



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ENERGETICKÝ ÚSTAV**  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

# JADERNÁ ENERGETIKA PŘED A PO KATASTROFĚ VE FUKUŠIMĚ DAIČI

NUCLEAR POWER BEFORE AND AFTER THE DISASTER OF FUKUSHIMA DAIICHI

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**JAN HANUŠ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**ING. JIŘÍ MARTINEC PH.D.**

BRNO 2012



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2011/12

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Hanuš

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Energetika, procesy a ekologie (3904R030)**

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 bakalářské práce:

### **Jaderná energetika před a po katastrofě ve Fukušimě Daiči**

v anglickém jazyce:

### **Nuclear power before and after the disaster of Fukushima Daiichi**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Situace v jaderné energetice se znatelně změnila po havárii v elektrárně Fukušima Daiči. Začátek renesance v jaderné energetice byl v určitém smyslu definitivně ukončen nejen na politické úrovni ale i v přístupu jednotlivých zemích k výrobě elektrické energie. Havárie byla vnímána jako mezník pro definitivní odklon od jaderné energetiky, kterou však nelze do budoucna zcela a úplně nahradit jinými alternativami.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše stavu jaderné energetiky před havárií v jaderné elektrárně Fukušima Daiči.

Detailní popis havárie - příčiny, průběh, vliv na okolí elektrárny.

Současný stav jaderné elektrárny Fukušima Daiči.

Rešerše následných opatření v jednotlivých zemích používajících jadernou energetiku.

Zpracování možností pro úplné odstoupení od jaderné energetiky - technická a ekonomická studie.



Seznam odborné literatury:

Databáze technických článků ScienceDirect.

Databáze publikací World Nuclear Association.


Databáze publikací International Atomic Energy Agency.

Webový portál Evropské unie.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Martinec, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 15.11.2011

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu



  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan

**Abstrakt:**

Tato bakalářská práce pojednává o havárii v jaderné elektrárně Fukušima Daiči. Jsou zde popsány příčiny a následky této havárie a vývoj jaderné energetiky před touto havárií a po ní. Jaderná havárie ve Fukušimě Daiči je zde také srovnána s havárií v jaderné elektrárně Černobyl. Závěr této práce je věnován technicko-ekonomické studii pro úplné odstoupení České republiky od jaderné energetiky.

**Abstract:**

This bachelor's thesis is written about accident in Fukushima Daiichi power plant. There are described causes and consequences of this accident and also status of nuclear energy before and after this accident. The disaster at Fukushima Daiichi is compared with the disaster at Chernobyl nuclear power plant in this work too. At the end of this thesis is written technical and economical study for phase out of nuclear energy in the Czech Republic.

**Klíčová slova:**

jaderná energie  
energetika  
jaderná havárie  
Fukušima Daiči  
Japonsko

**Key words:**

nuclear energy  
power engineering  
nuclear disaster  
Fukushima Daiichi  
Japan



#### **Bibliografická citace**

HANUŠ, J. *Jaderná energetika před a po katastrofě ve Fukušimě Daiči*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 62 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Martinec, Ph.D..





### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Jaderná energetika před a po katastrofě ve Fukušimě Daiči vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Jiřího Martince Ph.D.. V práci jsem využil svých poznatků nabytých při konzultacích a studiu a pramenů uvedených v seznamu zdrojů.

V Brně dne: .....

.....

Jan Hanuš



### **Poděkování**

Touto cestou bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Martincovi Ph.D. za všechny strávený čas, za odborné rady a konzultace týkající se mé bakalářské práce.



## Obsah

Úvod .....	15
1. Jaderná energetika před havárií ve Fukušimě Daiči .....	16
1.1. Evropa .....	16
1.2. Jihovýchodní Asie.....	18
2. Jaderná elektrárna Fukušima Daiči .....	20
2.1. Popis reaktoru BWR .....	21
2.2. Chlazení .....	23
3. Detailní popis havárie .....	25
3.1. Zemětřesení a tsunami .....	25
3.2. Události v JE Fukušima Daiči .....	26
3.3. Radioaktivní následky na okolí.....	30
3.3.1. Zdroje pitné vody .....	31
3.3.2. Dozimetrická situace ve vzdáleném okolí od elektrárny.....	32
3.3.3. Dozimetrická situace v nejbližším okolí elektrárny a v elektrárně .....	33
4. Současný stav jaderné elektrárny Fukušima Daiči .....	35
4.1. Stav k dubnu 2012 .....	35
5. Jaderné havárie .....	38
6. Následná opatření v jednotlivých zemích.....	41
6.1. Zátěžové testy .....	41
6.2. Zátěžové testy v ČR.....	41
6.2.1. Dukovany .....	42
6.2.2. Temelín.....	42
7. Jaderná energetika po Fukušimě.....	44
7.1. Evropa.....	44
7.2. Jihovýchodní Asie.....	46
7.3. Amerika .....	47
7.4. Technologie budoucnosti .....	47
8. Technická a ekonomická studie pro úplné odstoupení od jaderné energetiky .....	49
Závěr.....	55



## Úvod

Jaderná energetika je v současné době velmi významnou součástí energetiky jako takové. Do 21. října 2011 podle Světové nukleární asociace WNA (World Nuclear Association) činil poměr výroby elektrické energie z jaderných elektráren 14 % z celkové světové produkce. Loňský rok 2011 byl však rokem, který si společnost a jaderný průmysl zapamatuje navždy. Jednalo se o rok, kdy zemi postihla druhá největší jaderná havárie v dějinách lidstva. Havárie jaderné elektrárny Fukušima Daiči, elektrárny, kterou ještě na začátku loňského března neznal nikdo, ale kterou od 11. 3. 2011 zná v civilizované části planety každý.

V roce 1944 Enrico Fermi, velký průkopník jaderné energetiky prohlásil, že budoucnost jaderné energetiky bude záviset na tom, jak společnost přijme zdroj energie zatížený radioaktivitou a nepřímo spojený s výrobou jaderných zbraní. V roce 2011 nabývá toto prohlášení opět na svém významu. Havárie jaderné elektrárny Fukušima Daiči je dalším milníkem v jaderné energetice a teprve následující léta ukáží do jaké míry ji tato havárie ovlivní.

Tato bakalářská práce se bude zabývat vývojem jaderné energetiky před a po incidentu, který se odehrál v této elektrárně. V jednotlivých kapitolách bude popsán směr, kterým mířila jaderná energetika před touto havárií a směr, kterým pravděpodobně půjde po ní.

Hned v první části bude popsán vývoj jaderné energetiky před touto havárií. Z textu bude zřejmé, jak se vyvíjela jaderná energetika v zemích Evropské unie a dále, jak se vyvíjela v dalších významných zemích jako Japonsko, Čína či Rusko, kde hraje jaderná energetika velmi významnou roli.

V kapitole nazvané „Jaderná elektrárna Fukušima Daiči“ bude popsán princip chodu elektrárny. Cílem bude především popsat reaktor typu BWR, který je nainstalován ve všech fukušimských blocích, a také popsat chladicí systém elektrárny. V navazující části budou zmíněny příčiny, průběh a následky této havárie spolu se zemětřesením a vlnou tsunami, které krizovou situaci vyvolaly. Následně budou zmíněny události na čtyřech nejvíce zasažených blocích 1,2,3 a 4 a vliv jejich poškození na okolí elektrárny. V další kapitole bude popsán současný stav jaderné elektrárny Fukušima Daiči, jak o něm informovala japonská media a odborníci v jaderném průmyslu. Načrtnut bude i plán úplné likvidace postižených bloků této elektrárny.

Tato havárie byla v posledních měsících srovnávána s nehodou v jaderné elektrárně Černobyl. V navazující části proto budou tyto dvě havárie porovnány. Dále v následujících částech bude popsán vývoj jaderné energetiky po Fukušimě spolu s následnými opatřeními v jednotlivých zemích. V souvislosti s havárií proběhla v řadě zemí různá opatření tak, aby bylo zabráněno podobným haváriím. V rámci Evropské unie byly zavedeny tzv. zátěžové testy jaderných zařízení, které zkoumaly jejich odolnost na extrémních přírodních katastrofách. Tyto zátěžové testy zde budou také popsány, a to především u českých jaderných elektráren.

Závěrem bude bakalářská práce obsahovat technicko-ekonomickou studii pro úplné odstoupení od jaderné energetiky v ČR. Bude se zabývat nahrazením jaderné energetiky jinými zdroji energie, především zdroji větrnými a fotovoltaikou.

## 1. Jaderná energetika před havárií ve Fukušimě Daiči

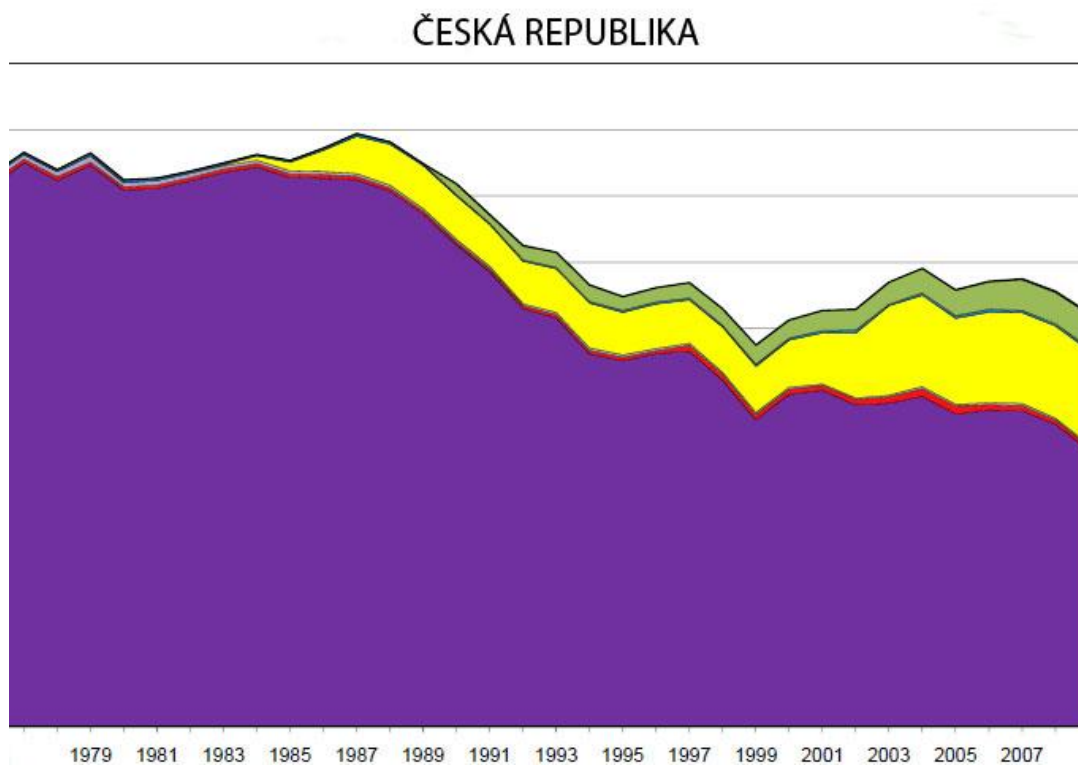
Jaderná energetika před havárií v JE Fukušima Daiči byla na vzestupu. Situaci ve státech jihovýchodní Asie, jako je Japonsko, Čína, Jižní Korea či Indie bylo možné doslova označovat jako jadernou renesanci. V Evropě a USA obecně dochází k postupnému rozšiřování využití jaderné energetiky a rozvojové státy o ni projevují stále větší zájem [1].

### 1.1. Evropa

#### Česká republika

Podle Státní energetické koncepce publikované roku 2004 je jaderná energetika velmi důležitou součástí dlouhodobého energetického mixu České republiky. Zvyšováním jejího podílu v energetice je plánováno snížení ekologické zátěže na území ČR a redukce množství skleníkových plynů v atmosféře. Dalším cílem je zajištění nezávislosti České republiky především na dodávkách fosilních paliv z jiných států [2].

Na následujícím výřezu z grafu získaného na stránkách Mezinárodní energetické agentury (IEA) je možno vidět zvyšování podílu jaderné energetiky v energetickém mixu ČR v posledních třiceti letech (žlutá barva).



Graf 1.1: Zvyšování podílu jaderné energetiky v energetice ČR [3]

V České republice je před havárií ve Fukušimě plánována dostavba nových bloků jaderné elektrárny Temelín. Dochází však také k modernizaci stávajících bloků jaderné elektrárny Dukovany a zároveň zvyšování výkonu jejích bloků VVER 440 na 500 MW. Jeden z dlouhodobých scénářů do roku 2030 počítá i s výstavbou další jaderné elektrárny v této lokalitě [1] [2].



## Evropská unie

Podobné zvyšování výkonu jako u českých Dukovan probíhá i na jiných elektrárnách stejného typu na Slovensku a Maďarsku.

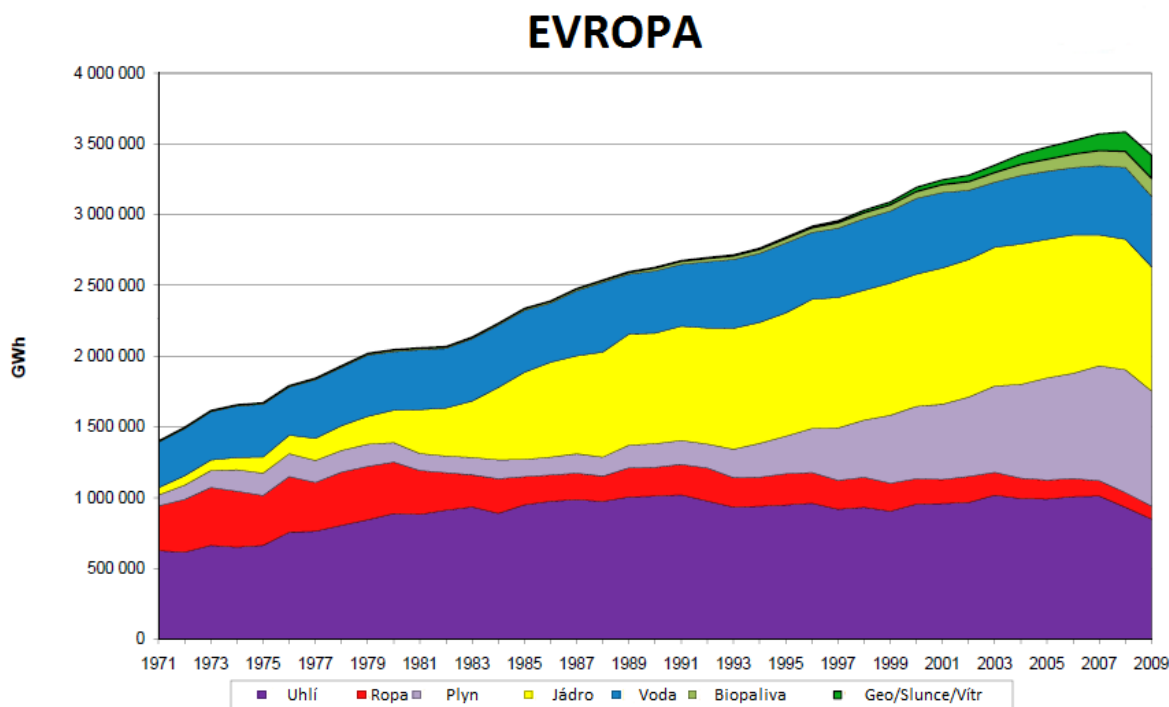
Na Slovensku v jaderné elektrárně Mochovce dochází k dostavbě dvou jaderných bloků ke dvěma již stávajícím blokům s reaktory VVER 440. Itálie přehodnocuje svůj postoj k jaderné energetice a v roce 2011 pořádá referendum k možnému návratu Itálie do jaderné energetiky. Bulharsko hledá investora pro dostavbu jaderné elektrárny Belene a v Rumusku se plánuje dostavba třetího a čtvrtého bloku jaderné elektrárny Cernavoda s kanadskými reaktory CANDU.

Výstavba moderních bloků generace III+ probíhá v Evropě pouze ve Flamanville 3 ve Francii a v Olkiluoto 3 ve Finsku. Oba stavěné bloky jsou typu EPR [1].

## Rusko

Rusko provozovalo k roku 2010 32 jaderných reaktorů. Nejnovější byl spuštěn v polovině tohoto roku a jednalo se o typ VVER 1000, který je také v českém Temelíně. Spuštění tohoto reaktoru odstartovalo jadernou renesanci v Rusku. Je rozestavěno deset reaktorů, z toho čtyři reaktory VVER 1200 z generace III+. Další čtrnáct reaktorů je naplánováno a počítá se spuštěním jednoho až dvou reaktorů každý rok. Plánovaných čtrnáct reaktorů je většinou typu VVER 1200 [1].

Na následujícím grafu 1.2 je jasně ukázán podíl jaderné energetiky v evropském kontextu v minulých letech.



