE bude možné používat i pro odsolování mořské vody, v tom případě bude výkon jednotky 240 000 m<sup>3</sup> odsolené vody denně. Projektová životnost reaktoru bude 40 let, přičemž každé zhruba tři roky bude měněno palivo, každých dvanáct let pak bude muset být provedena generální oprava. Pro tyto operace bude muset být plavidlo odtaženo do výrobního závodu [8].



Obr. 13 Projekt mobilní JE Akademik Lomonosov [8]

Zájem o projekt Akademik Lomonosov byl projeven v rozvojových oblastech s hustým osídlením, avšak daleko od centralizovaných zdrojů elektrické energie. Jedná se o oblasti v Indonésii, Číně, nebo oblasti na severu Ruska (Kamčatka, Jamal), které se neustále potýkají s nedostatečnou dodávkou elektřiny. Počítá se však s tím, že mobilní elektrárna bude neustále ve vlastnictví ruského výrobce, který bude zajišťovat výměny paliva a veškeré opravy. Nevýhodou tohoto projektu je nynější obrovská cena, přesahující 300 miliónů USD.

Další možností jak uspokojit potřebu energie v rozvojových oblastech jsou reaktory souhrnně označovaných jako Small and Modular nuclear power Reactors (SMRs). Jsou to vlastně reaktory malých výkonů, v porovnání s klasickými jadernými zdroji energie s mnohem menšími požadavky na prostor.

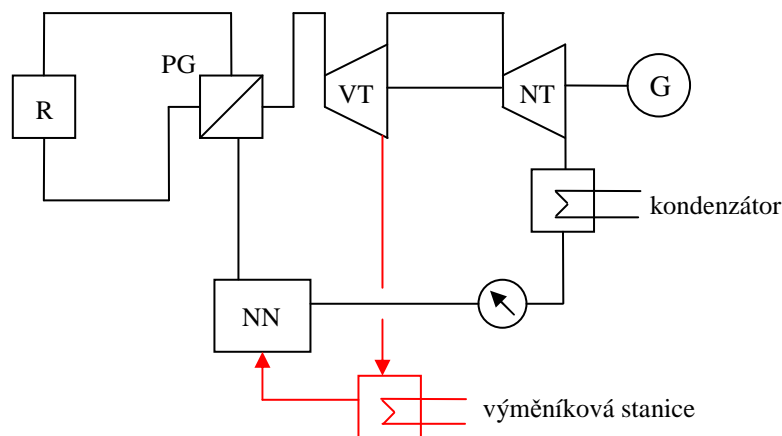
Jedním z takovýchto projektů je americký The Hyperion Power Module (HPM) společnosti Hyperion Power. Jedná se o reaktor chlazený slitinou olova a bizmutu s tepelným výkonem 70 MW, produkovaný elektrický výkon je 25 MW. Zajímavé jsou velice kompaktní rozměry samotného reaktoru, a to průměr 1,5 metru a výška 2,5 metru. Z toho vyplývá velká výhoda oproti rozměrným zařízením pro klasickou jadernou elektrárnu při transportu na místo použití. Reaktor by měl být ukrytý spolu se skupinou parogenerátorů v podzemí, zbytek zařízení (sekundární okruh) bude stát nad zemí. Reaktor bude zapečetěný v ocelovém kontejnmentu, palivo by mělo být měněno pouze u výrobce, ne v místě používání reaktoru. Interval mezi výměnou paliva má být 7 až 10 let. Pro zajištění takto dlouhého intervalu se počítá s nitridickým palivem s vysokým obohacením izotopu U235 až na 20 %. Regulace výkonu budou obstarávat automaticky řízené regulační tyče. Bezpečnost bude zajištěna aktivními i pasivními prvky. Očekávaná cena této výrobní jednotky je 50 miliónů USD [9].

### 4.3.3 Využití JE pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla

Dalším možností využití energie z jaderné energetiky je využívání přímo tepelné energie pro vytápění. V ČR se jaderného zdroje pro vytápění nevyužívá na žádné z obou provozovaných jaderných elektráren. V minulosti byl řešen projekt využití tepla z EDU pro vytápění některých částí města Brna a míst podél potenciálního horkovodu. V projektu se předpokládalo s použitím horkovodu o délce 43 km.

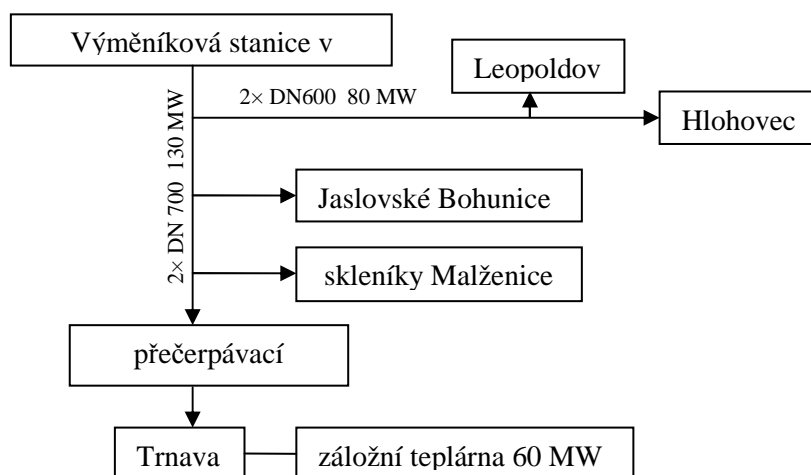
Na území EDU však nemůže být zbudována samostatná výměňková stanice, dále z prostorových důvodů není možné vyvést ze strojovny velká potrubí pro odběr páry [11]. Nevýhodnou byla i vyšší nadmořská výška EDU oproti městu Brnu. Tím se vyloučila možnost využití systému přirozené cirkulace, díky které by se zmenšily náklady na provoz o energii pro pohon čerpadel.

Teplo z jaderné elektrárny se pro vytápění využívá například ve slovenské JE v Jaslovských Bohunicích (EBO). Teplo z výrobního bloku V2, tedy 3. a 4. bloku elektrárny, se z EBO odebírá už od roku 1987. Odběr páry o tlaku 0,41 MPa se provádí z vysokotlaké turbíny a z převáděcího potrubí mezi vysokotlakou a nízkotlakou turbínou, Obr. 14. Potrubím je tak pára vedena do výměňkové stanice s výkonem 240 MW, která je přímo v areálu elektrárny. Z výměňkové stanice jde zpět do napájecích nádrží kondenzát.



Obr. 14 Schéma odběru páry pro vytápění [11]

Z výměňkové stanice v EBO se teplo dále přenáší prostřednictvím zdvojeného horkovodu DN 700 až do přečerpávací stanice u města Trnava. Od roku 1997 se pomocí zbudované odbočky DN 600 od potrubí hlavního horkovodu začalo využívat vytápění v městech Leopoldov a Hlohovec. Na horkovod z JEBO je připojena i obec Jaslovské Bohunice, tepla z horkovodu se užívá i v několikahektarovém skleníkovém hospodářství v Malženicích. Odběr tepla během roku samozřejmě záleží na venkovní teplotě. Například při venkovní teplotě -12 °C je odběr z trnavské větve 144 až 168 MW a do větve Leopoldova a Hlohovce 36 až 46 MW [12]. Celý systém využívání tepla z JEBO je schématicky zobrazen na Obr. 15. Systém centralizovaného zásobování teplem (CZT) z JEBO má i ekonomické výhody. Oproti ostatním systémům CZT ve Slovenské republice jsou ceny o 20 až 50 % nižší.



Obr. 15 Systém dodávky tepla z EBO [12]

## 5 POROVNÁNÍ JE S OSTATNÍMI PRODUCENTY ELEKTRICKÉ ENERGIE (VLASTNÍ NÁZOR AUTORA)

Při porovnávání jaderného zdroje energie s ostatními je nejjednodušší cestou stanovení ukazatelů a kritérií, ve kterých chceme zdroje energií porovnávat. V této kapitole autor práce provádí porovnání ekonomických ukazatelů, výkonových parametrů, nároků na zastavěný prostor, vlivů na životní prostředí a bezpečnostních ukazatelů. Autor v této kapitole porovnává dle výše uvedených kritérií jadernou elektrárnu s elektrárnami uhelnými (UE), paroplynovými (PPE), fotovoltaickými (FVE), větrnými (VTE), vodními (VE) a technologií na energetické využití spalování biomasy (ESB).

### 5.1 Doba výstavby

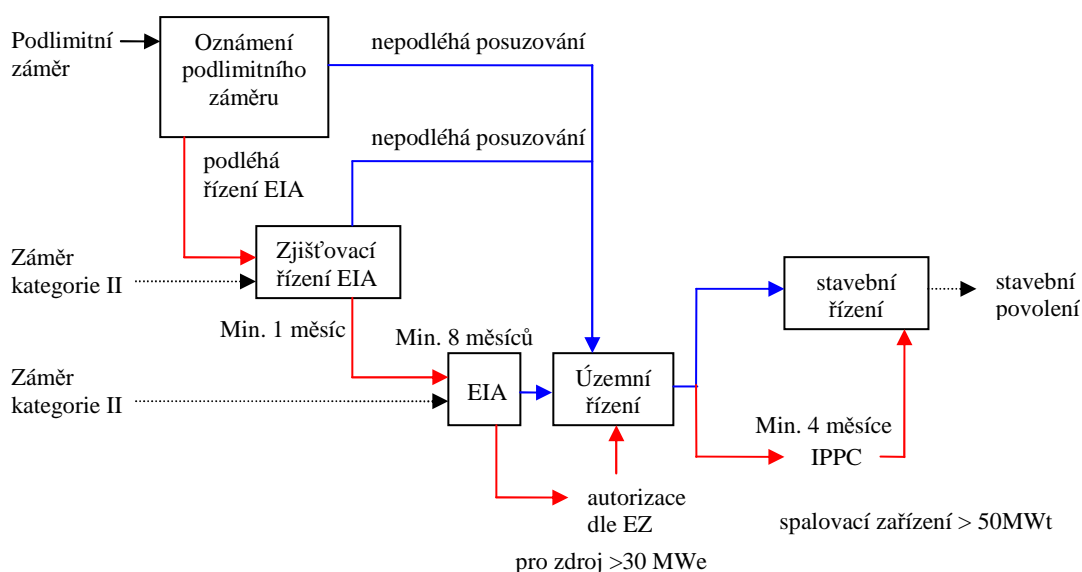
Dobu potřebnou pro výstavbu nového energetického zdroje lze rozdělit na dvě etapy, a to etapu veřejnoprávního schvalovacího řízení a etapu samotné výstavby. Doba výstavby je přímo úměrná velikosti a složitosti konstrukce daného zařízení. Veškeré stavby energetických zařízení podléhají veřejnoprávnímu schvalování. Etapy legislativního procesu jsou následující:

- a) územní plánování
- b) posouzení vlivu na životní prostředí (EIA)
- c) autorizace
- d) územní řízení
- e) integrované povolení (IPPE), stavební povolení

V Obr. 16 je proces schvalování znázorněn schematicky. V obrázku jsou uvedeny i minimální potřebné doby pro provedení naznačených úkonů. Energetické stavby jsou posuzovány s ohledem na vliv na životní prostředí (EIA), podle zákona č. 100/2001 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí. Při posuzování jsou záměry staveb rozděleny do třech kategorií.

Do tzv. záměru kategorie I patří JE, UE a PPE. Záměry spadající do kategorie II jsou z námi posuzovaných zařízení VE, ESB a VTE. Fotovoltaické elektrárny posuzovacímu procesu EIA nepodléhají.

Energetickým zařízením musí být uděleno i tzv. integrované povolení podle zákona č. 76/2002 Sb. o integrované prevenci a omezení znečištění. Úkolem tohoto zákona je upřednostňovat nejlepší dostupné technologie pro zajištění maximálního využití surovin a minimalizace energetické náročnosti energetických provozů.



Obr. 16 Schématické znázornění veřejnoprávního schvalování energetických staveb [2]

Jaderná elektrárna je při porovnání doby výstavby jednoznačně nejnáročnější, tedy z tohoto hlediska nejméně výhodnou. Autor prezentuje na základě informací z [2], že doba výstavby včetně procesů schvalování je u JE řádově 14 let, z čeho 7 let trvá schvalování a 7 let výstavba (7+7). U uhelné elektrárny je tato doba 7 let (3+4), u ESB asi 5let (3+2) u PPE je to 5 let (3+2). Pro malé vodní elektrárny (výkony do 1 MW) je to doba 4 let (1,5+2,5). U větrných, díky relativně jednoduché stavbě je tato doba 2 roky (20+4 měsíce) [2],[15].