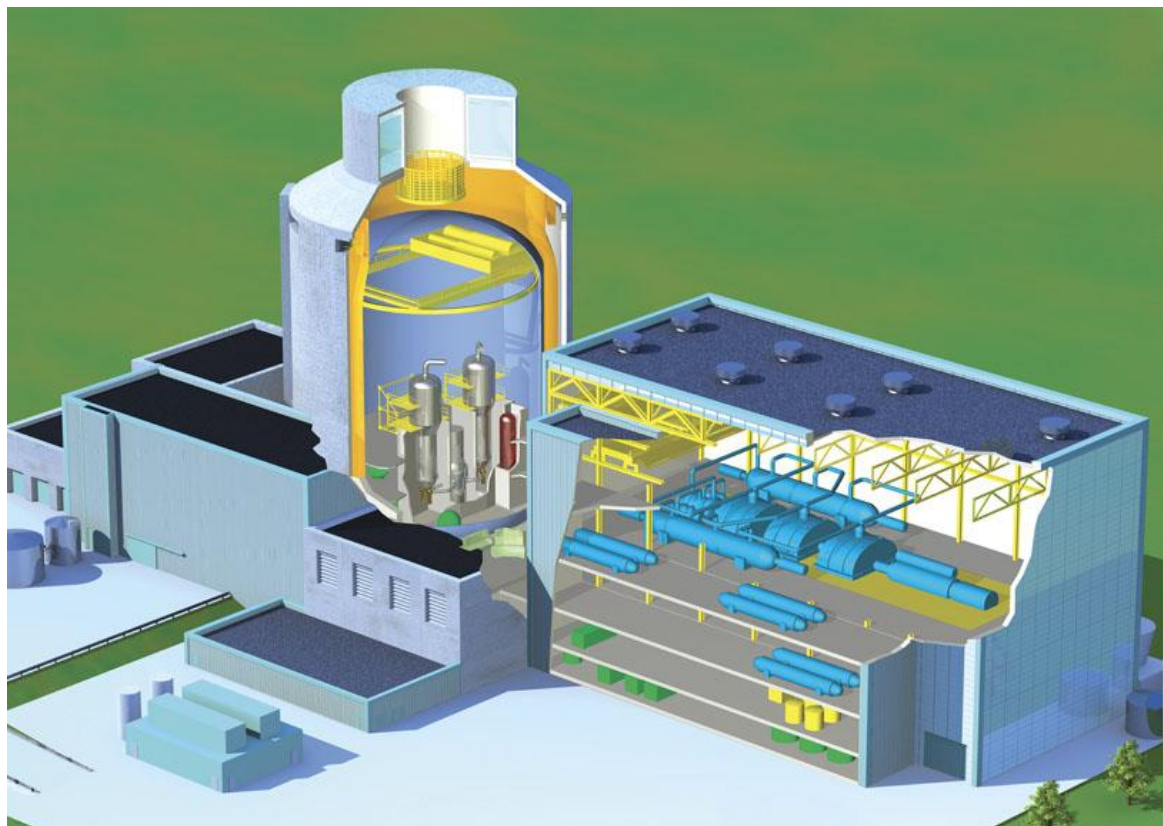
Graf 1.2: Podíl jaderné energetiky v Evropě v minulých letech [4]

## 1.2. Jihovýchodní Asie

### Čína

Moderní bloky EPR se staví také v Číně v jaderné elektrárně Taichan, kde se úspěšně pracuje na výstavbě prvního ze dvou bloků. Dalším typem reaktorů generace III+ stavěné v Číně jsou reaktory AP1000 (obr 1.1). Tyto jaderné reaktory byly navrženy firmou Westinghouse a jsou prezentovány jako nejbezpečnější a nejekonomičtější reaktory na celosvětovém jaderném trhu. Firma Westinghouse zde především hleděla na zjednodušení výstavby tohoto reaktoru, a proto se v něm nachází o 50% méně bezpečnostních ventilů, o 80% méně bezpečnostního potrubí, o 85% méně kabeláže, o 35% méně čerpadel a o 45% méně zastavěného prostoru oproti běžnému tlakovodnímu reaktoru. Proto je také možno tento reaktor postavit za 36 měsíců. Životnost tohoto typu reaktoru by měla být 60 let. V Číně jsou celkově čtyři bloky ve výstavbě. Plánováno je ještě dalších osm bloků přičemž celkový návrh počítá až s třiceti reaktory tohoto typu [1] [5].

Celkově bylo v Číně k roku 2010 ve výstavbě 25 nových reaktorů, což byla téměř polovina všech světově budovaných reaktorů. Cílem Číny je zbavit se závislosti na fosilních palivech a mít do roku 2020 výkon jaderných elektráren 80 GW. Plán počítá tento výkon do roku 2050 zvýšit na více než 400 GW [1].



Obrázek 1.1: Schéma reaktorové budovy s reaktorem AP 1000 [6]

## **Indie**

Indie v prosinci roku 2010 podepsala dohodu o výstavbě dvou bloků typu EPR. Reaktory EPR byly navrženy firmou Areva a v překladu zkratka EPR (European Pressurised Reactor) znamenala Evropský tlakovodní reaktor, později byl však tento název změněn na Evoluční tlakovodní reaktor (Evolution Pressurised Reactor). Jedná se o jaderný reaktor s plánovaným elektrickým výkonem mezi 1600 – 1750 MW a jeho životnost by měla činit 60 let. Celkově má Indie v plánu výstavbu šesti takovýchto bloků [1] [7] [8].

## **Japonsko**

V Japonsku probíhá opětovné spuštění bloků v jaderné elektrárně Kashiwazaki-Kariwa, která byla odstavena z důvodů zvýšení seizmické odolnosti elektrárny. Na rok 2011 se plánuje spuštění třetího nově postaveného bloku typu ABWR elektrárny Shimane. Další reaktor typu ABWR se od poloviny roku 2010 staví v jaderné elektrárně Ohma. Dochází ke zpoždění výstavby jaderných bloků v elektrárně Tsuruga. Zde mají být vystavěny reaktory APWR - reaktory generace III+ - vyvinuté firmou Mitsubishi. Důvodem zpoždění výstavby jsou požadavky na intenzivnější studie a testy seizmické odolnosti elektrárny [1].

## **Jižní Korea**

V Jižní Koreji je roku 2010 spuštěn první blok elektrárny Shin Kori a druhý má být spuštěn roku 2011. Třetí a čtvrtý blok jsou také ve výstavbě a oba budou osazeny reaktory APR 1400 generace III+. Další dva bloky APR je v plánu postavit v elektrárně Shin Ulchin [1].

Z uvedené kapitoly vyplývá, že jaderná energetika před havárií v JE Fukušima Daiči v jihovýchodní Asii a v Rusku prochází jadernou renesancí. Jsou stavěny a plánovány výstavby řady nových reaktorů včetně nových technologií generace III+. Stav v Evropě a v USA nelze za renesanci označovat a jedná se spíše jen o změnu pohledu a zvyšování zájmu o jadernou energetiku. Mnoho států začíná vnímat jadernou energetiku jako trvale udržitelný zdroj energie pro budoucí generace, díky kterému si budou moci zajistit vlastní energetickou soběstačnost, aniž by ohrozili možnost budoucích generací zajistit si tu svou.

Pro Českou republiku je důležitá výstavba a testování nových reaktorů generace III+, které by mohly být v budoucnu součástí nových bloků v plánované dostavbě dvou bloků v jaderné elektrárně Temelín [1].

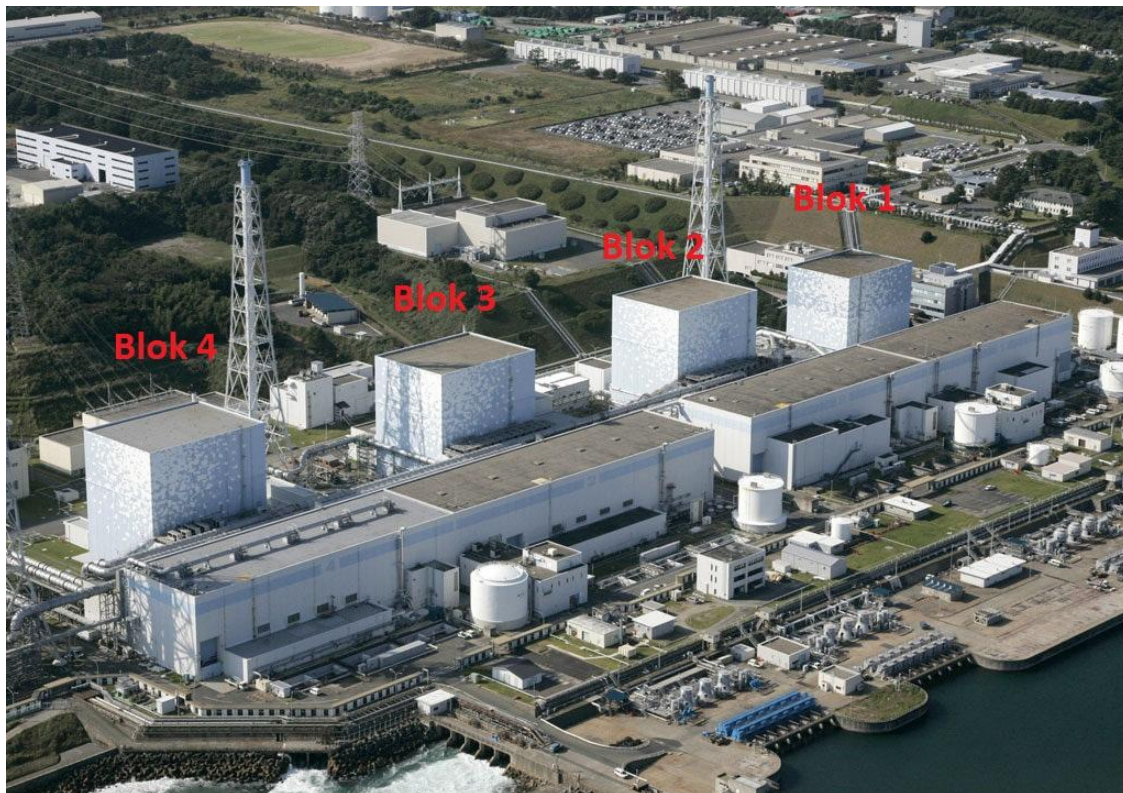
## 2. Jaderná elektrárna Fukušima Daiči

Jaderná elektrárna Fukušima Daiči zasažená vlnou tsunami se nachází v prefektuře Fukušima na severovýchodě největšího ostrova Japonska Honšu. Elektrárna je tvořena šesti bloky jaderných reaktorů a je provozována společností TEPCO (Tokyo Electric Power COporation). Typově se jedná o varné reaktory BWR navržené firmou General Electric, přičemž nejstarší byl spuštěn do provozu roku 1971 a nejmladší roku 1979.

Tabulka 2.1: Základní informace o jednotlivých blocích v JE Fukušima Daiči [9]

Blok	Reaktor	Elektrický výkon [MW]	V provozu od:	Ochranná obálka
1	BWR 3	460	1971	Mark I
2	BWR 4	784	1974	Mark I
3	BWR 4	784	1976	Mark I
4	BWR 4	784	1978	Mark I
5	BWR 4	784	1978	Mark I
6	BWR 5	1100	1979	Mark II

Jednotlivé reaktory byly vyrobeny společnostmi General Electric, Toshiba a Hitachi a představují první generaci varných reaktorů.



Obrázek 2.1: Reaktorové bloky 1-4 JE Fukušima Daiči [10]

## 2.1. Popis reaktoru BWR

Typové označení BWR znamená Boiled Water Reactor čili „varný reaktor“. BWR je lehkovodní reaktor, kde se jako moderátor a chladivo používá běžná lehká voda. Varné reaktory jsou druhé nejpoužívanější reaktory ve světovém měřítku a jsou aplikovány zhruba ve 21 % všech světových jaderných elektrárn. Tento typ reaktorů se vyznačuje tím, že radioaktivní pára vzniklá v aktivní zóně při spuštění reaktoru je odváděna přímo na turbínu. Za turbínou je pára chlazená a kondenzuje. Kondenzát se přivádí zpět do aktivní zóny pomocí hlavních cirkulačních čerpadel. Chlazení vodní páry je prováděno chladicími věžemi nebo mořskou vodou, pokud se elektrárna nachází na pobřeží.

Reaktory typu BWR mají počátek v padesátých letech, kdy byly navrženy firmou General Electric. Hlavním účelem bylo snížit náklady na výstavbu, zjednodušit design a snížit tlak na jednotlivé komponenty reaktoru oproti tlakovodním reaktorům PWR.

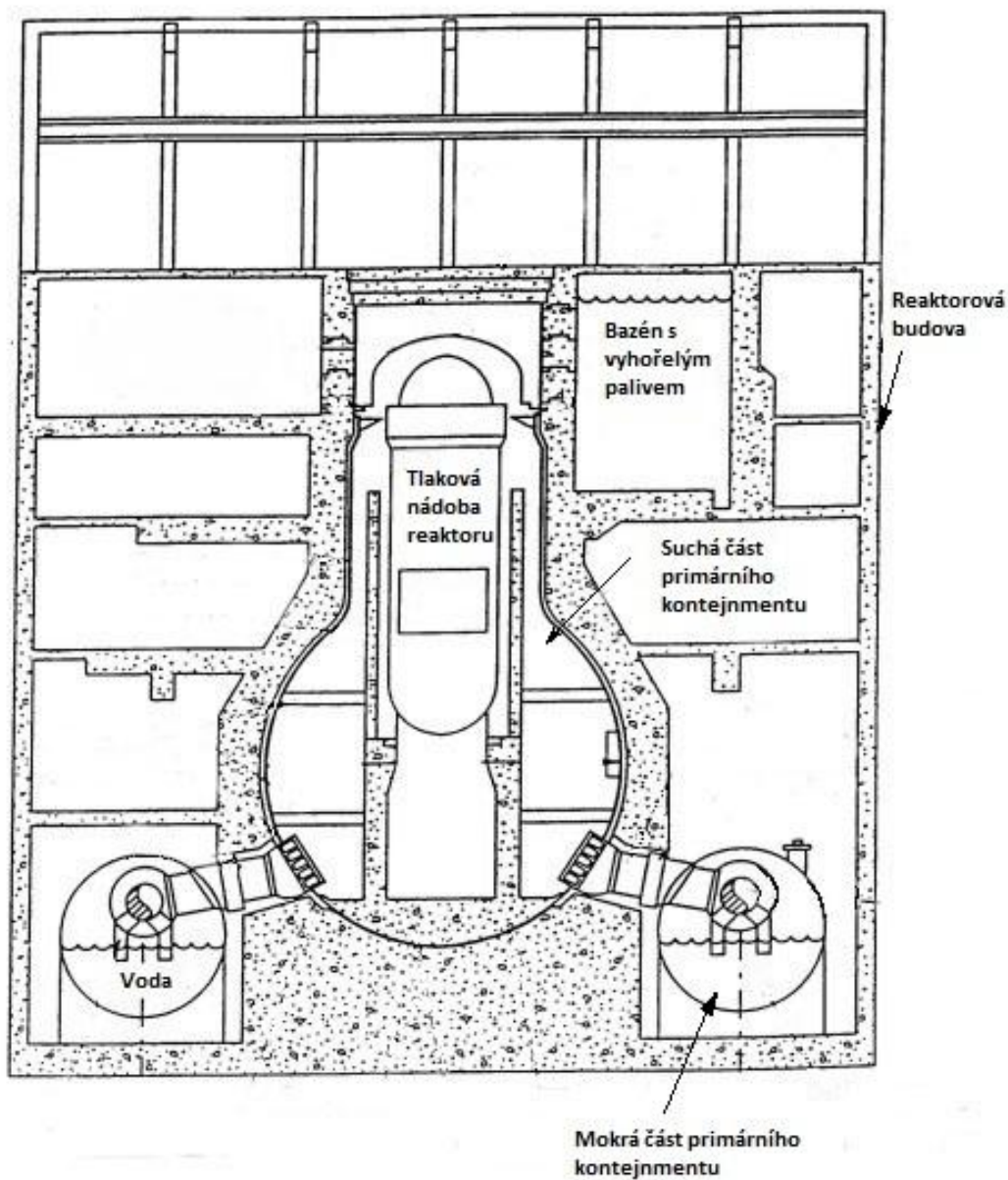
### Ochrana před radiací

Z hlediska ochrany před únikem radiace zde existuje několik bariér, které mají za účel celý reaktor odstínit. První bariéru tvoří ochranný obal paliva uloženého v aktivní zóně. Palivové tyče ze slitiny zirkonia jsou naplněny tabletami z oxidu mírně obohaceného uranu. Prostor mezi těmito tyčemi je vyplněn vodou, která zde proudí a přeměňuje se na páru, která odchází na turbínu. Celý tento prostor, kde jsou uloženy palivové tyče, se nazývá aktivní zóna reaktoru. Celá aktivní zóna je uložena v tlakové nádobě, která tvoří další bariéru proti úniku radiace. Jelikož zirkoniový povlak palivových tyčí nemůže být nikdy 100% těsný, dostává se část radioaktivních produktů do chladicího media a to se stává mírně radioaktivní.

Protože i chladicí okruh má určité netěsnosti, je třeba použít další ochrannou bariéru, která by zabránila uniku radioaktivních produktů do okolí. Tato další ochrana se nazývá primární kontejnment. Na obrázku dále můžete vidět kontejnment používaný v jaderné elektrárně Fukušima Daiči, který se skládá ze dvou částí - tzv. „suché“ a „mokrě“. Úkolem suché části je zachytávat páru unikající z tlakové nádoby. V mokré části dochází ke kondenzaci této páry za účelem snížení tlaku v kontejnmentu. Hlavním úkolem kontejnmentu je tedy zamezit úniku radioaktivních látek dále do okolí.

Celý primární kontejnment je dále obestavěn budovou reaktoru, tzv. sekundárním kontejnmentem. Podstata sekundárního kontejnmentu spočívá v zachycení zbylých radioaktivních látek. Tato část jaderné elektrárny už není navržena, aby odolávala vysokým tlakům jako předchozí části, a je v ní udržován podtlak. Podtlak minimalizuje úniky radioaktivních látek do okolí. V sekundárním kontejnmentu se dále také nachází bazén s vyhořelým jaderným palivem.