## 5.2 Výkonové ukazatele, roční doba využití

Porovnávání výroby EE jsou prováděny vždy v určitých výkonových relacích. Výkonové parametry výroby EE jsou závislé např. na potřebě daných technologií na zastavěný prostor, velikostí zdrojů paliva pro danou technologii v dané lokalitě, na nárocích na spotřebu EE a na dalších parametrech. Autor uvádí příklady výkonů výrobních jednotek EE v Tab. 12.

Při porovnání výkonů výrobních jednotek autor usuzuje o oblasti jejich použití. Elektrárny velkých výkonů (JE, velké UE), jsou většinou méně regulovatelné. Vyrábí EE pro pokrytí stálé, v průběhu dne neměnné, spotřeby energie. Tato skutečnost se odráží v jejich roční době využití. Pro JE se tato doba vyjadřuje pomocí tzv. parametru EAF (Energy Availability Factor). Ten vyjadřuje část roku, po kterou je reaktor v provozu, v procentech. Např. pro první blok EDU byla pro rok 2009 tato hodnota 83,03 %, což představuje 7273 hodin ročně. Řádově stejnou dobu ročního využití mají i uhelné elektrárny. Autor tyto zdroje EE označuje jako zdroje pro pokrytí základní spotřeby EE.

Menší UE, velké průtočné vodní elektrárny spolu s některými paroplynovými, které jsou lépe regulovatelné, lze je označit za tzv. pološpičkový zdroj. Ty pokrývají denní spotřebu EE. Jejich roční doba využití je 4500 až 5000 hodin ročně.

PPE, VE akumulární a VPE pokrývají tzv. špičkovou spotřebu energie. Tyto elektrárny fungují v tzv. dispečerské záloze pro přenosovou soustavu. Jsou v provozu jen několik hodin denně v době největších, časově krátkých, odběrů. Jejich roční doba využití je udávána na 1500 hodin.

Autor upozorňuje na fakt, že u obnovitelných zdrojů jsou hlavní veličinou ovlivňující jejich výkon a roční využití okamžité povětrnostní podmínky. Větrné elektrárny pracují jen v určitém

intervalu rychlosti větru. Minimální rychlost větru, kdy jsou VE spuštěny, je průměrně 3 m/s, optimální rychlost pro výrobu EE je u většiny VE 12 m/s. Při překročení maximální bezpečné rychlosti, což je většinou 25 m/s, pak jsou VE odstaveny. V tomto provozu pracují VE 2000 až 2500 hodin ročně. U FVE je limitujícím prvkem doba denního slunečního svitu. FVE elektrárny nejsou schopny produkovat stejné množství EE v průběhu celého roku, kvůli proměnné intenzitě slunečního svitu a proměnné délce dne v průběhu roku. Za takových podmínek pracují FVE řádově 1000 až 1500 hodin ročně.

Energetické využívání biomasy (ESB) je podle autora poměrně nová technologie. Biomasa se spaluje ve fluidních, nebo roštových kotlích. V ČR je nejvíce využívána lokálně k vytápění, nebo kombinované výrobě elektřiny a tepla (KVET) ve výkonových relacích uvedených v Tab. 12.

Tab. 12: Výkonové relace výrobních jednotek EE

| zdroj EE   | obvyklé výkony           | příklad   |
|------------|--------------------------|---|
| <b>JE</b>  | stovky až tisíce MW      | EDU: 4x 440 MW,<br>ETE: 2x 1000 MW  |
| <b>UE</b>  | stovky MW                | EPC: 5x 200 MW;<br>EME: 4x 110 MW + 1x 500 MW                                     |
| <b>PPE</b> | desítky až stovky MW     | Připravovaná EPC: 1x 880 MW<br>Červený mlýn BRNO: 95 MW                           |
| <b>FVE</b> | jednotky MW              | FVE Hrušovany nad Jeviškovkou: 3,73 MW<br>FVE Roudnice nad labem: 2,5 MW          |
| <b>VTE</b> | stovky kW až jednotky MW | VTE Veselí: 2x 2 MW<br>VTE Hostýn 225 kW  |
| <b>ESB</b> | stovky kW až desítky MW  | Teplárna Krnov, kotel K6: 35 MW<br>Teplárna Brno Bystrc: 1,1 MW a 1,5 MW          |
| <b>VE</b>  | jednotky až stovky MW    | VE Praha-Trója: 1 MW<br>VE Brno-Kníničky: 3,1 MW, VPE<br>Dlouhé stráně: 2x 325 MW |

### 5.3 Investiční náklady

Za jeden z nejdůležitějších parametrů při výběru zdroje EE označuje autor investiční náklady. Pomocí následujících výpočtů autor práce orientačně určuje investice  $I$  vztažené na jednotku instalovaného výkonu potřebné pro výstavbu jednotlivých zdrojů EE. Vypočtené hodnoty jsou graficky znázorněny a porovnány v Obr. 17.

#### a) Jaderná elektrárna (JE Temelín)

$$\text{investice: } 100 \cdot 10^9 \text{ Kč, výkon: } 2x \text{ } 1000 \text{ MW} \rightarrow I = \frac{100 \cdot 10^9}{2 \cdot 1000 \cdot 10^3} = 50\,000 \frac{\text{Kč}}{\text{kW}}$$

**b) Větrná elektrárna (Mikulášovice, Ústecký kraj)**

$$\text{investice: } 170 \cdot 10^6 \text{ Kč, výkon: } 2 \times 2 \text{ MW} \rightarrow I = \frac{170 \cdot 10^6}{2 \cdot 2 \cdot 10^3} = 42\,500 \frac{\text{Kč}}{\text{kW}}$$

**c) FVE (Roudnice n. Labem I, II)**

$$\text{I: investice: } 340 \cdot 10^6 \text{ Kč, výkon: } 2,5 \text{ MW} \rightarrow I = \frac{340 \cdot 10^6}{2,5 \cdot 10^3} = 136\,000 \frac{\text{Kč}}{\text{kW}}$$

$$\text{II: investice: } 580 \cdot 10^6 \text{ Kč, výkon: } 5 \text{ MW} \rightarrow I = \frac{580 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^3} = 116\,000 \frac{\text{Kč}}{\text{kW}}$$

**d) Vodní elektrárna (malá VE Morávka)**

$$\text{VE Morávka: investice: } 800 \cdot 10^3 \text{ Kč, výkon: } 18,5 \text{ kW} \rightarrow I = \frac{2 \cdot 10^6}{18,5} = 108\,000 \frac{\text{Kč}}{\text{kW}}$$

**e) PPE (připravované Mělník, Počeradý)**

$$\text{Mělník: investice: } 18,5 \cdot 10^9 \text{ Kč, výkon: } 800 \text{ MW} \rightarrow I = \frac{18,5 \cdot 10^9}{800 \cdot 10^3} = 23\,200 \frac{\text{Kč}}{\text{kW}}$$

$$\text{Počeradý: investice: } 20 \cdot 10^9 \text{ Kč, výkon: } 880 \text{ MW} \rightarrow I = \frac{20 \cdot 10^9}{880 \cdot 10^3} = 22\,700 \frac{\text{Kč}}{\text{kW}}$$

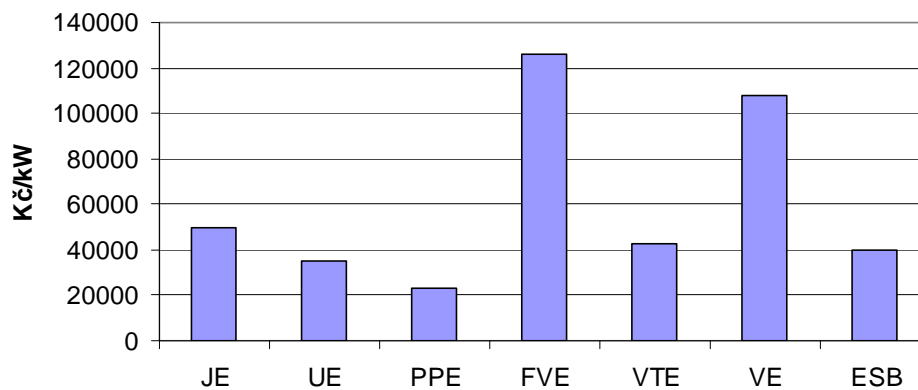
**f) Uhlerná elektrárna (připravovaná Ledvice, obnova Tušimice)**

$$\text{Ledvice: investice: } 26 \cdot 10^9 \text{ Kč, výkon: } 660 \text{ MW} \rightarrow I = \frac{26 \cdot 10^9}{660 \cdot 10^3} = 39\,500 \frac{\text{Kč}}{\text{kW}}$$

$$\text{Tušimice: investice: } 25 \cdot 10^9 \text{ Kč, výkon: } 4 \times 200 = 800 \text{ MW} \rightarrow I = \frac{25 \cdot 10^9}{800 \cdot 10^3} = 31\,250 \frac{\text{Kč}}{\text{kW}}$$

**g) ESB**

Technologie pro spalování biomasy jsou podobné s technologiemi používanými v UE. Z této skutečnosti autor usuzuje i o investičních nákladech na jednotku výkonu u ESB. Podle autora investiční náklady na technologie ESB značně ovlivňuje i druh spalované biomasy, především její chemické složení. U vlhčích paliv je třeba do investic zahrnout náklady na vybudování sušících zařízení. U paliv s vysokými obsahy agresivních látek (S, F, Cl) je třeba použít kvalitnějších materiálů a lepších zařízení pro čištění spalin. Autor se domnívá, že investiční náklady jsou u tohoto zdroje asi 35 000 až 50 000 Kč/kW instalovaného výkonu.



Obr. 17 Investiční náklady jednotlivých výroben EE

Z Obr. 17 je vidět, že měrné investiční náklady jsou u jednotlivých technologií výroby EE velice rozdílné. Ze zdrojů v ČR nejvíce používaných, tedy JE, UE a PPE, jsou nejvyšší investiční náklady u elektráren jaderných. Autor se domnívá, že je to dáno složitostí a velikostí tohoto zařízení, použitých konstrukčních dílů a potřebnou dobou pro výstavbu. Naproti tomu, investičně nejlevnějším zdrojem je PPE. Jako její nevýhodu však autor označuje spalování čistého a drahého paliva, tedy zemního plynu. Ten se navíc nezískává z domácích zásob, jeho dostatek tak může být nejistý.

Náklady spojené s výstavbou alternativních zdrojů energie jsou řádově vyšší. Naproti tomu po jejich spuštění mají nulové palivové náklady. Jejich provoz je tak ekonomicky velice výhodný. Podle autora se však s využitím těchto zdrojů nemůže počítat ve velkém měřítku. Pokud by byly používány pro pokrytí stálých a pravidelně se měnících spotřeb elektrické energie, musely by být zálohovány jiným zdrojem, např. PPE. Ten by v případě pracovní nepohotovosti alternativních zdrojů musel doplňovat chybějící výrobu EE. V takovém případě by samotné investiční náklady na instalovaný výkon v alternativních zdrojích vzrostl o investice na druhý, zálohový zdroj.

#### 5.4 Finanční náklady na výrobu EE

Finanční nároky na výrobu EE jednotlivých výrobců nejsou veřejně přístupné informace. Tyto údaje jsou obchodním tajemstvím každého výrobce elektrické energie. Autor podle svého odhadu uvádí náklady na vyrobení 1 MWh elektrické energie, viz. Tab. 13. Náklady na výrobu EE v OZE využívajících přírodních sil a jevů jsou nulové, nemají žádné palivové náklady. Autor však poukazuje na povinné vysoké výkupní ceny vyrobené energie z těchto zdrojů. Tyto ceny jsou podle [22] průměrně 2500 Kč/MWh u VTE, 13500 Kč/MWh u FVE a 3500 Kč/MWh VE. OZE jsou tak velice výhodné pro jejich provozovatele. Na vysokou cenu elektřiny z OZE tak doplácí každý odběratel EE připojený k elektrizační soustavě. Odběratelé totiž doplácí rozdíl mezi výkupní cenou EE z OZE a prodejní cenou EE přímým odběratelům.

Z tohoto autorova kritéria pro porovnání tak vychází jako nejvýhodnější zdroj schopný pokrýt spotřebu EE jednoznačně jaderná elektrárna.