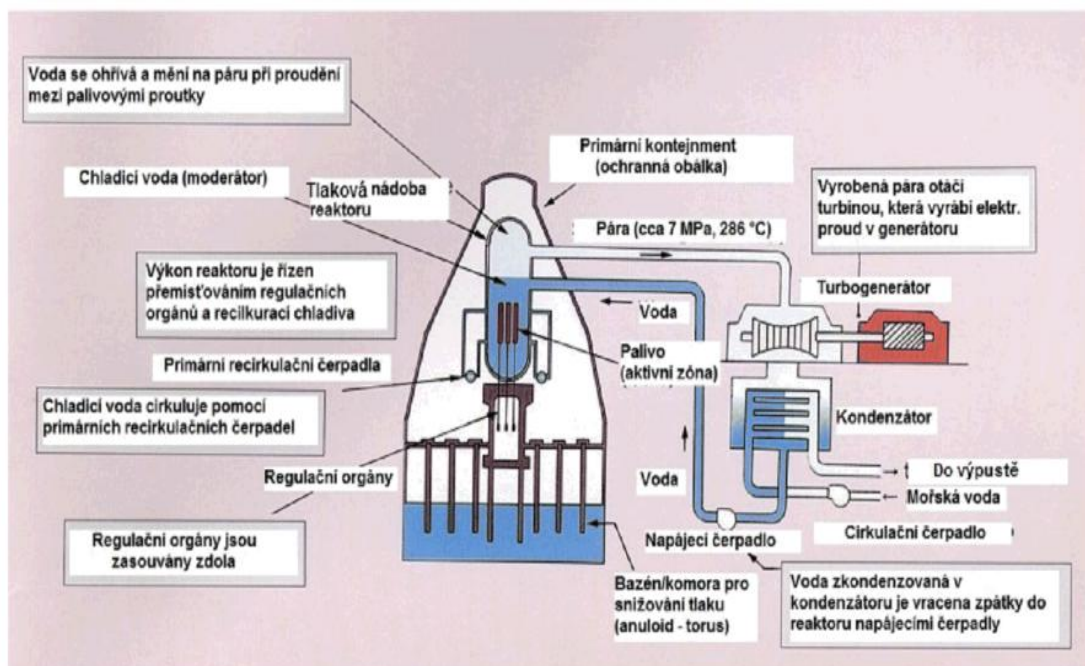
Aby unikly radioaktivní látky do okolí je potřeba, aby překonaly všechny tyto bariéry [11].



### Kontejnment Mark I

Obrázek 2.2: Konstrukce kontejnmentu Mark I [12]

Na následujícím schématu je ukázán princip výroby elektrické energie v reaktorech typu BWR.



Obrázek 2.3: Schéma výroby elektrické energie [11]

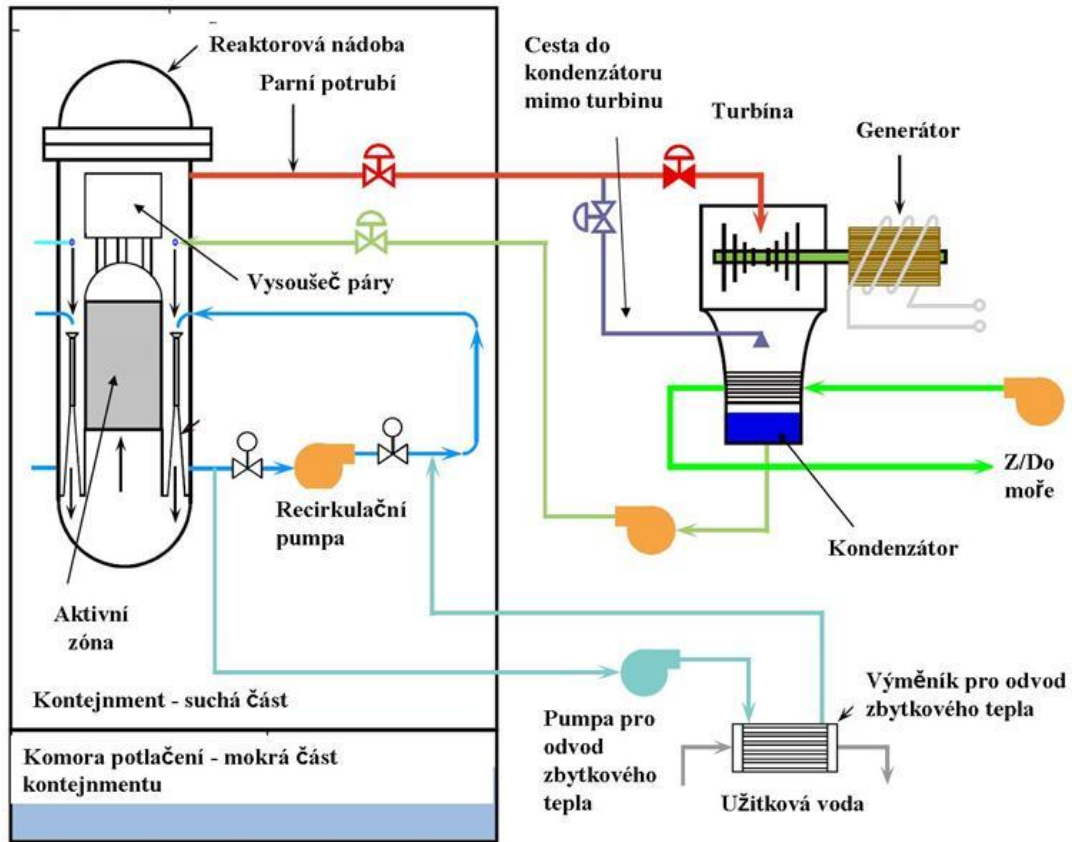
Z kondenzátoru je pomocí napájecího čerpadla přiváděna voda do aktivní zóny reaktoru, kde dochází k přeměně její kapalné fáze na plynnou. Vodní pára je poté odváděna na turbínu, kde předává svoji energii a kondenzuje. Kondenzace páry je prováděna za pomoci mořské vody čerpané do elektrárny (Fukušima Daiči). Recirkulační čerpadla řídí průtok vody v aktivní zóně, a tím i teplotu vody a výkon reaktoru. Správným chlazením palivových tyčí jsou udržovány jejich parametry v mezích a je zajištěna jejich projektová těsnost.

## 2.2. Chlazení

Při chodu jaderného reaktoru dochází k uvolňování velkého množství energie, jež je potřeba odvádět. V normálním provozu reaktoru je chladicí voda přiváděna do aktivní zóny reaktoru, kde se mění na páru a je odváděna na turbínu. Za turbínou se nachází kondenzátor, ve kterém si tato pára předává energii s mořskou vodou, která je do něj čerpána, a opět kondenzuje. Odtud je takto zkondenzovaná voda pumpována zpět do reaktorové nádoby. Tato voda je demineralizovaná a díky tomu nedochází k tvorbě usazenin v potrubní síti. Tímto způsobem je standardně chlazen reaktor za normálního provozu.

V případě odstavení reaktoru je pára navedena přímo do kondenzátoru cestou mimo turbínu, dokud se voda v reaktoru nepřestane přeměňovat na páru. Dalším ze způsobů dochlazování je systém odvodu zbytkového tepla přes výměník.

Havarijní chlazení reaktoru u nejstaršího prvního bloku probíhalo přes nouzový kondenzátor. Druhý a třetí blok jaderné elektrárny disponoval navíc systémem izolovaného dochlazování aktivní zóny, ten byl tvořen turbočerpadlem poháněným parou z reaktoru a čerpajícím vodu z mokré části kontejnmentu do aktivní zóny. V okamžiku, kdy tato čerpaná voda přesáhla teplotu 100°C, přestal tento systém fungovat [13] [14].



Obrázek 2.4: Chladicí systém reaktoru BWR [15]

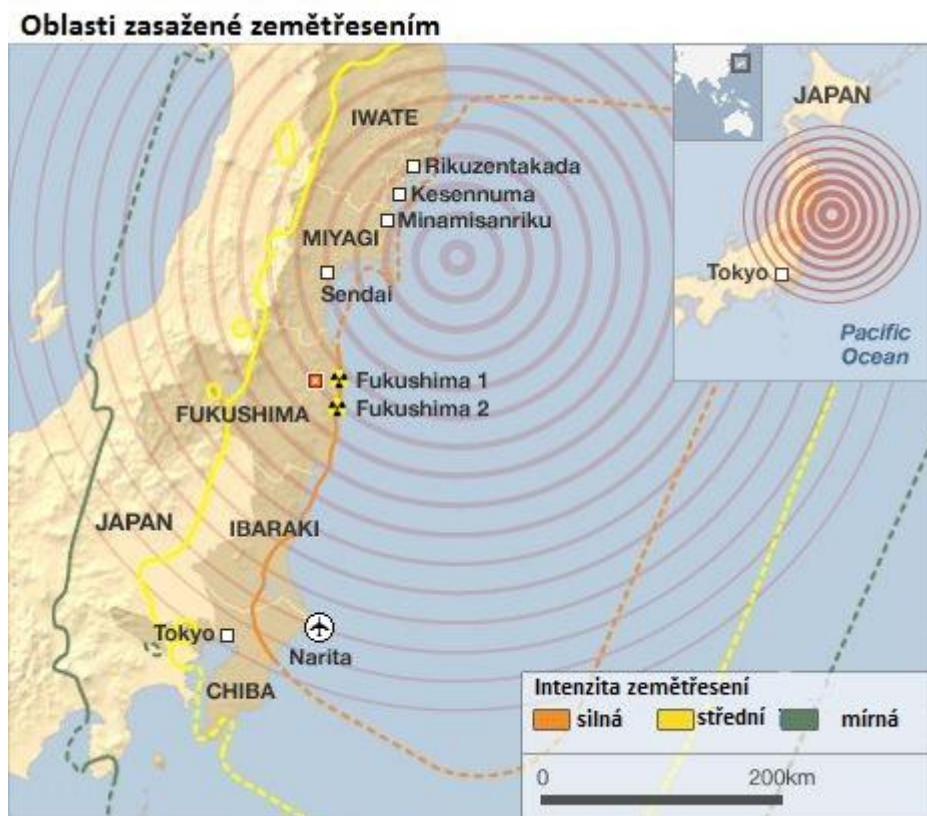


### 3. Detailní popis havárie

Jaderná krize v Japonsku byla zahájena 11.3. 2011 zemětřesením a následnou vlnou tsunami, která zasáhla a zdevastovala japonské včetně jaderné elektrárny Fukušima Daiči. Následkem tohoto zemětřesení se zvedla obří vlna tsunami, jejíž ničivá síla ochromila Japonsko na několik měsíců a způsobila největší jadernou krizi od havárie v Černobyli.

#### 3.1. Zemětřesení a tsunami

V pátek 11. března v 14:46 bylo Japonsko zasaženo zemětřesením o síle 9° Richterovy stupnice situovaným při jeho pobřeží v místě, kde se pacifická deska podsouvá pod desku severoamerickou, euroasijskou a filipínskou. Epicentrum zemětřesení (obr. 3.1) bylo v moři přibližně 130 km od města Sendai v prefektuře Miyagi východně od ostrova Honšu, největšího japonského ostrova. Příčinou bylo uvolnění nahromaděného tlaku v místě střetu litosférických desek. Tlak, který v tomto místě vzniká, je čas od času uvolněn formou zemětřesení.



Obrázek 3.1: Epicentrum zemětřesení [16]

Tlak vzniklý při zemětřesení vyvolal masivní zdvih mořského dna v šířce 180 kilometrů o 5-8 metrů. Tento zdvih mořského dna vyvolal zvednutí vodního sloupce o několik metrů nad úroveň hladiny oceánu. Tato obrovská masa vody se začala šířit všemi

směry, ale největší dopad měla na pobřeží Japonska, kam se dostala prakticky nezabavená své síly.

Tato masa vody - tsunami - zdevastovala východní pobřeží Japonska, když místy pronikla až 15 kilometrů do vnitrozemí. Sílu tsunami lze vidět i ze zničení a poškození spousty měst na pobřeží, kdy například u města Minamisanriku bylo pohřešováno 9500 obyvatel. Do hodiny a půl bylo zasaženo 670 kilometrů japonského pobřeží a vlny dosahovaly velikosti od 3 do 39 metrů. Odborníci zkoumající velikost vln na Tokijské univerzitě však připouštějí, že jejich velikost mohla být i vyšší [17].

Z následující tabulky, vytvořené Národním geofyzikálním statistickým centrem, lze pozorovat škody napáchané tsunami v číslech.

Tabulka 3.1: Následky tsunami [18]

<b>Následky tsunami</b>					
<b>Mrtví</b>	<b>Pohřešovaní</b>	<b>Zranění</b>	<b>Škody (mil. USD)</b>	<b>Zničené domy</b>	<b>Poškozené domy</b>
<b>15 854</b>	<b>3 203</b>	<b>5 950</b>	<b>210 000</b>	<b>121 656</b>	<b>197 536</b>

Je nutno zmínit, že zemětřesení a vlna tsunami nezasáhla pouze jadernou elektrárnu Fukušima Daiči, ale zasáhla ještě tři další jaderné elektrárny nacházející se na východním pobřeží ostrova Honšu.

Jednalo se o elektrárny:

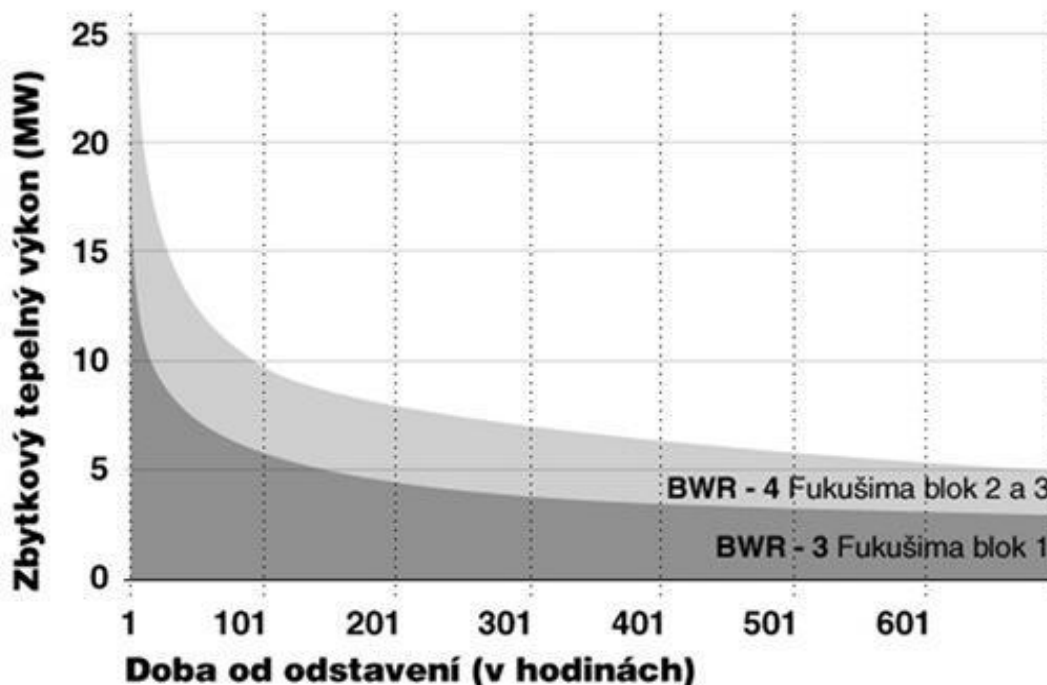
- Fukušima Daini – jaderná elektrárna vzdálená 11 kilometrů jižně od elektrárny Fukušima Daiči má čtyři varné reaktory BWR -5 o elektrickém výkonu 1100 MW. V době zemětřesení byly všechny reaktory v činnosti.
- Onagava – zde jsou instalovány dva reaktory s elektrickým výkonem 825 MW a jeden s výkonem 524MW. V době zemětřesení byly všechny tři reaktory v provozu.
- Tokai – 2 – jediný reaktor typu BWR-5 o výkonu 1100 MW byl v době zemětřesení v provozu.

U těchto tří elektráren nebyl závažnější problém s dochlazením aktivní zóny a reaktory byly po několika dnech dochlazeny do studeného stavu, tj. do stavu kdy teplota v aktivní zóně reaktoru klesne pod 100 °C.

### 3.2. Události v JE Fukušima Daiči

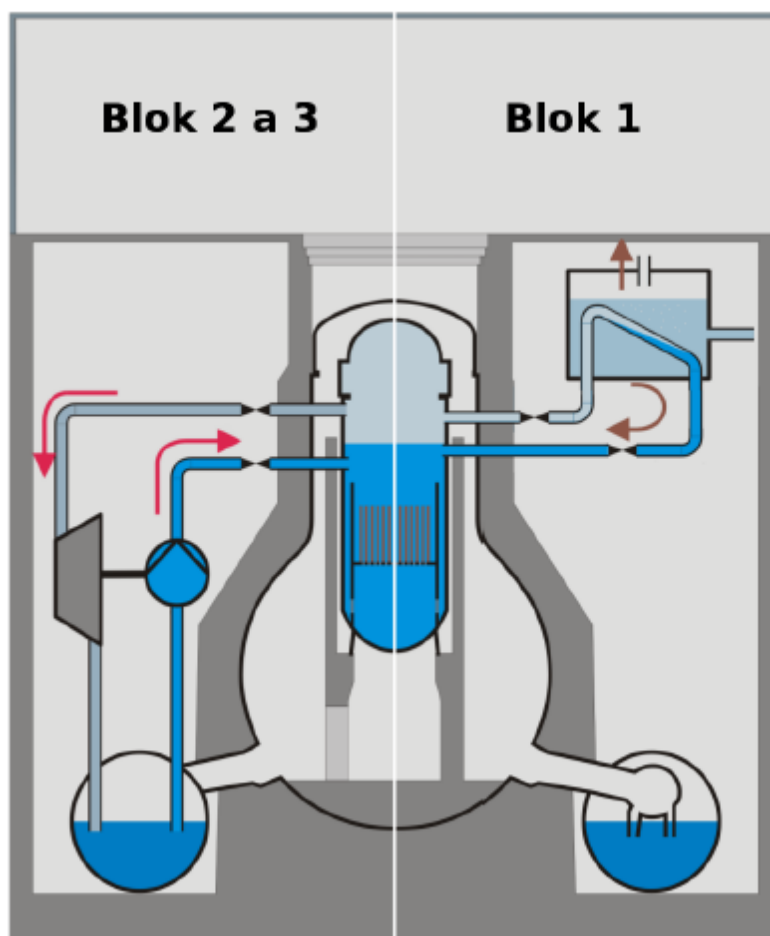
V čase zemětřesení byly v provozu pouze tři reaktory jaderné elektrárny Fukušima Daiči. Jednalo se o reaktory č. 1,2 a 3, reaktor č. 4 byl mimo provoz z důvodu výměny paliva a reaktory 5 a 6 byly zase odstaveny z důvodu pravidelné údržby. Když udeřilo zemětřesení, byly všechny tři operující bloky jaderné elektrárny automaticky odstaveny díky zapůsobení seizmických čidel. Následně byla přerušena dodávka elektřiny z důvodu poškození japonské rozvodné sítě zemětřesením. Nouzové dieselagregáty byly spuštěny a zajistily opětovné napájení elektrárny. V momentu odstavení byla velikost zbytkového tepelného výkonu reaktorů okolo 7% velikosti nominálního tepelného výkonu reaktorů,

jeden den po odstavení pak činila velikost tohoto zbytkového výkonu kolem 1% a pět dní po odstavení zhruba 0,5% ( graf 3.1).