Tab. 13 Výrobní náklady u vybraných zdrojů EE

| zdroj    | Kč/MWh    |
|----------|-----------|
| EBS      | 2000-3000 |
| PPE      | 2000-3000 |
| UE       | 1500      |
| JE (EDU) | 650       |
| JE (ETE) | 900-1000  |
| FVE      | 0         |
| VE       | 0         |
| VTE      | 0         |

## 5.5 Nároky na zastavěný prostor

Při plánování výstavby zdroje elektrické energie je důležité brát ohled na prostorovou náročnost daného zdroje. Na základě informací z [6] autor v Tab. 14 uvádí hodnoty plošných náročností u porovnávaných zdrojů EE.

Tab. 14 Porovnání plošné náročnosti vybraných zdrojů EE [6]

| Typ elektrárny | Plošná náročnost zdroje [kW/m <sup>2</sup> ] |
|----------------|--|
| JE             | 650  |
| UE             | 500  |
| PPE            | 600  |
| FVE            | 0,14   |
| VTE            | 7,8  |
| VE             | rozdílná podle typu                          |

Z porovnání zdrojů EE je vidět, že nejvíce používané výrobní elektrické energie jsou zároveň i zdroji nejkonzentrovanějšími. Toto velké využití plochy u UE, JE a PPE je dáno především koncentrovaností energie v palivech těchto elektráren, Tab. 15.

Tab. 15 Koncentrace energie ve vybraných palivech

| palivo                               | energie [MJ/kg] |
|--------------------------------------|-----------------|
| černé uhlí                           | 26              |
| hnědé uhlí                           | 15              |
| zemní plyn                           | 34              |
| jaderné palivo (nízkoobohacený uran) | $90 \cdot 10^6$ |

Ta je u UE a PPE dána výhřevností uhlí a zemního plynu, v případě JE je to energie uvolněná štěpením štěpitelného materiálu.

Na základě dat v Tab. 14 autor nabízí několik zajímavých porovnání. Pokud by se měl nahradit například jeden temelínský blok o výkonu 1000 MW fotovoltaickými elektrárnami, byla by potřeba plocha:

$$S = \frac{1000 \cdot 10^3}{0,14} = 7,15 \cdot 10^6 \text{ m}^2 = 7,2 \text{ km}^2$$

Při autorově úvaze o nahrazení celého instalovaného výkonu všech druhů elektráren v ČR, který je asi 17 750 MW, by plocha pouze solárních panelů bez obslužných ploch byla:

$$S = \frac{17750 \cdot 10^3}{0,14} = 126,785 \cdot 10^6 \text{ m}^2 = 126,79 \text{ km}^2$$

To je pro představu více než polovina území města Brna.

Dalším zajímavým porovnáním je náročnost na plochu pro vypěstování biomasy jako zdroje pro ESB. Pokud bychom chtěli provozovat zdroj ESB o výkonu 1000 MW, byla by potřebná plocha pro pěstování biomasy podle dat uvedených v Tab. 14:

$$S = \frac{1000 \cdot 10^3}{0,0002} = 5000 \cdot 10^6 \text{ m}^2 = 5000 \text{ km}^2$$

Tato plocha představuje rozlohu téměř celého Olomouckého kraje. Tento údaj je pouze orientační, z důvodů velice proměnlivé výhřevnosti biomasy. Autor chce tímto výpočtem naznačit fakt, že cílené pěstování biomasy pro její energetické využití je na potřebnou plochu velice náročné. Využívání zemědělských ploch pro pěstování biomasy pro energetické účely je podle autora navíc velice kontroverzní a neetické. Na Zemi dnes žije více než 6 miliard lidí, z nichž téměř třetina trpí nedostatkem potravy. Při průměrné výtěžnosti pšenice 5 tun/hektar je podle autora využívání zemědělské půdy pro výrobu potravinových surovin pro lidstvo přínosnější, než pěstování energetické biomasy. Cílené pěstování jen několika vybraných plodin, a tím vznikající monokultura pěstování zemědělských plodin, vede podle autora k postupné degradaci půdy.

## 5.6 Vliv na životní prostředí

V ČR je více než 60 procent elektrické energie vyráběno v uhelných elektrárnách. Autorův názor je, že z hlediska ekologie je tento způsob výroby elektřiny nevhodný. Spalováním uhlí se přináší do ovzduší velké množství emisí. V posledních letech, se sledováním probíhajících klimatických změn, se klade důraz na snižování emisí tzv. skleníkových plynů. Právě uhelná

energetika velkou měrou přispívá k produkci těchto plynů, především produkcí CO<sub>2</sub>. V Tab. 16 jsou uvedeny roční a poměrné emise UE Počerady s výkonem 1000 MW. UE je původcem prachového zatížení, emisí těžkých kovů a jejich sloučenin a dále nebezpečných oxidů síry a dusíku.

Tab. 16 Roční a poměrné emise uhelné elektrárny 1000 MW [21]

| UE Počerady             | úniky do ovzduší [kg/rok] | poměrné úniky do ovzduší [kg/MWh] |
|-------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Arsen a sloučeniny      | 33,3                      | 0,000006                          |
| Chlor a anorgan. slouč. | 16400                     | 0,00273                           |
| Kadmium                 | 32,1                      | 0,0000054                         |
| Nikl                    | 337                       | $5,617 \cdot 10^{-5}$             |
| Olovo a sloučeniny      | 628                       | 0,0001047                         |
| Oxid uhelnatý           | 1090000                   | 0,1816667                         |
| Oxid uhličitý           | 6400000000                | 1066,6667                         |
| Oxidy dusíku            | 13700000                  | 2,283333                          |
| Oxidy síry              | 5090000                   | 0,8483333                         |
| Dioxiny, furany         | 0,00031                   | $5,16667 \cdot 10^{-11}$          |
| Polétavý prach PM10     | 324000                    | 0,054                             |
| Rtuť a sloučeniny       | 157                       | $2,61667 \cdot 10^{-5}$           |

Oproti uhelným elektrárnám je čistším zdrojem PPE. Tento zdroj získává tepelnou energii ze spalování velice čistého paliva, kterým je zemní plyn. Zemní plyn neobsahuje nebezpečné látky jako síru, nebo chlór, jedná se vlastně o téměř čistý metan. Proto při jeho spalování vznikají jen oxidy uhlíku, při dokonalém spalování jen CO<sub>2</sub> s vodou spolu s emisemi NO<sub>x</sub>, viz Tab. 17. PPE tedy neřeší problém s emisemi skleníkových plynů, ulehčuje ale životnímu prostředí od jiných nečistot vznikajících při spalování pevných fosilních paliv.