Graf 3.1: Zbytkový tepelný výkon reaktorů po odstavení v závislosti na čase [19]

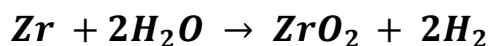
Čtyřicet jedna minuta po automatickém odstavení reaktorů z provozu byla jaderná elektrárna Fukušima Daiči zasažena první vlnou tsunami, po které s osmiminutovým zpožděním následovala vlna druhá. Elektrárna byla stavěna, aby vydržela vlny o výšce 5,7 metru; vlny měly ovšem výšku kolem 14-15 metrů. Tyto vlny poškodily čerpadla čerpající mořskou vodu na chlazení okruhu kondenzátoru a dále poškodily chladicí okruh pro odvod zbytkového tepla. Zároveň tyto vlny zaplavily diesela agregáty nacházející se v suterénu budovy turbíny, čímž je vyřadily z provozu. Zdrojem napájení v této době zbývají už jen baterie s několikahodinovou životností. Chlazení je tedy pak zajišťováno pouze nouzovými systémy. Na bloku č. 1 bylo zajišťováno přirozenou cirkulací vody zkondenzované z vodní páry - viz obr 3.2. Na bloku 2 a 3 bylo zajišťováno turbočerpadlem poháněným parou generovanou ze zbytkového tepla v reaktoru. (obr 3.2)



Obrázek 3.2: Systémy havarijního chlazení [20]

### Blok 1

V aktivní zóně na reaktoru číslo 1 dochází k postupnému úbytku vody, její přeměně na páru a zvyšování tlaku v reaktoru. Vodní hladina klesla k vrchu palivových tyčí po třech hodinách od nouzového odstavení reaktoru a na spodek palivových tyčí se dostala o hodinu a půl později, zhruba v 19:30. Teplota v aktivní zóně roste postupně až ke 2800 °C, což má za následek tavení palivových tyčí. Dochází k extermické reakci zirkoniového pokrytí těchto tyčí s vodní párou za vzniku vodíku:



Tavení palivových tyčí má za následek jejich odpadávání na dno tlakové nádoby. Během tavení tyčí se uvolňují plynné štěpné produkty. Některé tyto štěpné produkty a aerosoly se usazují na stěnách ochranné obálky. Ochranná obálka je v této době poslední bariérou před únikem těchto produktů do okolního prostředí.

Bez možnosti odvodu tepla roste tlak uvnitř ochranné obálky. Ochranná obálka byla stavěna na přetlak 0,4-0,5 MPa, ale přetlak dosáhl až 0,8 MPa. Kvůli vysokému přetlaku bylo nutno vypustit část nahromaděné energie. Dochází ke snížení tlaku v ochranné obálce vypuštěním části plynu do reaktorové budovy. Směs plynů v místnosti obsahovala aerosoly jódu a cesia, vzácné plyny a vodík vzniklý tavením palivových tyčí. Právě velmi hořlavý

vodík vytvořil v budově velmi výbušnou směs, která v 15:36 12. března 2011 způsobila výbuch na servisním patře prvního bloku jaderné elektrárny Fukušima. Výbuchem byla zničena ocelová konstrukce střechy, železobetonová ochranná obálka zůstává neporušena. Pět hodin po výbuchu bylo zahájeno vstřikování mořské vody do aktivní zóny reaktoru [21].

## Blok 2

Na bloku číslo dva selhává chladicí systém reaktoru až 14. března, šest hodin před tím, než je do tlakové nádoby reaktoru vstřikována mořská voda. Vodní sloupec v reaktoru začal velmi rapidně klesat a poškození palivových tyčí začalo kolem 8 hodin ráno. Roztavené palivo začalo podle všeho padat na dno tlakové nádoby zhruba 100 hodin od nouzového odstavení reaktoru. Přetlak z reaktoru byl odpouštěn 13. a 15. března, přičemž byl otevřen i výfukový panel na vrcholu budovy, aby se předešlo výbuchu jako na bloku 1. Pravděpodobně z důvodu výbuchu vodíku je 15. března protržena kondenzační část ochranného kontejnmentu. Protržením této části nastává nekontrolovatelný únik plynů, štěpných produktů a aerosolů [21].

## Blok 3

Na bloku č. 3 selhává chlazení aktivní zóny reaktoru 13. března v ranních hodinách. Vodní sloupec velmi rychle klesá a dochází k tavení aktivní zóny jako u bloku č. 1. Tlak v tlakové nádobě je snižován odvětráváním páry do suché části kontejnmentu a vstřikováním mořské vody s kyselinou boritou. I přes veškerou snahu dochází 14. března v jedenáct hodin dopoledne k výbuchu nahromaděného vodíku v budově. Výbuch poničil střechu, zdi a zdemoloval vrchní část budovy [21].

Tabulka 3.2: Časový sled událostí od zemětřesení [21]

	<b>Blok 1</b>	<b>Blok 2</b>	<b>Blok 3</b>
<b>Ztráta el. energie</b>	+ 51 min	+ 54 min	+ 52 min
<b>Ztráta chlazení</b>	+ 1 hodina	+ 70 hodin	+ 36 hodin
<b>Pokles vody na úroveň vrchu palivových tyčí</b>	+ 3 hodiny	+ 74 hodin	+ 40 hodin
<b>Začátek poškození palivových tyčí</b>	+ 4 hodiny	+ 77 hodin	+42 hodiny
<b>Čerpání vody</b>	+ 15 hodin		+ 43 hodiny
<b>Výbuch vodíku</b>	+ 25 hodin	+ 87 hodin	+ 68 hodin
<b>Čerpání mořské vody</b>	+ 28 hodin	+ 77 hodin	+ 46 hodin
<b>Napájení z vnější sítě</b>		+ 11 – 15 dní	
<b>Chlazení vodou</b>		+ 14 – 15 dní	

## Blok 4

Čtvrtý blok fukušimské jaderné elektrárny byl od 30. listopadu 2010 odstaven z důvodu výměny paliva v reaktoru. Po tsunami byla veškerá pozornost věnována blokům 1, 2 a 3 a provozovateli unikla pozornost kontrolovat bazén vyhořelého paliva na ostatních blocích. Nejvážnější byla situace na čtvrtém bloku, kde bylo v bazénu uloženo vyhořelé palivo poměrně nedávno. Zaplnění bazénu vyhořelého paliva přitom činilo 97 % jeho kapacity a před zasažením vlnou tsunami se zde nacházelo 1 535 palivových tyčí. Chladicí voda měla teplotu 27 °C [22].

Ve 4:08 14. března teplota v bazénu vyhořelého paliva na čtvrtém bloku stoupla na 84°C. V šest hodin ráno 15. března došlo k výbuchu na pátém patře čtvrtého bloku v důsledku nahromaděného vodíku, který se zde naakumuloval pravděpodobně ze společné odvětrávací šachty bloku 3 a bloku 4. Následně zde byl v 9:38 pozorován požár, který zasáhl severozápadní křídlo třetího patra reaktorové budovy [21] [22].

Reaktorová budova je poškozena a 16. března na ní dochází k dalšímu požáru. O den později je pozorován bílý dým, který signalizuje var vody v bazénu vyhořelého paliva. Dne 20. a 21. března je do reaktorové budovy vstříkována voda za pomoci hasičských hadic.

Reaktory jaderné elektrárny Fukušima Daiči se podařilo dostat do studeného stavu až na konci roku 2011. Studený stav, jak už bylo napsáno výše, znamená, že teplota v reaktoru klesla pod 100 °C.

### 3.3. Radioaktivní následky na okolí

V následující podkapitole jsou popsány radioaktivní následky na okolí po havárii v jaderné elektrárně Fukušima Daiči. Nejprve je však nutno popsat, co je to radioaktivita a jak jí měříme.

Radioaktivita je rozpad jader nestabilních nuklidů na jiná jádra, přičemž se uvolňuje záření. Rozeznáváme radioaktivitu přirozenou a umělou. Přirozená radioaktivita pochází z přírodních zdrojů, jako z půdy, skal, vesmíru či také ze živé tkáně. Umělá radioaktivita vzniká činností člověka a je podmíněna přeměnou jádra, která je způsobena vnějším zásahem.

Radioaktivitu popisují některé fyzikální veličiny, jako například efektivní dávka. Ta hodnotí míru zdravotního rizika u člověka, které pro něj představuje záření, jemuž byl vystaven. Jednotkou efektivní dávky je Sievert (Sv). Určité množství efektivní dávky obdrží lidský organismus z přirozeného prostředí planety a tato dávka se na různých místech mění. V České republice je průměr 2,4 mSv za rok, ale v některých částech planety toto číslo sahá i ke stovkám mSv za rok. Právě 100 mSv za rok je taková pomyslná hranice, pro kterou je zvýšení výskytu rakoviny v lidském těle v důsledku záření zanedbatelné. Při dávce kolem 250 mSv se šance na výskyt rakoviny v lidském těle zvyšují o jedno procento. Přírůstek efektivní dávky za jednotku času se pak nazývá dávkový příkon.

Další fyzikální jednotkou popisující radiaci je aktivita. Ta popisuje, kolik částic se z daného zařízení uvolní za jednotku času a její jednotkou je Becquerel (Bq). Tyto veličiny jsou základními veličinami při popisování radioaktivních účinků na své okolí [21].

Během havárie v JE Fukušima Daiči unikla do okolí spousta radioaktivních látek spojených se štěpením uranu. Mezi hlavní patřil izotop jódu-131 s poločasem rozpadu 8

hodin. Dalším radionuklidem uniklým do okolí bylo cesium-137 s poločasem rozpadu 30 let. V půdě se tento prvek může držet spousty let a je to silný gamma zářič. Další je cesium-134 s poločasem rozpadu 2 roky. Cesium je rozpustné a může být vstřebáno lidským tělem, kde se však nehromadí v žádném orgánu a má biologický poločas rozpadu 70 dní [21].

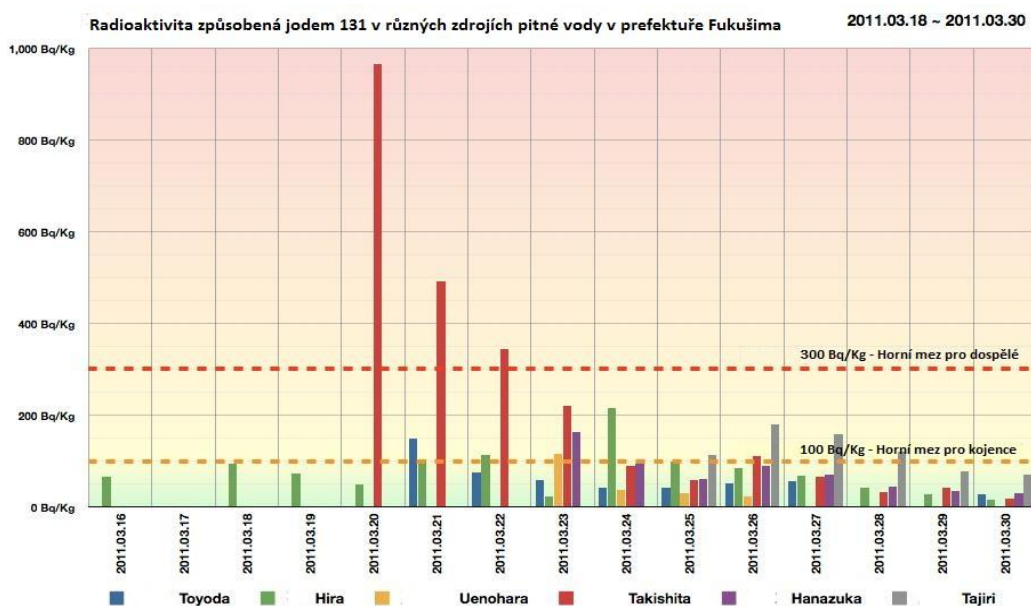
Tato radioaktivita se do okolí dostala vodíkovými explozemi a odpouštěním radioaktivní páry při snižování tlaku v reaktorových nádobách. Většina radioizotopů zůstala v okolí elektrárny a jen malá část se dostala do vyšších vrstev atmosféry, odkud se ve velmi nízkých koncentracích dostala do různých částí planety. Japonské obyvatelstvo nejvíce zajímalo, do jaké míry bude ohrožena bezpečnost obyvatel a bezpečnost zdrojů pitné vody v závislosti na radioaktivitě uniklé z fukušimské elektrárny.

### 3.3.1. Zdroje pitné vody

Japonské limity stanovují hodnotu přípustné aktivity ve vodě na 300 Bq/l u dospělého člověka a 100 Bq/l u kojence. V období mezi 22. a 23. březnem byla naměřena hodnota aktivity v tokijské vodě 200 Bq/l. Vláda proto okamžitě nařídila zákaz užívání pitné vody pro kojence, čímž vyvolala obrovskou poptávku po balené vodě. Tato situace nastala i v prefektuře Čiba, kdy byla v několika případech překročena mezní hodnota pro kojence, vždy ale pouze maximálně na jeden den.

Nejvážnější situace byla v blízkosti elektrárny, konkrétně v prefekturách Ibaraki, Točigi a Fukušima, kde byla několikrát překročena mezní hodnota pro dospělého člověka. Reakcí vlády na to byla nenucená evakuace z 20-30ti kilometrového pásma od elektrárny.

K 31. březnu 2011 byla mezní hodnota pro kojence překročena už jen v okolí vesnice Iitate, vzdálené 40 kilometrů od elektrárny [23].

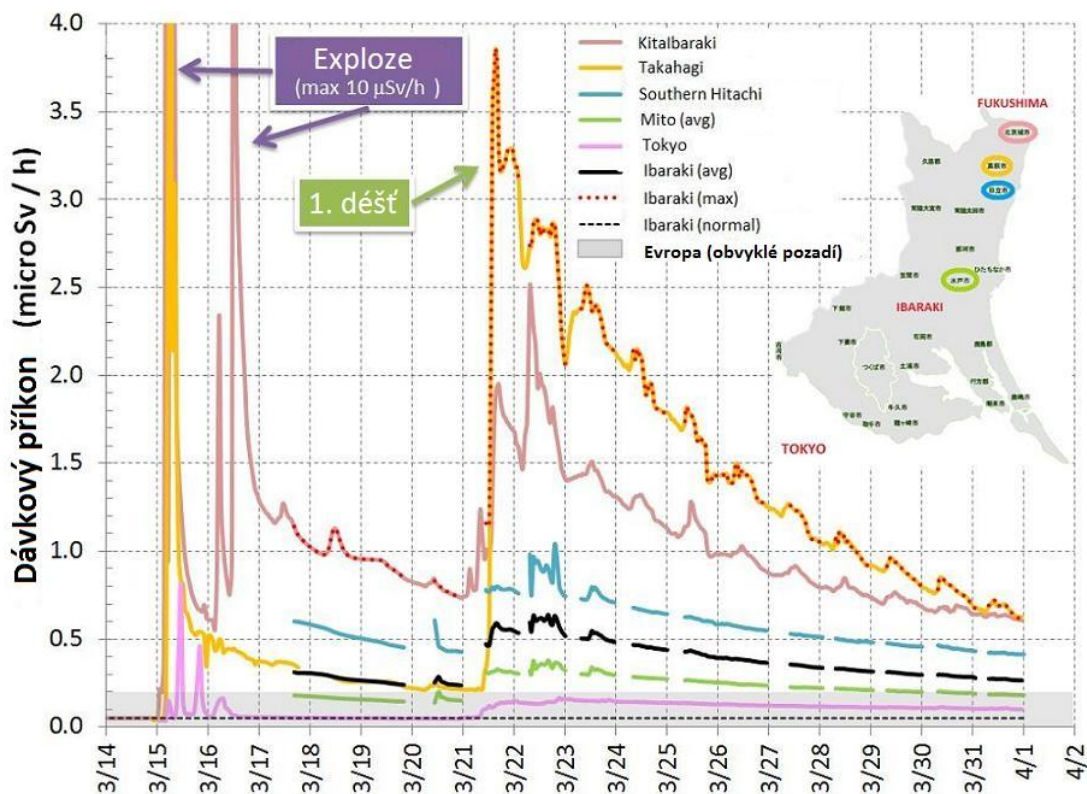


Graf 3.2: Radioaktivita způsobená jódem 131 v různých zdrojích pitné vody v prefektuře Fukušima [24]

### 3.3.2. Dozimetrická situace ve vzdáleném okolí od elektrárny

V návaznosti na události v jaderné elektrárně Fukušima začalo monitorování radiační situace v okolí elektrárny, a nejen v něm. Po výbuších vodíku a odpouštění páry vzrostla asi čtyřikrát hodnota radiace v hlavním městě Japonska, vzdáleném zhruba 200 kilometrů od elektrárny. Hodnota dávkového příkonu činila 0,14 mikrosievertů za hodinu místo obvyklých 0,036 mikrosievertů za hodinu dávkového příkonu přírodního pozadí. Tento dávkový příkon poté začal exponenciálně klesat a i ve svém maximu byl nižší než dávkový příkon přírodního pozadí v některých místech Evropy, což znamená, že někteří Evropané byli vystaveni většímu dávkovému příkonu než obyvatelé Tokia.

Na následujícím grafu je ukázán vývoj radiační situace v místech, která jsou vzdálenější od elektrárny. Z grafu je patrné, jak tuto situaci ovlivnily události v JE Fukušima a jak ji ovlivnil následný první dešť, který stáhl radionuklidy z atmosféry na zem [23].



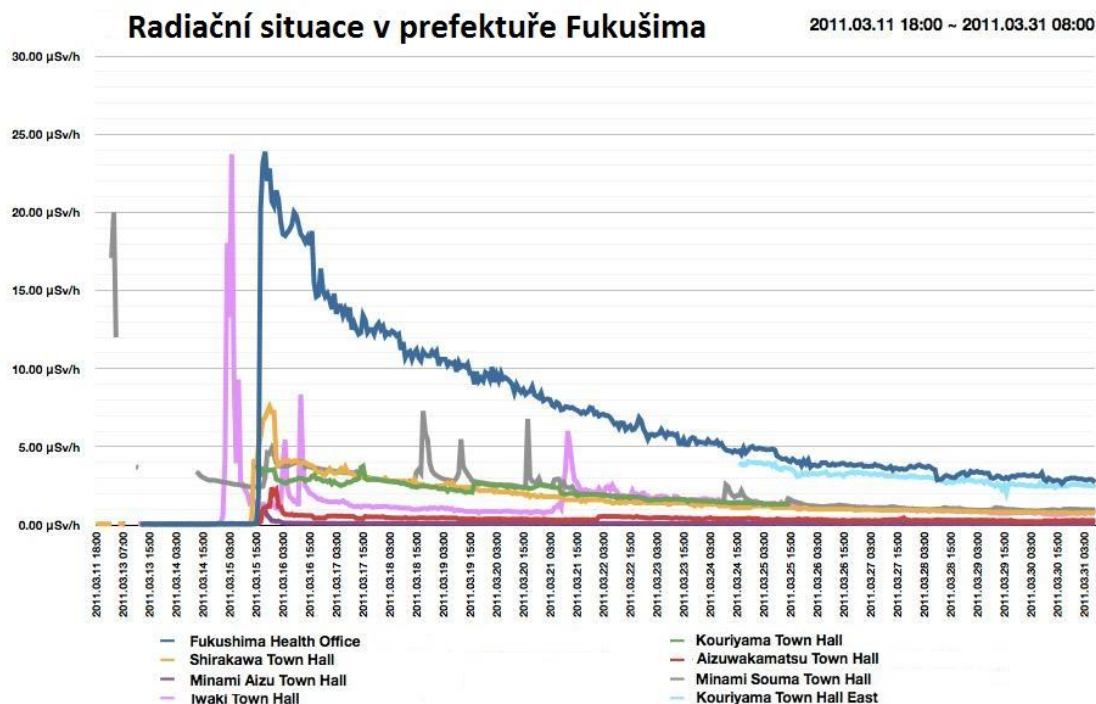
Graf 3.3: Dávkový příkon v oblastech více vzdálených od elektrárny Fukušima Daiči [25]

Na grafu je také zřetelně vidět, jak dochází k exponenciálnímu poklesu dávkového příkonu z několika desítek na desetiny mikrosievertu za hodinu. Hlavní roli v tomto poklesu hraje rozpad izotopu jódu 131, jehož množství se rychle snižuje v řádu několika dnů.

V oblastech nacházejících se v blízkosti areálu elektrárny byla situace o něco vážnější. Dávkový příkon zde většinou dosahoval hodnot kolem deseti mikrosievertů za hodinu, ale v některých případech byla hodnota překročena až na 40 mikrosievertů za hodinu. Jednalo se o vesnici Iitate Mura. Dávkový příkon začal nicméně velmi rychle klesat a radiace, které byli obyvatelé zasažené prefektury Fukušima vystaveni, nebude mít vliv na jejich zdraví, neboť je to dávka srovnatelná s dávkou, kterou přijme lidské tělo



z přirozeného pozadí. V následujícím grafu jsou ukázány hodnoty dávkového příkonu v závislosti na čase v prefektuře Fukušima. [23]



Graf 3.4: Radiční situace v prefektuře Fukušima [26]

Studie publikovaná loňského listopadu zabývající se velikostí dávky, kterou obdrželi obyvatelé z evakuovaných oblastí, a kteří se v prvních čtyřech měsících zdržovali nejvíce v zasažené oblasti, nám dává následující výsledky. Pouze u deseti lidí z 1700 byla překročena hranice 10 milisievertů, přičemž nebyla překročena hranice 15 milisievertů. U 98% zkoumaných lidí nebyla překročena hranice 5 milisievertů [27].

### 3.3.3. Dozimetrická situace v nejbližším okolí elektrárny a v elektrárně

#### Blízké okolí elektrárny

Maximální dávkový příkon naměřený u bran Fukušimské elektrárny se blížil hodnotě 300 mikrosievertů za hodinu. Od 20. března tato hodnota klesala, za což může radionuklid jódu 131 s krátkým poločasem rozpadu a k začátku dubna činila tato hodnota u hlavní fukušimské brány už jen 150 mikrosievertů za hodinu. U západní brány elektrárny hodnota dávkového příkonu byla kolem 50 mikrosievertů za hodinu.

Jedním z problémů v okolí elektrárny byl únik radioaktivní vody do moře, na což se zaměřila světová media a dělala z toho katastrofu biblických rozměrů. Je pravda, že povolené limity byly překročeny až 4000krát, ale nastavený limit je 50 Bq/l, což je polovina povoleného limitu, kterou může obsahovat voda pro kojence. V obrovské mase mořské vody se proto velmi rychle tato voda zředila a nepředstavovala žádné nebezpečí. Navíc i zde byl velmi rychlý rozpad radionuklidu jódu 131.

## **Elektrárna**

Závažným problémem v elektrárně činila nahromaděná radioaktivní voda. Tato voda se usadila v turbínových halách bloků 1, 2 a 3 a bylo nejprve potřeba prostory dekontaminovat, než se mohlo přistoupit k opravným pracím a kontrolám na halách. Nejzávažnější byla situace na bloku 2, kde byl naměřen dávkový příkon této vody 1000 mikrosievertů za hodinu.

## 4. Současný stav jaderné elektrárny Fukušima Daiči

V prosinci loňského roku došlo k vytvoření plánu na likvidaci čtyř bloků jaderné elektrárny Fukušima Daiči; likvidace proběhne ve třech etapách. První etapa proběhne mezi léty 2012 a 2015 a jejím úkolem bude připravit podmínky pro odstranění palivových článků z bazénů vyhořelého paliva. V další fázi pak má být dokončeno jejich vyklizení z bazénů. Tato druhá fáze proběhne v letech 2015 až 2021. Dále při ní budou opraveny kontejnmenty jaderných bloků a následně naplněny vodou z důvodu odstínění radiace v nich. Od roku 2022 se plánuje odstraňování roztaveného paliva z aktivních zón reaktorů. Úplná likvidace všech čtyř bloků by měla proběhnout do čtyřiceti let.

První etapa plánu likvidace čtyř bloků JE Fukušima už započala odstraňováním trosek vně a uvnitř reaktorových budov 3 a 4, čímž se zlepšila dozimetrická situace v těchto místech.

Na začátku tohoto roku byl v elektrárně odvolán výjimečný stav, který byl vyhlášen po vlně tsunami [28].

### 4.1. Stav k dubnu 2012

Situace v jaderné elektrárně Fukušima Daiči je v současné době plně stabilizována. Teplota vody v reaktorech je udržována pod teplotou 50 °C. To je realizováno čerpáním 6 tun vody za hodinu do reaktorové nádoby, kde i nadále stále probíhá radioaktivní rozpad prvků, které tvoří u prvního bloku tepelný výkon 0,6 MW a u druhého a třetího bloku 0,9 MW.

Chladičí voda je po průchodu reaktorem odsolována, dekontaminována a znovu použita na chlazení. Do budoucna se počítá se zlepšením kvality odsolování a dekontaminace systému. Lepší odsolování pravděpodobně zmírní praskání trubek a únik vody, ke kterému čas od času dochází. Příkladem je situace ze začátku dubna, kdy uniklo 12 tun kontaminované vody, z čehož se část mohla dostat kanalizací až do moře. Lepší dekontaminace zase počítá s odstraňováním i jiných radioizotopů než jen izotopů cesia 137 a 134, jako tomu bylo doposud [29].

Ve všech třech zasažených reaktorech byl spuštěn systém pro kontrolu atmosféry v primárním kontejnmentu a ten zde udržuje přebytek dusíku, aby bylo zamezeno dalším výbuchům vodíku v případě, že by se znovu v kontejnmentu objevil. Dalším úkolem tohoto systému je jak filtrace vzduchu uvnitř kontejnmentu a zbavování ho radioizotopů, tak i následný rozbor izotopů, které se zde nacházejí. Z tohoto rozboru je sledováno množství xenonu obsažené v něm. Zvýšený obsah xenonu 135 s poločasem rozpadu 5,2 dne a xenonu 133 s poločasem rozpadu 9 hodin by totiž mohl znamenat, že v reaktoru probíhá znovu řetězová reakce [30].

Zemina v některých místech elektrárny je pokrývána fixační vrstvou, aby nedošlo k jejímu spláchnutí do moře, neboť obsahuje radioaktivní látky. Lodě obsahující dekontaminační zařízení byly nasazeny na filtraci vody mezi vlnolamy.

Neradioaktivní odpad je likvidován v malé spalovně, která byla postavena v areálu elektrárny.

### Stav bazénů s vyhořelým jaderným palivem

V současnosti jsou všechny bazény jaderné elektrárny Fukušima Daiči zbavovány radioaktivity a chlazeny. V průběhu několika dalších měsíců budou zbaveny všech trosek, které do nich napadaly a bude zjištěn stav vyhořelého paliva v nich uloženého.

Do bazénu vyhořelého paliva čtvrtého bloku byla už několikrát spuštěna kamera, která v něm ukázala řadu troskek (obr. 4.1), ale i to, že palivové tyče jsou pravděpodobně neporušeny. V nedávné době byla spuštěna kamera i do bazénu třetího bloku, kde ukázala, že situace je zde poněkud horší než u bloku čtvrtého. V bazénu se nachází značné množství troskek včetně jeřábového soustrojí, které sloužilo pro manipulaci s palivem.

Než bude moct být palivo z těchto bazénů odstraněno, bude zapotřebí zajistit odklizení všech troskek, které by mohly při odstraňování překážet a také zajistit postavení provizorní jeřábové soustrojí, které umožní vyndání troskek paliva z bazénu. Dalším krokem bude také provizorní oprava stěn a zastřešení objektu, čímž se zabrání pronikání dešťové vody dovnitř a radiace ven.

V současnosti je vypracován plán na zastřešení části čtvrtého bloku, kdy se bude zastřešovat pouze část nad bazénem s vyhořelým palivem. U čtvrtého bloku není třeba zastřešovat celou budovu, jelikož z tlakové nádoby reaktoru bylo palivo vyvezeno a není potřeba v této části prozatím pracovat. Od 17. dubna je u reaktorové budovy umístěn jeřáb, který odklízí trosky z horní části a připravuje ji na zastřešení. Následovat bude poté odklizení troskek a později vyndání palivových tyčí z bazénu. Vyndání palivových tyčí z bazénu bude uskutečněno, až bude hotova konstrukce zastřešující bazén vyhořelého paliva. Důležitá je také konstrukce bazénu, kam bude postupně vyzdvihávané palivo ukládáno, než bude převezeno na místo, kde bude trvale uloženo.

Podobný postup likvidace vyhořelého paliva z bazénů bude pokračovat i na dalších blocích jaderné elektrárny Fukušima [29].



Obrázek 4.1: Trosky v bazénu vyhořelého paliva na třetím bloku [31]

Jedině u druhého reaktoru nebyla zničena střecha reaktorové budovy, a proto tam byl koncem února poslán robot Quince 2, aby zjistil stav v horní části budovy. Tento robot

je bezdrátový, a tak nehrozí nebezpečí, že by se zamotal do kabelů jako jeho předchůdce Quince 1 nasazený v elektrárně v červnu 2011. Díky jeho výsledkům je možné plánovat odstraňování palivových prutů z bazénu vyhořelého paliva. Výhodou je, že horní část reaktorové budovy vypadá nepoškozeně, avšak nevýhodou zůstává, že radioaktivita v této části budovy je značně vysoká a v řádech stovek milisievertů za hodinu, což bude muset být do daných plánů zohledněno [32].

### **Stavy kontejnmentů**

Ještě než začne probíhat likvidace reaktorů, je nutné zjistit jejich stav a zároveň stav kontejnmentů, ve kterých jsou uloženy. Podle míry poškození pak mohou být přijata následná opatření, která povedou k plánování likvidace jednotlivých bloků. Nejdůležitější je zjistit, jestli tavení paliva v aktivní zóně nemělo za následek poškození tlakové nádoby či primárního kontejnmentu

Kontejnment druhého bloku byl zkoumán pomocí endoskopu, který byl do něj zaveden skrze úzký otvor v něm vyvrtaný. Až na několikátý pokus bylo zjištěno, že hladina vody v primárním kontejnmentu dosahuje pouze výšky šedesáti centimetrů, což je méně než se předpokládalo, a potvrdilo to pouze předpoklad, že vodíková exploze poškodila těsnost kontejnmentu. Z poškozeného druhého bloku také uniklo do okolí největší množství radiace. Vzhledem k vysokému dávkovému příkonu na druhém bloku, který je v některých místech až 100 milisievertů za hodinu, mohou pracovníci elektrárny prozkoumávat dané oblasti jen velmi omezeně [30].

V březnu se skupina pracovníků pokusila zjistit stav komory potlačení na druhém a třetím bloku. Na blocích se nacházeli pouhých dvacet minut a podařilo se jim otevřít vrata od komory potlačení na druhém bloku, kde naměřili dávkový příkon 160 milisievertů za hodinu. U třetího bloku se jim tato vrata otevřít nepodařilo [33].

V polovině dubna byl do budovy druhého bloku vyslán robot vybavený pěti kamerami s úkolem prozkoumání komory potlačení a stavu primárního kontejnmentu. Robot k 21. 4. 2012 prozkoumal pouze určité části a zjistil překvapivě jejich dobrý stav. Není tedy známo, kde se nachází poškození kontejnmentu, které je třeba opravit, aby mohl být primární kontejnment a reaktorová nádoba naplněny vodou, a tím byla odstíněna radiace. Stejně prohlídky je třeba udělat i na prvním a třetím reaktoru, u čtvrtého reaktoru tyto prohlídky nejsou zapotřebí [29].

## 5. Jaderné havárie

Závažnost jaderných havárií je posuzována podle stupnice INES (The International Nuclear Event Scale), která byla vypracována Mezinárodní atomovou agenturou IAEA po havárii v jaderné elektrárně Černobyl. Důvodem vzniku této stupnice byla nutnost sjednotit a zjednodušit klasifikaci jaderných havárií. Klasifikace INES má sedm stupňů, přičemž první tři stupně jsou klasifikovány jako porucha a zbývající čtyři jako havárie.

- Stupeň 0 - událost pod stupnicí
- Stupeň 1 - odchylka
- Stupeň 2 - porucha
- Stupeň 3 - vážná porucha
- Stupeň 4 - havárie s účinky v jaderném zařízení
- Stupeň 5 - havárie s účinky na okolí
- Stupeň 6 - závažná havárie
- Stupeň 7 - velká havárie

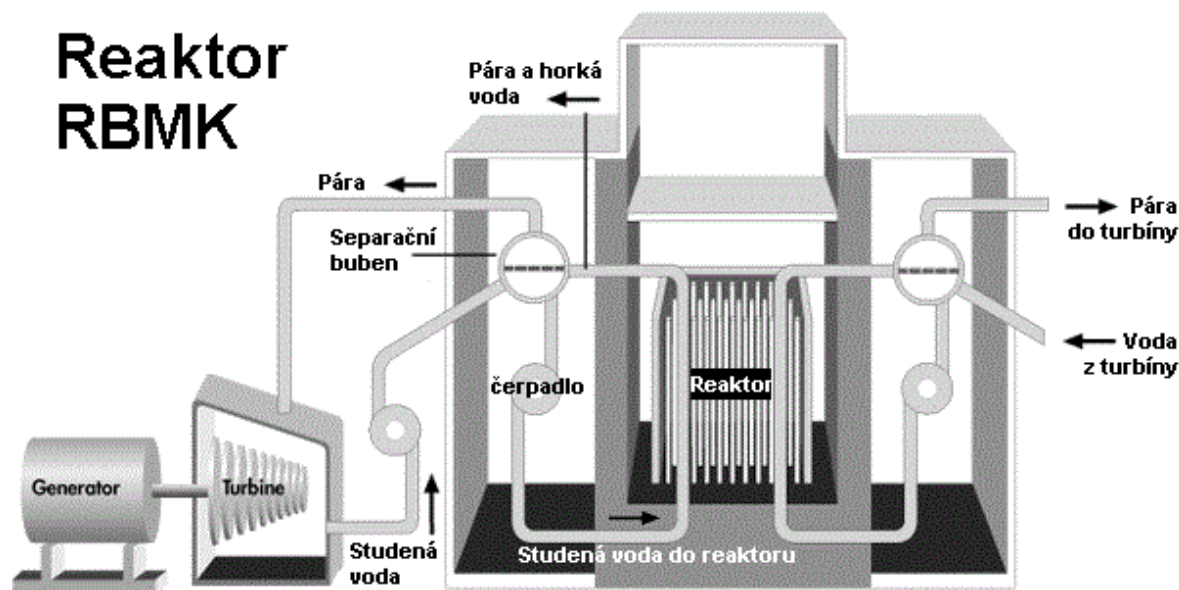
Havárie v jaderné elektrárně Fukušima Daiči si vyžádala stupeň havárie sedm. Sedmý stupeň je nejméně vážný a vyznačuje se únikem radioaktivních látek z aktivní zóny reaktoru do okolí mimo elektrárnu. Tyto látky mohou mít okamžitý dopad na obyvatelstvo žijící v okolí elektrárny a zasažená oblast značně přesahuje rozlohu elektrárny a má obrovský dopad na životní prostředí v této oblasti. Kromě havárie v jaderné elektrárně Fukušima Daiči získala stupeň 7 už jen havárie v jaderné elektrárně Černobyl, a právě proto jsou tyto dvě havárie srovnávány.