Tab. 17 Roční poměrné emise PPE s výkonem 95 MW [21]

| Červený mlýn Brno | úniky do ovzduší [kg/rok] | poměrné úniky do ovzduší [kg/MWh] |
|-------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| CO <sub>2</sub>   | 112000000                 | cca 785                           |
| NO <sub>x</sub>   | 225000                    | cca 1,6                           |

Jaderná elektrárna je podle autora velice „čistým“ zdrojem. Při provozu není jaderná elektrárna zdrojem skleníkových plynů, ani jiných znečišťujících látek, které vznikají při spalování fosilních paliv. Jaderná energetika je tak podle autora řešením snahy o snižování globálních emisí látek způsobující klimatické změny. V Tab. 18 jsou uvedeny odpadní látky a emise JE. Jaderné elektrárny s lehkovodním reaktorem při svém provozu vypouští kapalné

výpusti s obsahem radioaktivního tritia (viz. Kapitola 3). Hodnoty ionizujícího záření způsobené touto látkou jsou však hluboko pod stanoveným limitem.

Například pro EDU je úroveň limitního ročního ozáření z kapalných výpustí stanovena na 6  $\mu\text{Sv}$  za rok. V roce 2008 EDU vyčerpala tento limit jen z 23 %. Kapalně výpusti tedy způsobily ozáření o roční dávce 1,38  $\mu\text{Sv}$ , což je nižší ozáření než od přírodního pozadí. Vedlejším produktem JE i VJP. S tím je však nakládáno takovým způsobem, že nijak nepůsobí na životní prostředí v okolí elektrárny (viz. Kapitola 3).

Tab. 18 Roční a poměrné emise JE s výkonem 1760 MW

| JE Dukovany     | úniky do vody [kg/rok] | pevné odpady [kg/rok] | poměrné úniky do vody [kg/MWH] | poměrné pevné odpady [kg/MWH] |
|-----------------|------------------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Azbest          | 0                      | 798                   | 0                              | $5,523 \cdot 10^{-5}$         |
| Dusík           | 112000                 | 0                     | 0,00775                        | 0                             |
| Cu a sloučeniny | 167                    | 3580                  | $1,156 \cdot 10^{-5}$          | 0,0002478                     |
| VJP             | 0                      | 42 000                | 0                              | 0,0029071                     |
| NaO a SaO       | 0                      | 330000                | 0                              | 0,0228412                     |

Autor souhlasí s výrokem, že obnovitelné zdroje energie jsou nejčistšími dostupnými technologiemi pro výrobu energie. Neprodukují žádné emise zatěžující životní prostředí, nebo způsobující změny klimatu. Po skončení jejich životnosti jsou relativně lehce demontovatelné, jimi zabrané území se tak může dále bezpečně využívat například pro zemědělské, nebo jiné účely. Jedinou jejich nevýhodou při porovnávání vlivu na životní prostředí, je vliv na krajinnotvorný ráz, především u fotovoltaických a větrných elektráren. Označení této vlastnosti za nevýhodu však může být bráno jako subjektivní.

ESB je řazeno mezi obnovitelné zdroje energie. I když při jejím spalování vzniká oxid uhličitý, nepočítá se s ním jako s příspěvkem k celkové produkci oxidu uhličitého z energetiky. To vychází z faktu, že při pěstování biomasy se fotosyntézou spotřebovává stejné množství oxidu uhličitého, kolik se vyprodukuje při jejím spalování. Složení biomasy je velice proměnlivé, především podle typu biomasy a lokality jejího růstu. Podle toho se i velice mění složení spalin vzniklých při ESB, autor proto neuvádí přesné produkované emise. Nejškodlivějšími složkami biomasy jsou podle autora síra, chlor, fluor a alkalické kovy. Jejich zastoupení je velice proměnlivé, při vyšším obsahu v biomase roste i jejich podíl ve spalinách.

## 5.7 Srovnání provozní bezpečnosti JE a ostatních zařízení pro výrobu EE

Podle autorova mínění je při výběru vhodného zdroje elektrické energie nejdůležitější vlastností daného zařízení jeho bezpečnost.

Bezpečnostní rizika při provozu JE jsou odvozené ze samotného principu JE. V JE probíhá štěpení jaderného paliva, při kterém vznikají radioaktivní štěpné produkty spolu s ionizujícím zářením. Případná havárie s únikem těchto látek tak představuje nebezpečí pro životní prostředí nejen v okolí JE. Autor je přesvědčen, že takovýmto událostem se v jaderné energetice bezpečně předchází. Toto autorovo tvrzení se opírá o dodržování předpisů pro zajištění tzv. jaderné bezpečnosti provozovateli jaderných zařízení.

Ta je definována jako stav a schopnost jaderného zařízení a osob obsluhujících jaderné zařízení zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné reakce, nebo nedovolenému úniku radioaktivních látek nebo ionizujícího záření do životního prostředí a omezovat následky nehod. Z této definice plyne povinnost provozovatelů jaderných zařízení plnit tři funkce [5]:

- a) bezpečně odstavit reaktor za všech situací
- b) odvést veškeré zbytkové teplo z AZ reaktoru za všech situací při provozu i odstávce bloku
- c) zabránit úniku radioaktivních látek a ionizujícího záření do okolí za všech situací při provozu i odstávce bloku

Při nesplnění podmínek jaderné bezpečnosti není provozovateli jaderného zařízení dozorným orgánem (SÚJB) uděleno povolení zařízení provozovat. Vyjmenované požadavky jsou zajištěny už samotným výběrem a přípravou osob, které v JE řídí chod jaderného zařízení. Tyto osoby jsou patřičně školeny a jsou podrobovány psychotestům. Stav a schopnost zařízení plnit vyjmenované úkoly jsou v JE ověřována pravidelnými kontrolami a zkouškami. Na zařízení probíhá pravidelná údržba a diagnostika stavu vybraných zařízení nejen v době odstávek. S ohledem na splnění požadavků jaderné bezpečnosti se vypracovává i samotný projekt jaderného zařízení. V koncepci JE jsou zařazeny konstrukční prvky, které zabraňují úniku ionizujícího záření a úniku radioaktivních látek. U tlakovodních reaktorů je proti těmto únikům první bariérou pokrytí palivových tablet. Dalšími bariérami jsou stěny potrubí celého primárního okruhu společně s tlakovou nádobou. Poslední konstrukčním prvkem pro záchyt těchto úniků je kontejnment. S přihlédnutím k těmto skutečnostem autor označuje jadernou elektrárnu za dostatečně bezpečný zdroj EE.