Jedním z důvodů vzniku stupnice INES byla snaha usnadnit veřejnosti orientaci v jaderných haváriích. V souvislosti s havárií v elektrárně Fukušima Daiči však vyvolala zmatení, neboť ohodnocení havárie stupněm 7 mnoho lidí pochopilo, že dochází k havárii stejného rozsahu jako v Černobylu. Jaderná havárie v Černobylu byla však mnohem závažnější a kdyby byl rozsah stupnice INES větší a podrobnější, určitě by byla tato havárie mnohem výše v této stupnici než havárie ve Fukušimě.

### Jaderná elektrárna Černobyl a černobylská havárie

Bývalá jaderná elektrárna Černobyl se nachází na Ukrajině dva kilometry od města Pripjat' a 110 kilometrů severně od hlavního města Kyjeva. Areál elektrárny se skládal ze čtyř reaktorů typu RBMK 1000, které byly postupně spuštěny v letech 1977, 1978, 1981 a 1983, a dalších dvou reaktorů stejného typu, které byly teprve rozestavěny [34].

Reaktor RBMK je reaktor ruské konstrukce a tyto reaktory byly provozovány pouze v zemích bývalého Sovětského svazu. Zkratka RBMK znamená „reaktor bolšoj moščnosti kanalnyj“ čili kanálový reaktor vysokého výkonu. Charakteristické pro tento reaktor je umístění palivových článků v samostatných kanálech a použití grafitu jako moderátoru štěpné reakce. Jako chladivo je zde použita voda, která proudí jednotlivými kanály. Palivem je mírně obohacený uran ve formě oxidu uraničitého. Nevýhodou tohoto typu reaktoru je, že nemá tlakovou nádobu a také že v případě nechtěného zvýšení paliva se projevuje kladný výkonový koeficient reaktivity. Po havárii v jaderné elektrárně Černobyl byly další výzkum a výstavby tohoto typu reaktoru zastaveny [35].



Obrázek 5.1: Schéma principu elektrárny s reaktorem RBMK [36]

K havárii v jaderné elektrárně Černobyl došlo 26. dubna 1986 kolem půl druhé hodiny ráno na čtvrtém reaktoru. Jaderná havárie vznikla při experimentu, který byl naplánován těsně před pravidelným odstavením reaktoru z důvodů údržby. Účelem experimentu byla zkouška, která ověřovala setrvačný doběh turbogenerátoru. Následkem tohoto nepovedeného experimentu dochází k výbuchu na čtvrtém bloku a vyvržení jaderného paliva do vnějšího okolí elektrárny.

### Rozdíly mezi oběma haváriemi

Prvním zásadním rozdílem mezi těmito haváriemi je skutečnost, že za havárii v JE Fukušima Daiči může živelná katastrofa (zemětřesení a tsunami), zatímco u JE Černobyl selhal lidský faktor. Dalším rozdílem jsou i následky na vnější okolí elektrárny. Zatímco u Fukušimy nebyl dávkový příkon radiace jeden mikrosievert za hodinu překročen už sto kilometrů od havárie, byl v případě Černobylu naměřen i na některých místech České republiky vzdálených tisíce kilometrů od havárie.

Narozdíl od Černobylu bylo japonské obyvatelstvo v postiženém okolí včas evakuováno, dříve než se radioaktivní spad dostal do okolí. V případě Černobylu tomu bylo naopak a evakuace proběhla, teprve když byly radioaktivní látky vyvrženy do okolí.

Jedním z nejdůležitějších rozdílů jsou však následky na obyvatelstvu. Po havárii v Černobylu byla diagnostikována nemoc z ozáření u 237 lidí, přičemž u 134 z nich byla tato diagnóza potvrzena. Osmadvacet z nich posléze na nemoc z ozáření zemřelo. Další dvacet poté zemřelo na následky chorob spojených s vystavením se příliš velkému množství radiace. Dva lidé zemřeli při samotné havárii a jeden člověk je pohřešován, ale pravděpodobně zahynul při havárii také. Další 4000 zemřelo podle předpokladů na různé choroby spojené s ozářením v průběhu dalších let a předpokládá se, že 4000 dětí, které se nadýchaly radioaktivního spadu, onemocnělo rakovinou štítné žlázy. Ve Fukušimě byla situace značně rozdílná. Zemřeli pouze dva pracovníci elektrárny, a to v důsledku zasažení objektu vlnou tsunami. V současné době nejsou známé žádné oběti způsobené radiací, pouze dva dělníci museli být hospitalizováni, protože utrpěli popáleniny od beta záření. Zhruba u sta dělníků, kteří byli vystaveni záření, došlo k nízkému zvýšení pravděpodobnosti výskytu rakoviny štítné žlázy zhruba o dvě procenta. Další dva dělníci

se nadýchali radioaktivního jódu a pravděpodobnost výskytu rakoviny je u nich o něco větší [37].

V následující tabulce jsou shrnuta některá důležitá fakta o obou haváriích.

Tabulka 5.1: Základní porovnání havárií ve Fukušimě a v Černobylu

Černobyl	Fukušima Daiči
<ul style="list-style-type: none"><li>• Havárií byl zasažen jeden reaktor</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Havárií byly zasaženy tři reaktory a bazény s vyhořelým palivem</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Selhání lidského faktoru</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Přírodní katastrofa</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Evakuace začala až 36 hodin po havárii</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Evakuace proběhla dříve než mohlo být obyvatelstvo vystaveno radioaktivnímu spadu</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• 28 lidí zemřelo na nemoc z ozáření</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Nejsou známé žádné oběti na nemoc z ozáření</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• O průběhu havárie nebyly žádné informace, jelikož Sovětský svaz vše tajil</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• O průběhu havárie bylo obyvatelstvo velmi pečlivě informováno</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Radioaktivní spad zasáhl velmi rozsáhlé okolí</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Radioaktivní spad zasáhl nejbližší okolí elektrárny</li></ul>



## 6. Následná opatření v jednotlivých zemích

Následující kapitola bude věnována opatřením v jednotlivých zemích v návaznosti na události v jaderné elektrárně Fukušima Daiči. Evropské země využívající jadernou energetiku byly nuceny vykonat po této havárii řadu zátěžových testů, aby mohly neodborné veřejnosti dokázat, že události, které se staly v Japonsku, se nebudou opakovat také v jejich zemi. U mimoevropských zemí dochází také ke kontrole jaderných zařízení.

### 6.1. Zátěžové testy

Ihned po havárii v jaderné elektrárně Fukušima dochází k jednání mezi představiteli Evropské komise s národními jadernými dozory členských států EU. Rovněž také dochází k diskusi mezi Asociací západoevropských jaderných dozorů (WENRA) a Vysoké skupiny pro jadernou bezpečnost (ENSREG). Cílem těchto jednání je domluva o nutnosti zhodnocení stavu evropských jaderných elektráren vůči extrémním situacím, které můžou nastat.

Po společném vyjednávání je rozhodnuto, že jaderné elektrárny v rámci Evropské unie musí podstoupit řadu zátěžových testů (Stress tests) zaměřených na velmi výjimečné situace, které by mohly při jejich chodu nastat. Těmito výjimečnými situacemi jsou myšleny přírodní katastrofy, jako jsou zemětřesení či povodně a následné vyhodnocení důsledků, které mohou vyvolat. Požadavek Evropské komise IP/11/640 na vykonání zátěžových testů byl zaslán členským státům 24. 5. 2011. O den později byl požadavek o vykonání těchto testů zaslán Státním úřadem pro jadernou bezpečnost provozovateli jaderných elektráren [38].

Základním cílem zátěžových testů bylo:

- Zjistit, jak může být bezpečnost jaderné elektrárny ovlivněna chybami v projektu.
- Zjistit, jak může být bezpečnost jaderné elektrárny ovlivněna výběrem lokace.
- Zjistit odolnost jaderných elektráren vůči extrémním přírodním událostem, a to i takovým, které v dané lokalitě můžou vzniknout pouze teoreticky, ale nikoliv prakticky.
- Zjistit, jaké jsou časové rezervy než nastane maximální myslitelná havárie.
- Zjistit možná aplikovatelná opatření pro zvýšení těchto časových rezerv

Hlavní myšlenkou stress testů však není potvrdit, že jaderné elektrárny jsou bezpečné, ale zjistit, jaká jsou možná další opatření, aby byly tyto elektrárny ještě bezpečnější. Je tedy nadmíru jasné, že fukušimská havárie přinesla nový pohled na bezpečnost jaderných zařízení.

### 6.2. Zátěžové testy v ČR

V České republice podstoupily zátěžové testy JE Dukovany spuštěná do provozu roku 1985 a jaderná elektrárny Temelín spuštěná do provozu roku 2003. JE Dukovany obsahuje čtyři reaktory VVER 440 a JE Temelín dva reaktory VVER 1000. Při výkonu

těchto testů probíhala setkání s provozovateli jiných elektráren s reaktory typu VVER jak v rámci Evropské unie tak i mimo ni.

### 6.2.1. Dukovany

U jaderné elektrárny Dukovany nebyly nalezeny hrozby, které by vyžadovaly okamžitý zásah na elektrárně. Elektrárna je schopna přečkat i velmi nepravděpodobné přírodní katastrofy, aniž by bylo ohroženo okolí elektrárny. Výsledky zprávy byly takovéto [39]:

*„Silné stránky ochrany:*

- *Oblast s minimálním rizikem zemětřesení*
- *Oblast, kde prakticky nehrozí záplavy*
- *Elektrárna má dvě velké nádrže na surovou vodu*
- *V elektrárně se nachází velké množství chladicí vody*
- *Vnější zdroje elektrické energie jsou vícenásobně zajištěny*
- *Kompaktní bazény skladování vyhořelého jaderného paliva zajišťující podkritičnost paliva i při zaplavení čistou vodou*
- *Velký objem kontejnmentu – hermetických prostor (barbotážní systém) a relativně menší zdrojový člen (nižší výkonové parametry reaktoru)*
- *Projekty prochází stálou kontrolou*

*Nalezená rizika:*

- *Rizika při extrémních atmosférických podmínkách (extrémní vítr, ztráta napojení na vnější elektrickou síť)*
- *Lokální rizika z interních záplav (např. při velmi silných přivalových deštích a selhání odvodu těchto vod z areálu)*
- *Rizika při narušení infrastruktury v okolí – střídání směn, evakuace, telekomunikace...*
- *Rizika při těžkém poškození celé lokality – dostupnost techniky, personál, přístupy, kryty...“*

### 6.2.2. Temelín

U jaderné elektrárny Temelín stejně tak jako u Dukovan nedošlo ke zjištění nějaké vážné hrozby, kterou by bylo nutno bez prodlení řešit. Výsledky zprávy byly takovéto [39]:

*„Silné stránky ochrany:*

- *Vhodně vybrána lokalita – seizmicky a klimaticky stabilní oblast, málo osídlená, s dostatečným zdrojem surové vody*
- *Lokalita vylučující vnější záplavy*
- *Projekt, který prochází stálou mezinárodní kontrolou nad rámec obvyklý u jiných provozovatelů jaderných zařízení*
- *Velká zásoba chladicí vody uvnitř elektrárny*
- *Umístění bazénu použitého paliva uvnitř kontejnmentu*

- *Vícenásobné zajištění vnějších zdrojů elektrické energie*

*Nalezená rizika*

- *Vysoké měrné výkony aktivní zóny reaktorů a z toho vyplývající menší časové rezervy pro obnovení bezpečnostních funkcí po jejich ztrátě*
- *Rizika kumulace vodíku při nadprojektové havárii*
- *Rizika při extrémních atmosférických podmínkách (zamrzání nafty ve vnějších zásobních nádržích, ztráta napojení na vnější energetickou síť)*
- *Lokální rizika z interních záplav*
- *Rizika při narušení infrastruktury v okolí – střídání směn, evakuace, telekomunikace...*
- *Rizika při těžkém postižení celé lokality – dostupnost techniky, personál, přístupy, kryty...“*

Výsledky zátěžových testů jaderných elektráren v rámci Evropské unie v současnosti ještě nejsou známé a měli by být zveřejněny v polovině letošního roku 2012 [40].

## 7. Jaderná energetika po Fukušimě

### 7.1. Evropa

#### Finsko

Finsko i nadále po událostech v Japonsku zůstává věrné jaderné energetice. V průběhu loňského května došlo k vylepšení druhého bloku elektrárny Olkiluoto, kde došlo ke zlepšení bezpečnostních a výkonnostních parametrů. Elektrický výkon byl zvýšen z 860 na 880 MW. Dále dochází k dokončujícím a spouštěcím pracím na třetím reaktoru této elektrárny, který na rozdíl od prvních dvou typu BWR patří do kategorie EPR. Spuštěn by měl být roku 2013. Dále započalo plánování dostavby čtvrtého bloku na této elektrárně. Ke snížení závislosti na fosilních palivech a dodávkách elektřiny z Ruska je plánována výstavba třetí jaderné elektrárny [41].

#### Francie

Ve Francii není plánován odstup od jaderné energetiky. Jaderná společnost EDF vlastní jaderné elektrárny ve Francii provádí jejich modernizaci a zvyšuje jejich efektivitu využívání. Francie vyrábí 63 GW elektrické energie z jaderných zdrojů. V současnosti se ve Francii dostavuje reaktor typu EPR ve Flamanville. Další stejný reaktor je v plánu postavit na třetím bloku elektrárny Penly. V současnosti má Francie přebytek elektrické energie, kterou od ní odebírá především Itálie [41].

#### Velká Británie

Velká Británie bude nadále pokračovat ve svém jaderném programu. Toto plyne z oficiálního prohlášení ministra pro energetiku a klimatické změny Chrise Huhneho. Británie má v plánu výstavbu až osmi nových jaderných bloků.

V jaderné elektrárně Oldbury už byly odstaveny dva reaktory typu Magnox a budou nahrazeny novými. Budou to dva reaktory typu EPR nebo tři reaktory typu AP1000. V nejbližších letech by ve Velké Británii měli být odstaveny nejstarší jaderné reaktory a měly by být nahrazeny novými do roku 2025. Plán je nahradit současných 11 GW elektrické energie z těchto elektráren 19 GW elektrické energie z nově postavených. O výstavbu nových reaktorů se velmi uchází francouzská firma EDF [42].

#### Německo

Po havárii ve Fukušimě bylo v Německu zavřeno sedm nejstarších jaderných elektráren postavených před rokem 1980. Dále byl odstaven jaderný reaktor elektrárny Krümmel, který byl uveden do provozu roku 1984. Na tomto reaktoru se v poslední době objevovaly problémy při provozu. Německo bude postupně zavírat i ostatní jaderné elektrárny a bude přecházet na obnovitelné zdroje energie. Část jejich produkce bude ovšem muset nahradit fosilními zdroji energie.

#### Španělsko

Španělsko je země, která odmítá výstavbu jaderných elektráren, ale podporuje spolupráci svých jaderných společností na výstavbách jaderných elektráren v zahraničí.

#### Rakousko

Rakousko je dlouhé roky odpůrcem jaderné energetiky. V souvislosti s událostmi v jaderné elektrárně Fukušima zvýšilo Rakousko svůj tlak na Českou republiku a Slovensko.

## Švýcarsko

Švýcarská vláda v závislosti na snížení důvěry obyvatel v jadernou energetiku rozhodla dne 25. 5. 2011 o odstavení svých jaderných reaktorů do roku 2034. Uvedla, že nebude uzavírat žádnou jadernou elektrárnu před koncem její životnosti a rovněž, že nebude plánována výstavba nových.

## Itálie

Po událostech v jaderné elektrárně Fukušima Daiči se Italové rozhodli o nezrušení zakazu výstavby jaderných elektráren na jejich území. I nadále jsou odkázáni na dodávkách elektrické energie především z Francie a na energii produkované z vlastních fosilních zdrojů, která činí 80% vlastní produkce.

## Rusko

V listopadu roku 2011 byl v Kalininské jaderné elektrárně spuštěn čtvrtý blok s reaktorem typu VVER-1000. Dále se dostavuje třetí a čtvrtý blok jaderné elektrárny Rostov, které by se měly spouštět v roce 2014 a 2016.

V jaderné elektrárně Novovoronež II se budují dva reaktory pokročilé generace III+ VVER-1200 (varianta 392M). Varianta 491 reaktoru VVER-1200 se začíná budovat v jaderné elektrárně Leningrad II. Znamená to, že ke dvěma rozestavěným blokům se přidává ještě výstavba třetího bloku. Právě varianta 491 reaktoru VVER-1200 je zapojena i do tendru o dostavbu jaderné elektrárny Temelín.

V roce 2011 započaly zemní práce na jaderné elektrárně Baltik, kde budou dva bloky s již zmíněnými reaktory typu VVER-1200. Tato elektrárna je situována v Kaliningradské oblasti a bude zde kompenzovat nedostatek elektrické energie z důvodu odstavení litevské jaderné elektrárny Ignalia. Jaderná elektrárna Baltik spolu s nově budovanou Ostrovetskou jadernou elektrárnou v Bělorusku by měly také exportovat elektrickou energii do Polska a Německa.

V Rusku je dále rozpracována příprava čtrnácti bloků, ale navrhuje se i další místa. Většinou se bude jednat o instalaci již zmíněných VVER-1200. Rusko také plánuje dodávat elektrickou energii do Evropské unie.

Rusko však nestaví elektrárny pouze na svém území, ale má také snahu se účastnit dalších zahraničních zakázek. Za zmínku stojí zapojení se do budování čínského rychlého reaktoru chlazeného sodíkem či do stavby druhého reaktoru v iránské jaderné elektrárně Búšehr. Další zakázky má Rusko například v Turecku a jiných rozvíjejících se státech [40].

Cíle Rusů i po havárii v JE Fukušima tedy zůstávají stejné, a to zvýšit podíl jaderné energetiky z 16% na 25-30%. Finanční i státní podpora jaderného průmyslu je stále silná, a proto můžeme mluvit o jaderné renesanci v Rusku [43].

V současnosti se v rámci Evropské unie dostavují nové bloky ještě na třech místech. Dva bloky se dostavují ve slovenském Mochovci. Dva reaktory typu VVER 440 doplní dva stávající reaktory stejného typu.

Ruský Atomstrojexport pokračuje ve snaze dokončit jadernou elektrárnu Belena v Bulharsku. Třetím místem je dostavba jaderné elektrárny Cernavoda v Rumunsku, kde se hledá investor pro dostavbu dvou bloků s reaktory typu Candu-6.

O jaderné elektrárně přemýšlí i Polsko, které 91% své elektrické energie produkuje z uhelných elektráren. Zatím byly navrženy tři potenciální lokality pro výstavbu, a to: Zarnowiec, Choczewo a Gaski [42].

## 7.2. Jihovýchodní Asie

Fakt, že většina spuštěných reaktorů v loňském roce byla právě v oblasti jihovýchodní Asie, dává jasně najevo, že jaderná energetika na tomto kontinentu zůstává i nadále v rozkvětu. Především pak v Číně a v Indii.

### Čína

V loňském roce 2011 byly v Číně spuštěny tři nové bloky jaderných elektráren. Jedním z nově spuštěných je rychlý reaktor CEFR (China Experimental Fast Reactor).

Dalším reaktorem spuštěným v Číně byl reaktor na čtvrtém bloku jaderné elektrárny Ling Ao. Tento reaktor je stejně jako předchozí třetí spuštěný roku 2010 typu CPR-1000, který je čínskou variantou tlakovodních reaktorů původně francouzské konstrukce.

Posledním spuštěným reaktorem je reaktor na čtvrtém bloku jaderné elektrárny Qinshan. Tento reaktor je typu CNP-600 [42].

Další jaderné bloky jsou dále v Číně plánovány. V říjnu loňského roku bylo rozhodnuto o dostavbě dvou bloků s reaktory typu VVER-1000 k již stávajícím dvěma blokům osazeným stejným typem reaktoru v jaderné elektrárně Tianwan.

Úspěšně také pokračuje výstavba dvou bloků s reaktory EPR v jaderné elektrárně Taishan, které pocházejí z dílny francouzské firmy AREVA. Firma Westinghouse nezůstává pozadu a buduje šest jaderných reaktorů typu AP1000. Čtyři se budou nacházet v jaderné elektrárně Sanmen a dva v jaderné elektrárně Haiyang Tyto reaktory by postupně měly být spuštěny do roku 2015.

V Číně je v současné době rozestavěno zhruba dvacet pět reaktorů a spousta dalších je plánována. Ještě není zcela jasné, jak ovlivní nehoda ve Fukušimě jadernou politiku Číny, ale vzhledem k tomu, že z ekologického hlediska si Čína nemůže dovolit odstoupit od jaderné energetiky lze očekávat, že masivní rozkvet tohoto odvětví energetiky, bude v Číně nadále pokračovat [42].

### Japonsko

Japonsko k 5. 5. 2012 odstavilo z provozu poslední jaderný reaktor čímž se po více než čtyřiceti letech ocitlo bez jaderné energie. Reaktory procházejí pravidelnou kontrolou a probíhají na nich testy na seizmickou odolnost a odolnost proti tsunami. Není jasné kdy a jestli vůbec budou tyto reaktory opět spuštěny do provozu. Zatím je jaderná energetika nahrazována fosilními zdroji, které ovšem musí Japonsko dovážet. Podle průzkumů se většina Japonců přiklání k odstoupení od jaderné energetiky, které by ovšem znamenalo výrazné zvýšení cen elektrické energie v Japonsku. Připravována je nová energetická koncepce, která bude hotová do dvou let [44] [45].

### Indie

V loňském roce byl v jaderné elektrárně Kaiga spuštěn čtvrtý blok osazený indickým tlakovodním reaktorem o výkonu 202 MW. V příštím roce se plánuje spustit dva bloky s reaktory VVER-1000 v jaderné elektrárně Kudankulam a jeden blok s rychlým reaktorem chlazeným sodíkem o výkonu 500MW v jaderné elektrárně Kalpakkam.

Rozkvet jaderné energetiky v Indii dokazuje také, že šest reaktorů se v současné době staví a dalších 40 je ve fázi projektu, přičemž některé z této fáze už postupují do fáze stavební [42].

## **Jižní Korea**

V současnosti je podle plánu uváděn do provozu druhý blok jaderné elektrárny Shin Kori s reaktorem typu APR-1400. Do budoucna se plánuje postavit na území Jižní Korey ještě deset reaktorů tohoto typu, přičemž výstavba v některých případech už započala [42].

## **7.3. Amerika**

### **USA**

V USA úspěšně probíhá dostavba druhého bloku jaderné elektrárny Watts Bar v Tennessee. První blok této elektrárny byl spuštěn do provozu v roce 1996 a jednalo se o poslední blok spuštěný v USA, takže výstavba druhého bloku bude znamenat spuštění jaderného reaktoru v této zemi po více než patnácti letech.

Dalším jaderným reaktorem, který se bude spouštět do provozu, bude první blok jaderné elektrárny Bellefonte, který by měl být spuštěn do roku 2020. Druhý blok této elektrárny se bude případně dostavovat až při pokročilé výstavbě prvního bloku. V obou případech se jedná o bloky s tlakovodními reaktory.

Nutno však říci, že tři výše zmíněné reaktory byly rozestavěny v předchozích letech, ale jejich výstavba byla roku 1988 zastavena. Jedná se tedy o dostavbu předchozích projektů, kterých se ujala firma Westinghouse.

USA však kromě dostavby rozestavěných jaderných elektráren plánuje výstavbu zcela nových. Moderní reaktory AP1000 generace III+ by měly být postupně postaveny v párech v elektrárnách Vogtle, Summer a Levy County. Zde už začaly přípravy na výstavbu a shání se jen už poslední povolení. Dalších 14 projektů s 27 reaktory je ve fázi plánování. Příští roky teprve ukážou, které projekty se ujmou a které ne, ale vzhledem k tomu, že v USA je potřeba nahrazovat starší jaderné elektrárny novými zdroji energie, dá se očekávat, že výstavba nových bloků bude pokračovat [42].

## **7.4. Technologie budoucnosti**

Jako o budoucnosti jaderné energetiky se mluví o tzv. reaktorech IV. generace. Tyto reaktory vychází z předchozích generací jaderných elektráren, ale budou mít daleko větší rozsah využití potenciálu jaderného paliva, takže i uranu 238 nebo thoria 232.

V roce 2002 byl představen návrh šesti budoucích reaktorů této generace. Jednalo se o tyto reaktory [46]:

- VHTR - Velmi vysokoteplotní jaderný reaktor
- MSR - Reaktor chlazený tekutými solemi
- SCWR - Reaktor s nadkritickými parametry vody a vodní páry
- GFR - Plynem chlazený rychlý reaktor
- LFR - Olovem chlazený rychlý reaktor
- SFR - Sodíkem chlazený rychlý reaktor

Další budoucí technologií jsou takzvané transmutační jaderné reaktory. Jedná se především o urychlovačem řízené transmutační technologie ADTT, které by měly sloužit i k likvidaci stávajícího použitého paliva. Bohužel realizace tohoto projektu se střetává s celou řadou problémů.

Všechny zmíněné reaktory mají jeden společný prvek, a to ten, že při jejich reakci dochází ke štěpení jader. Proces slučování jader je však v současnosti výhledově také možný. V roce 2006 došlo k mezinárodní dohodě o výstavbě termonukleárního zařízení, ve kterém se budou jádra vodíku slučovat v hélíum stejně tak, jako se tomu děje na Slunci. Toto zařízení se jmenuje ITER a je stavěno ve francouzském Cadarache. Energie při tomto jevu uvolňovaná bude poté přeměněna na energii elektrickou [47].



## 8. Technická a ekonomická studie pro úplné odstoupení od jaderné energetiky

V návaznosti na události v jaderné elektrárně Fukušima Daiči se daly pozorovat různé přístupy jednotlivých států k jaderné energetice. Náš západní soused Německo politicky zkrátilo termín pro úplné odstavení jaderných elektráren a zároveň přechod na obnovitelné zdroje energie. Postupně má Spolková republika Německo v plánu odstavit svoje jaderné reaktory nejpozději do roku 2022, přičemž mají být nahrazeny především solárními a větrnými elektrárnami. Po představení tohoto plánu se v České republice také ozývaly názory na odstoupení od jaderné energetiky a vydání se na cestu obnovitelných zdrojů jako Německo. V následujících několika stránkách bude popsán možný scénář pro tento krok.

V následující tabulce je ukázán přehled instalovaných výkonů z různých zdrojů za rok 2011.

Tabulka 8.1: Energetika v České republice v roce 2011 [48]

	Instalovaný výkon [MW]	Výroba [GWh]	Podíl výroby [%]	Koeficient ročního využití [%]
<b>Jaderné elektrárny</b>	3 970,00	28 282,60	32,3	81
<b>Vodní elektrárny</b>	1 054,56	2 835,00	3,2	31
<b>Větrné elektrárny</b>	218,90	396,80	0,5	21
<b>Fotovoltaické elektrárny</b>	1 970,97	2 118,00	2,4	12
<b>Tepelné elektrárny</b>	11 889,00	53 928,10	61,6	52
<b>Celkem</b>	20 250,00	87 560,60	100	49

Z předchozí tabulky je patrné, že jaderná energetika v ČR hraje velmi podstatnou roli. Pokud bychom chtěli odstavit jaderné elektrárny, bude potřeba jejich výrobu nahradit výrobou z jiných zdrojů. Konkrétně bude potřeba vyrobit 28 282,60 GWh z jiných zdrojů.

Jelikož Německo plánuje výrobu jaderné energetiky pokrýt především výstavbou větrných a solárních elektráren, bude stejný scénář použit i v následující části pro příklad České republiky.

### Fotovoltaické elektrárny

Za pomoci údajů z předchozí tabulky si lze odvodit následující:

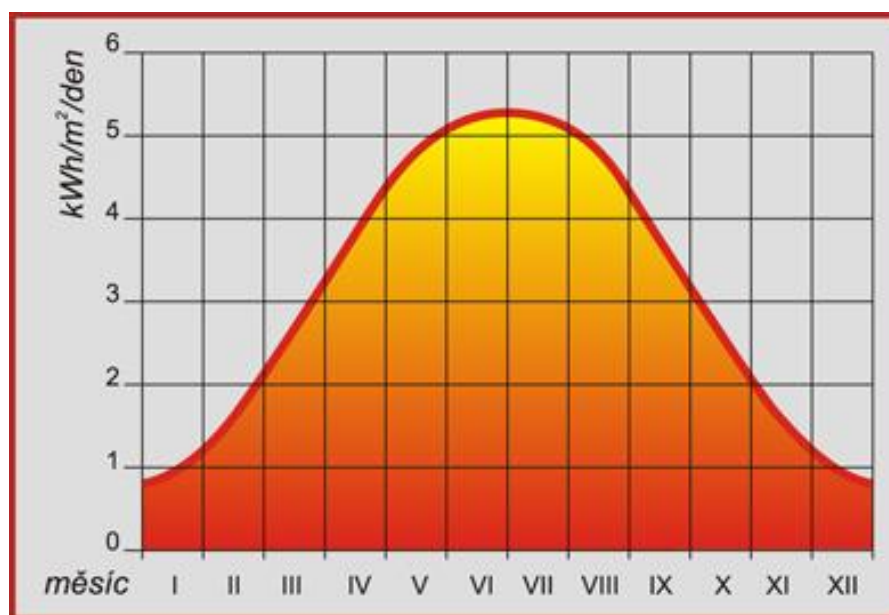
Z 3970 MW instalovaného výkonu jaderných elektráren bylo loňský rok vyrobeno 28 282,6 GWh elektrické energie. Z tohoto lze lehce dopočítat, že z 1 MW instalovaného výkonu bylo vyrobeno přibližně 7,12 GWh elektrické energie za rok.

Naproti tomu z 1 970,97 MW instalovaného výkonu fotovoltaických elektráren bylo vyrobeno 2 118 GWh elektrické energie. Čili na 1 MW instalovaného výkonu připadá zhruba výroba 1,07 GWh ročně. Výroba energie z jaderných zdrojů je tedy daleko efektivnější.

Pokud bychom se rozhodli nahradit výrobu 28 282,6 GWh elektrické energie pouze fotovoltaickými elektrárnami, bylo by potřeba, aby jejich instalovaný výkon činil 26 432,33 MW. Tímto instalovaným výkonem bychom teoreticky kompletně pokryli roční výrobu elektrické energie jaderných elektráren.

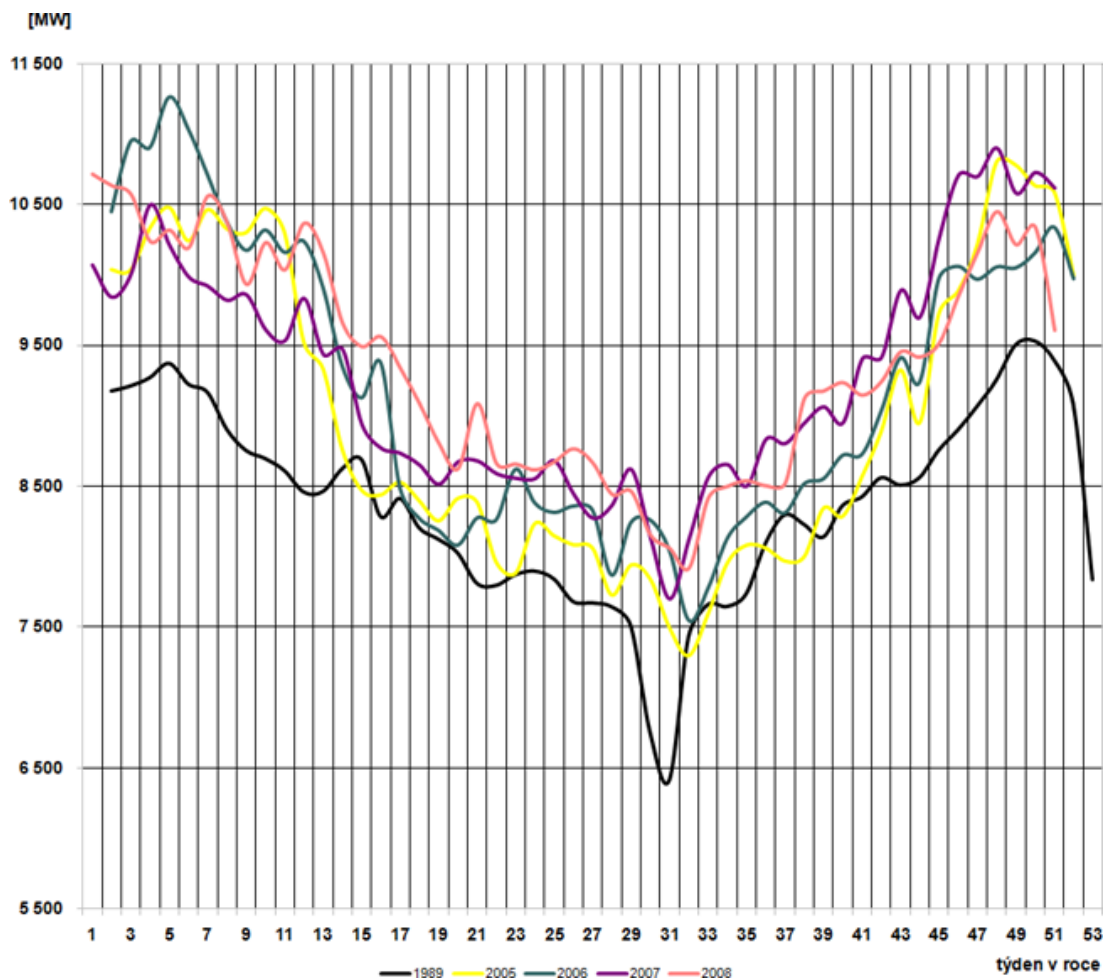
Vezmeme-li v úvahu, že fotovoltaická elektrárna Vepřek provozovaná v okrese Mělník o výkonu 35,1 MW pokrývá plochu 82,5 hektaru, pak na pokrytí výkonu 26 432,33 MW bychom potřebovali plochu o velikosti zhruba 621 km<sup>2</sup>. Což je o něco více než pás o šířce 3 kilometry a délce 200 kilometrů.

Jednou z dalších skutečností, které musíme vzít v úvahu, je nestálost fotovoltaických elektráren. Podle následujícího obrázku je patrné, že největší výroba elektrické energie z FVE je v letních měsících, zatímco nejmenší v měsících zimních.



Graf 8.1: Průměrná sluneční radiace v ČR v jednotlivých měsících [49]

Výhodou jaderných elektráren je stálost jejich dodávek elektrické energie v každém měsíci. To znamená, že nemají slabších ani silnějších měsíců a povětšinou je výroba elektrické energie konstantní. Z výše vypočítaného výkonu FVE by sice za rok šlo vyprodukovat stejný počet GWh elektrické energie, výroba by však v jednotlivých měsících nebyla konstantní. V létě by této energie bylo produkováno daleko více než v zimních měsících, což by znamenalo nedostatečné pokrytí zimní spotřeby, jelikož v zimních měsících je poptávka po energii největší. Oproti tomu v letních měsících by této energie byl naopak přebytek, jelikož poptávka není taková - viz následující graf 8.2.



Graf 8.2: Spotřeba elektrické energie v jednotlivých týdnech [50]

Z grafu je vidět, že nejvyšší spotřeba elektrické energie je v prvních a posledních týdnech roku, čili v zimě. Spotřeba neklesá pod 7500 MW a mezi 8. a 20. hodinou se pohybuje nad 9500 MW. V letních týdnech pak spotřeba v nejvyšší špičce kolem 13. hodiny dosahuje 7500 MW.

Další okolnost, ke které se musí přihlídnout při výrobě elektrické energie z FVE, je i nekonstantní výroba energie v průběhu jednotlivých dnů. Největší bude v průběhu odpoledne a nejmenší ráno a večer. V noci bude tento přírůstek nulový. Z technického hlediska si nahrazení jaderné energetiky pouze fotovoltaickými elektrárnami lze jen velmi těžko představit.

## Ekonomika

Celková investice do 35,1 MW FVE Vepřek činila 2,7 miliardy Kč. Pokud by se za stejnou cenu nahrazoval výkon 26 432,33 MW, činily by celkové náklady na výstavbu zhruba 2 miliardy Kč.