Dalším bezpečnostním rizikem jaderné energetiky je zneužití radioaktivních materiálů vzniklých v JE pro vojenské účely. Jedná se především o izotopy plutonia obsažené ve VJP. To je uskladněno v těsných kontejnerech v meziskladech. Dosavadní způsob uskladňování VJP a neustálá bezpečnostní kontrola je podle autora v tuto chvíli dostatečný. Definitivní řešení tohoto problému vidí autor v nástupu reaktorů GEN IV. Díky nim se aktinoidy obsažené ve VJP v čele s plutoniem energeticky využijí a rozpadnou na méně aktivní a nebezpečné štěpné produkty.

Z pohledu dodávky elektrické energie a palivové závislosti autor označuje jadernou elektrárnu za bezpečný zdroj. Dodávání a výměna paliva není u většiny JE kontinuální. Výměna paliva probíhá kampaňovitě, v případě zastavení dodávky paliva je tak delší doba pro vyjednání paliva nového. Přechod na palivo jiného výrobce však bývá složitým technickým problémem.

U uhelných a paroplynových elektráren neexistuje nebezpečí úniku velkého množství radioaktivních látek, nebo ionizujícího záření, jako u JE. Uhlenné elektrárny v ČR využívají domácích zdrojů uhlí, z hlediska palivové závislosti tedy autor uznává UE jako bezpečný zdroj. U paroplynových zdrojů EE je situace z palivovou závislostí horší. ČR pokrývá většinu spotřeby zemního plynu dodávkami z Ruska. I když je zemní plyn zálohován v podzemních zásobnících, jejich kapacity pokrývají jen tříměsíční spotřebu ČR.

Obnovitelné zdroje energie (FVE, VTE, VE) jsou z hlediska ohrožení životního prostředí jednoznačně nejbezpečnější. Neprodukují radioaktivní látky ani ionizující záření, nepřinášejí žádné emise skleníkových plynů. Naopak je tomu při porovnání jistoty výroby EE. Autorovo tvrzení je, že jejich provoz je zcela závislý na okamžitých povětrnostních podmínkách. Jejich využití se tak dá charakterizovat jako zcela nahodilé.

## 6 ZÁVĚR

Náplní této práce bylo porovnat jadernou energetiku s ostatními zdroji elektrické energie schopnými pokrýt její spotřebu. V úvodu práce jsou popsány vybrané porovnávané technologie, jejich očekávané využití při výrobě elektrické energie v ČR v budoucích letech. Autor práce dále popisuje vliv jaderné energetiky na životní prostředí, včetně nakládání s odpady vzniklými při provozu jaderné elektrárny. Součástí této práce je i podrobnější představení perspektivy jaderné energetiky v ČR, je zde i nastíněn očekávaný vývoj jaderných energetických technologií.

V ČR, ale i celosvětově mají ve výrobě elektrické energie největší zastoupení technologie spalující fosilní paliva. Je dokázáno, že spalování takovýchto paliv má nepříznivé dopady na životní prostředí a klimatické podmínky, především kvůli produkujícím emisím. Z těch se jako nejproblematictější jeví třiatomové, tzv. skleníkové plyny, především oxid uhličitý. Dalším problémem fosilních paliv jsou jejich zmenšující se zásoby. Společnost se tak dostává do situace, kdy se musí rozhodnout, jak tyto zdroje nahradit.

V posledních letech se klade velký důraz na využívání obnovitelných zdrojů energie. Tyto zdroje jsou ekologicky nejšetrnější. Teoreticky by tak mohly být vhodným nahrazením za stávající fosilní technologie. Stanovisko autora však tuto možnost zamítá. OZE nemohou nahradit stávající výrobní kapacity z několika příčin. Jako hlavní důvod autor označuje jejich až nahodilou schopnost výroby EE. Ta je podmíněna příznivými přírodními podmínkami, tedy rychlostí větru, intenzitou denního světla, nebo dostatkem vody ve vodních dílech a vodotečích. Zastánci OZE vidí řešení tohoto problému ve zbudování zálohových zdrojů, které by pokrývaly spotřebu EE v době jejich nedostupnosti. Takovéto řešení je podle autora nevyhovující. Toto „zdvojení“ instalovaného výkonu by jednak nepřineslo výrazné snížení v produkci skleníkových plynů a dále by zvýšilo investiční náročnost OZE, která už je tak velmi vysoká.

Uplatnění OZE autor vidí jako doplňkový zdroj v takové míře, kdy jejich výrobní výkyvy budou schopny pokrývat např. přečerpávací a akumulární vodní elektrárny, tedy další zdroje s nulovou produkcí škodlivých emisí, spolu s ojedinělými zálohami v podobě PPE.

Názor autora je, že jedinou možností, jak vyrábět elektrickou energii s minimálním dopadem na životní prostředí, je využití jaderné energetiky. Zároveň se domnívá, že do doby, než dojde k potřebnému navýšení výrobních kapacit JE, by se měly využít zbylé zdroje fosilních paliv. Ty by však měly být využity v nejmodernějších technologiích s nejvyšší možnou efektivitou využití.

Autorem doporučovaná jaderná energetika je zdrojem s nulovou produkcí skleníkových plynů. Je zdrojem i radioaktivních látek s dlouhými poločasy rozpadu, avšak použité technologie pro jejich izolaci od životního prostředí jsou velice bezpečné (viz 3. kapitola). JE vypouští malé množství radioaktivních látek do okolí, avšak v koncentracích nijak nezvyšující úroveň ionizujícího záření přirozeného okolí. Autor v této práci popisuje očekávaný nástup JE s reaktory nových generací a pokročilých palivových cyklů, díky kterým se budou objemy a aktivity nebezpečných látek z JE dále zmenšovat. Díky uzavření palivového cyklu dojde i ke zvýšení efektivity využívání jaderného paliva. Jaderná energetika tak bude velice výkonným a spolehlivým zdrojem, s nízkými výrobními náklady a dlouhou životností.

Autor tedy označuje jadernou elektrárnu za jediný „zelený zdroj“, který je a bude schopný pokrývat spotřebu energie neustále narůstajícího počtu obyvatel této planety.

## 7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. [cit. 2010-02-15]. Aktualizace státní energetické koncepce. URL <<http://www.mpo.cz/dokument5903.html>>
- [2] *Vláda České republiky* [online]. [cit. 2009-10-15]. Aktualizovaná zpráva Nezávislé energetické komise. URL <<http://www.vlada.cz/cz/ppov/nezavisla-energeticka-komise/aktuality/default.htm>>
- [3] *Ekolist.cz* [online]. [cit. 2009-11-03]. URL <<http://www.ekolist.cz>>
- [4] *Správa úložišť radioaktivních odpadů* [online]. [cit. 2010-01-31]. URL <[www.surao.cz](http://www.surao.cz)>
- [5] Poznámky z předmětů Jaderná energetika a Jaderné zařízení a jejich bezpečnost, Energetický ústav, FSI, VUT v Brně
- [6] *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2009-12-11] URL <<http://www.cez.cz>>
- [7] *Česká vodíková technologická platforma* [online]. [cit. 2010-02-18]. URL <<http://www.hytep.cz>>
- [8] *Wikipedia* [online]. [cit. 2010-03-13]. URL <<http://www.wikipedia.org>>
- [9] *Hyperion power* [online]. [cit. 2010-03-13]. URL <[www.hyperionpowergeneration.com](http://www.hyperionpowergeneration.com)>
- [10] *OSEL: Objektivní zdroj E-Learning* [online]. [cit. 2010-03-14]. URL <[www.osel.cz](http://www.osel.cz)>
- [11] KUBÍČEK, Ondřej. *Jaderné a klasické zdroje tepla pro vytápění*. Brno, 2003. 78 s. Diplomová práce. VUT v Brně.
- [12] TOMEK, Jozef. Využívání atómovej elektrárne na centralizované zásobovanie teplom. *Bezpečnosť jaderné energie*. 2006, 14, 7/8, s. 224-226.
- [13] *Slovenské elektrárne* [online]. URL <[www.seas.sk](http://www.seas.sk)>
- [14] Nový jaderný zdroj v lokalitě Temelín včetně vyvedení výkonu do rozvodny Kočín. In *Oznámení záměru dle §6 zákona č.100/2001Sb. o posuzování vlivů na životní prostředí*. 07/2008, s. 146. URL <[http://tomcat.cenia.cz/eia/detail.jsp?view=eia\\_cr&id=MZP230](http://tomcat.cenia.cz/eia/detail.jsp?view=eia_cr&id=MZP230)>
- [15] *Česká informační agentura životního prostředí* [online]. [cit. 2010-04-15]. URL <[www.cenia.cz](http://www.cenia.cz)>
- [16] ŠIMEK, Dalibor. *Posouzení možnosti provozu jaderné elektrárny s reaktory typu VVER, resp. PWR s kumulací tritia ve stálé náplni primárního okruhu*. Brno, 1998. 61 s. Dizertační práce. VUT FSI v Brně.
- [17] ŠTAMBERK, Karel. *Technologie jaderných paliv II*. Druhé vydání. Praha: ČVUT, 2005. 147 s. ISBN 80-01-03261-2.
- [18] *Česká nukleární společnost* [online]. [cit. 2010-04-15]. URL <<http://www.csvts.cz/cns/>>
- [19] ŠTAMBERK, Karel. Pokročilé palivové cykly jaderných elektráren. *Bezpečnosť jaderné energie*. 2005, 13, 9/10, s. 266-273.
- [20] *GEN IV International Forum* [online]. [cit. 2010-03-28]. URL <[www.gen-4.org](http://www.gen-4.org)>
- [21] *Ministerstvo životního prostředí* [online]. Integrovaný registr znečišťování. URL <[www.irz.cz](http://www.irz.cz)>
- [22] *Energetický regulační úřad* [online]. URL <[www.eru.cz](http://www.eru.cz)>

## 8 SEZNAM ZKRATEK

|        |  |
|--------|--|
| AZ     | Aktivní zóna   |
| CASTOR | Cask for storage and transport of radioactive material |
| CENIA  | Česká informační agentura životního prostředí          |
| ČU     | Černé uhlí   |
| ČR     | Česká republika  |
| EDU    | Elektrárna Dukovany                                    |
| EE     | Elektrická energie                                     |
| EIA    | Environmental Impact Assessment                        |
| EME    | Elektrárna Mělník                                      |
| EPC    | Elektrárna Počerady                                    |
| ERÚ    | Energetický regulační úřad                             |
| ESB    | Energetické spalování biomasy                          |
| ETE    | Elektrárna Temelín                                     |
| EU     | Evropská unie  |
| FVE    | Fotovoltaická elektrárna                               |
| HDP    | Hrubý domácí produkt                                   |
| HU     | Hnědé uhlí   |
| HÚ     | Hlubinné úložiště                                      |
| CHÚV   | Chemická úprava vody                                   |
| JE     | Jaderná elektrárna                                     |
| KVET   | Kombinovaná výroba elektřiny a tepla                   |
| MA     | Minoritní aktinidy                                     |
| MOX    | Mixed oxide  |
| MPO    | Ministerství průmyslu a obchodu                        |
| MŽP    | Ministerstvo životního prostředí                       |
| NAO    | Nízkoaktivní odpady                                    |
| NJZ    | Nový jaderný zdroj                                     |
| PEZ    | Primární energetické zdroje                            |
| POPs   | Persistent Organic Pollutants                          |
| PPE    | Paroplynová elektrárna                                 |



|       |                                      |
|-------|--------------------------------------|
| SAO   | Středněaktivní odpady                |
| SEK   | Státní energetická koncepce          |
| SÚJB  | Státní úřad pro jadernou bezpečnost  |
| SÚRAO | Správa úložišť radioaktivních odpadů |
| UE    | Uhelná elektrárna                    |
| VAO   | Vysoceaktivní odpady                 |
| VE    | Vodní elektrárna                     |
| VJP   | Vyhořené jaderné palivo              |
| VPE   | Vodní přečerpávací elektrárna        |
| VTE   | Větrná elektrárna                    |