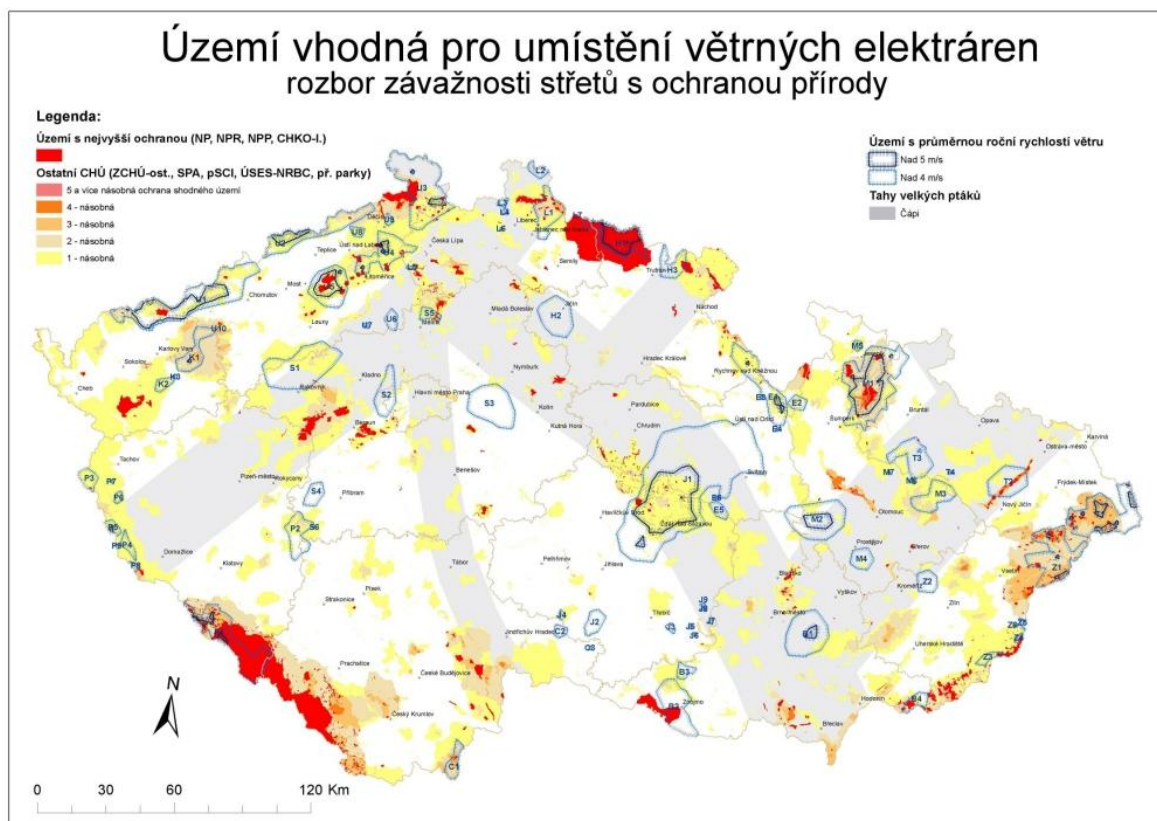
Rozdílné jsou i výkupní ceny elektrické energie. Zatímco u jaderné energetiky je jedna kilowatt hodina vykupována za zhruba 60 haléřů [51], u fotovoltaických elektráren je tato cena u elektráren spuštěných od 1.1. 2011 do 31.12. 2011 s výkonem nad 100 kW 5,61 Kč za kilowatt hodinu. Dále byla 1 kWh dotována tzv. zeleným bonusem, který činil 5,50 [52]. Je jasné, že výkupní cena elektřiny produkované fotovoltaickými panely je

podstatně dražší, což by muselo být zohledněno v ceně elektřiny. Nákladné by bylo také zapojení těchto elektráren do sítě.

### Větrné elektrárny

Pokud budeme postupovat jako u fotovoltaických elektráren, tak zjistíme, že v loňském roce připadlo 1 MW instalovaného výkonu větrných elektráren výrobní kapacita přibližně 1,81 GWh elektrické energie. Pokud bychom chtěli nahradit roční výrobu jaderných elektráren v České republice, museli bychom teoreticky instalovat zhruba 15 602,47 MW ve větrných elektrárnách.

Z praktického hlediska by však tato instalace byla daleko komplikovanější. Jedním z faktorů je výběr lokality pro umístění větrné elektrárny. Větrnou elektrárnu nelze umístit všude a lokalitu je nutno pečlivě vybírat. Zprvce oblast musí být rovinatá, nebo musí mít vhodné kopce pro její umístění. Další podmínkou je, že se nesmí nacházet v chráněné krajinné oblasti nebo národním parku a nesmí se stýkat s migrační trasou čapů bílých. Nejdůležitější jsou ovšem povětrnostní podmínky. Z obr 8.1 jsou patrné možnosti České republiky pro umístění větrných elektráren.



Obrázek 8.1: Území vhodná pro umístění větrných elektráren [53]

Podle odhadu realizovatelného potenciálu větrné energie na území ČR, který zpracoval Ústav fyziky atmosféry AV ČR v roce 2008, je realizovatelný potenciál na našem území 1188 větrných elektráren o celkovém výkonu 2534 MW, které vyrobí ročně 5610 GWh elektrické energie. Tento odhad platil roku 2008, takže celkový možný instalovaný výkon bude pravděpodobně nyní nižší, jelikož některé elektrárny již byly postaveny. Na druhou stranu musíme ale říci, že vývoj rotorů jde neustále dopředu, takže tento předpokládaný výkon může také naopak ještě vzrůst v následujících letech.

Rozhodně, ale nejsme v současné době schopni nahradit výrobu 28 282,60 GWh elektrické energie z jaderných zdrojů zdroji větrnými.

I kdyby se však v ČR nacházelo dostatek vhodných oblastí pro výstavbu větrných elektráren, bylo by nutno řešit i další problémy. Problém by nastal především s připojením větrných elektráren do distribuční sítě. Oblasti pro větrné elektrárny se totiž velmi často nachází na špatně dostupných místech či na místech, kde distribuční síť není dimenzována na vyšší zatížení. Příkladem mohou být vrcholové partie Krušných hor či Jeseníků, kde jsou 22 kV sítě dimenzovány na nižší zatížení v řídké osídlené neprůmyslové oblasti. Do 22kV a 35kV sítí lze připojit výkon 6-10 MW, do 110 kV sítí pak výkon několik desítek MW. Jelikož oblasti jako Krušné hory, Jeseníky či Českomoravská vrchovina jsou místa s největším potenciálem, ale nevyhovující z hlediska sítí, bylo by nutné buď tyto sítě posílit nebo vybudovat kompletně nové.

Problém s přenosem elektřiny z VTE má v současnosti Německo, které trápí nedostatečné propojení severu s jihem. Němci musí postavit nové přenosové sítě, aby elektřina vyráběná z větrných elektráren na severu země mohla zásobovat jih, který má po odstavení jaderných elektráren nedostatek energetických zdrojů. Proti výstavbě nových sítí probíhají v současné době demonstrace a není jasné, jaká bude budoucnost jejich výstavby.

## Ekonomika

Budeme brát v potaz, že realizovatelný potenciál v ČR je 2534 MW. Přímou cenu větrné turbíny určit nemůžeme, protože je ovlivněna mnoha faktory, nepřímo se však uvádí, že cena za 1 MW instalovaného výkonu činí 2 milióny dolarů [54]. V našem případě by poté cena za 2534 MW činila 5068 miliónů dolarů. K 7.5. 2012 byl kurz české koruny vůči dolaru 19,204 Kč za 1 USD. Cena za instalovaný výkon činí pak přibližně 97,326 miliard Kč. Další náklady, které by bylo nutno započítat je připojení těchto FVE do sítě popřípadě budování nových sítí, které budou splňovat náročnost zatížení větrnými elektrárnami.

Stejně tak jako u fotovoltaiky je i u větrných elektráren rozdílná cena výkupu elektrické energie než u jaderných elektráren. Zatímco, jak už bylo zmíněno výkupní cena jedné kilowat hodiny produkovaná z JE je 0,60 Kč, z VTE je to 2,23 Kč. Navíc je k ní přidáván tzv. zelený bonus, který činí za 1 kWh 1,79 Kč. [48] Tento rozdíl není tak velký jako u fotovoltaických elektráren, nicméně by také musel znamenat zvýšení ceny energií.

## Shrnutí

Tabulka 9.2: Srovnání

	Instalovaný výkon nutný pro roční produkci 28 282,60 GWh el. en.	Výkupní cena za 1 kWh elektrické energie
Jaderná energetika	3970 MW	0,60 Kč
Fotovoltaika	26 432,33 MW	11,11 Kč
Větrná energetika	15 602,47 MW	4,02 Kč

Z tabulky 9.2 je jasně vidět, jak je výroba z jaderných elektráren daleko efektivnější než výroba pomocí fotovoltaiky či větrných elektráren. Navíc je tato výroba mnohem ekonomičtější. Nahrazení jaderných elektráren těmito zdroji by znamenalo vysoké finanční investice a zvýšila by se cena elektrické energie. V současné době státy využívající

jadernou energetiku mají ceny elektřiny podstatně nižší než státy, které využívají větrné a fotovoltaické elektrárny. Také je zajímavé, že státy odmítající jadernou energetiku jsou často závislé na dodávkách energie ze zahraničních států.

V této kapitole byly nahrazeny jaderné elektrárny fotovoltaickými a větrnými elektrárnami. Vystává tedy otázka, jestli jsou tyto zdroje jediné vhodné pro nahrazení jaderných zdrojů, jelikož existují i jiné zdroje energie. Jednou z možností by bylo nahradit jaderné zdroje fosilními palivy. Jelikož však zásoby fosilních zdrojů se ztenčují a navíc nejvíce znečišťují životní prostředí, nejsou fosilní zdroje jako náhrada zcela vhodné. Další možností by mohla být biomasa. Ta nebyla v této části uvažována, protože se velmi často spaluje s fosilními palivy a do budoucnosti se bude její potenciál využívat spíše k nahrazování fosilních zdrojů než jaderných zdrojů.

Vzhledem k tomu, že Česká republika nemá takový potenciál k využití vodní energie jako například Norsko a náš potenciál je téměř plně vyčerpán s výjimkou využívání malých vodních elektráren, nelze ani vodní zdroje energie brát jako vhodnou náhradu jaderných zdrojů. Z obnovitelných zdrojů energie zbývá už jen zdroj geotermální a i ten naráží na nepříznivé možnosti využití v našich krajinách. Z obnovitelných zdrojů energie jsou tudíž jediné možné zdroje, které lze brát jako „náhradu“ jaderných elektráren zdroje větrné a fotovoltaické.

## Závěr

Z této bakalářské práce je zřejmé, že jaderná energetika utrpěla v roce 2011 velkou ránu v podobě katastrofy v elektrárně Fukušima Daiči. Hovořilo se o ní jako o milníku, který bude znamenat definitivní odklon od jaderné energetiky a v některých státech tento odklon opravdu nastal. Státy jako Německo, Švýcarsko či Itálie rozhodly vyřadit jadernou energetiku ze svého budoucího energetického mixu a hledat jiné zdroje energie, které by ji nahradily. Na druhou stranu spousta jiných států zůstala jaderné energetice věrná. Jaderná renesance v Číně, Indii a v Rusku nebyla touto havárií zastavena a i spousta dalších zemí cítí potřebu budovat jaderné elektrárny jako prostředek k získání energetické soběstačnosti.

Jiná je situace v samotném Japonsku, kde byl na začátku května 2012 odstaven poslední reaktor, který byl v provozu, a není jasné, kdy a jestli vůbec dojde k opětovnému spuštění jaderných elektráren. Situace v elektrárně Fukušima Daiči je v současné době již pevně v rukou řídicích techniků, nicméně odstranění následků bude trvat desítky roků. Už v současné době je vypracován plán pro likvidaci čtyř bloků této elektrárny v délce čtyřiceti let.

Havárie však nepřinesla pouze samá negativa. Do určité míry otevřela nové dveře k dosažení jaderné bezpečnosti. Poukázala na fakt, že jaderné havárie nemusí být zapříčiněny lidským faktorem či technickou závadou, ale mohou být způsobeny také živelnou katastrofou. Poukázala, že i když je stát sebevyspělejší, může být problém dostat do postižených oblastí příslušnou techniku jako v případě tak rozsáhlé katastrofy, která postihla Japonsko. Havárie v jaderné elektrárně Fukušima Daiči povede tedy i ke zvýšení bezpečnosti jaderných elektráren, neboť poukázala na další slabá místa v bezpečnosti, která je třeba posílit.

Pokud však někdo očekává, že jaderná havárie ve Fukušimě Daiči byla poslední havárií jaderných elektráren, tak se plete. Společnost musí vzít na zřetel, že havárie se prostě čas od času stávají a že nikdy nelze zajistit úplnou bezpečnost ať už v jakémkoliv odvětví. Je však velmi důležité, abychom se těmito haváriím snažili co nejvíce předcházet tím, že se budeme snažit udržovat vysoké nároky na bezpečnost jaderných zařízení. Tyto nároky na bezpečnost musejí být, ale také v určitých mezích. Musí se koukat taky na ekonomický aspekt celé problematiky, kdy nelze slepě utápět peníze v posílení jaderné bezpečnosti za jakoukoliv cenu. Tímto chci říct, že se vždycky najde někdo, kdo bude tvrdit, že lze jadernou bezpečnost ještě více posílet. Otázkou však zůstává, zdali to bude opravdu nutné.

V poslední kapitole této práce byla nahrazována výroba elektrické energie v ČR z jaderných zdrojů výrobou z fotovoltaických a větrných elektráren. Výsledkem toho bylo, že odstavení jaderných elektráren a jejich nahrazení výše zmíněnými zdroji energie by bylo velmi technologicky i ekonomicky náročné. V případě fotovoltaiky by musely být obětovány velké plochy, kde by mohly být postaveny fotovoltaické panely. Větrné elektrárny by ani úplnou výrobu jaderných elektráren pokrýt nemohly, protože u nás není dostatečný potenciál pro jejich rozvoj. Fotovoltaika a větrné elektrárny nemají v České republice takovou možnost využití, jako je to u fotovoltaiky například ve Španělsku či Portugalsku a u větrných elektráren v Německu a Dánsku. Navíc tyto zdroje energie mají nevýhodu, že výroba elektrické energie z nich je podmíněna mnoha faktory a je nestálá. Z ekonomického hlediska by tento krok stál obrovské investice jak do zařízení pro výrobu elektrické energie, tak do zařízení pro její přepravu. Na zřetel by bylo taky nutno vzít, že se vždy najde někdo, kdo by se chtěl na vzniklé situaci s podporou obnovitelných zdrojů přizpůsobit. Příkladem může být situace, která vznikla ve Španělsku, kde fotovoltaické panely byli schopné dodávat elektřinu i v nočních hodinách. Důvodem byly diesel agregáty spalující fosilní palivo, které se spolu s fotovoltaickými panely podíleli na výrobě

elektřiny. Nicméně elektřina z nich vyrobená byla prodávána jako elektřina vyrobená čistě fotovoltaickými panely. Dalo by se očekávat, že v České republice by mohly nastat podobné situace.

Jaderná energetika je právem nadále podporována a v současné době neexistuje pro Českou republiku lepší zdroj elektrické energie, který nezatěžuje životní prostředí a má konstantní elektrický výkon, než je zdroj jaderná energie. Podle mého názoru by měla být jaderná energetika hlavním pilířem trvale udržitelného energetického mixu nejen České republiky, ale i ostatních států.



## Seznam použitých zdrojů

- [1] WAGNER, Vladimír. Jaderná energetika na prahu roku 2011. *Objective Source E-Learning* [online]. 17.2.2011 [cit. 2012-04-08]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?obsah=6&clanek=5556>.
- [2] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Státní energetická koncepce ČR* [online]. Praha, 2004 [cit. 2012-04-16]. Dostupné z: <http://www.mpo.cz/dokument5903.html>.
- [3] Czech Republic: Energy production. *IEA: International Energy Agency* [online]. 2009 [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: [http://www.iea.org/stats/pdf\\_graphs/CZPROD.pdf](http://www.iea.org/stats/pdf_graphs/CZPROD.pdf).
- [4] Europe: Energy production. *IEA: International Energy Agency* [online]. 2009 [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: [http://www.iea.org/stats/pdf\\_graphs/18ELEC.pdf](http://www.iea.org/stats/pdf_graphs/18ELEC.pdf).
- [5] AP 1000. *Westinghouse* [online]. © 2007 [cit. 2012-04-08]. Dostupné z: <http://ap1000.westinghousenuclear.cz/strucna-vizitka/>.
- [6] AP1000. *Advanced Technology Division: Thailand Institute of Nuclear Technology* [online]. 7.1.2008 [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: [http://www.tint.or.th/adv/fission/ap1000/ap1000\\_building.jpg](http://www.tint.or.th/adv/fission/ap1000/ap1000_building.jpg).
- [7] WAGNER, Vladimír. Nové reaktory pro Temelín. *Objective Source E-Learning* [online]. 13.11.2009 [cit. 2012-04-08]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=4716>.
- [8] Typy jaderných reaktorů. *Výroba jaderné energie* [online]. 2011 [cit. 2012-04-08]. Dostupné z: <http://www.jaderna-energie.cz/jaderny-reaktor-typy.htm>.
- [9] Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Wikipedia: The Free Encyclopedia* [online]. 15.5.2012 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Fukushima\\_Daiichi\\_Nuclear\\_Power\\_Plant](http://en.wikipedia.org/wiki/Fukushima_Daiichi_Nuclear_Power_Plant).
- [10] Breaking – Japanese Fukushima Daiichi nuclear plant building explodes. *Spellchek* [online]. 12.3.2011 [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://spellchek.wordpress.com/2011/03/12/breaking-japanese-fukushima-daiichi-nuclear-plant-building-explodes/>.
- [11] Fukushima Daiichi - zjednodušeně a názorně. *Co vás zajímá o nehodě elektrárny Fukušima I* [online]. 2011 [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: [http://otazky-fukusima.cvrez.cz/web/sites/images/fukusima\\_popis.pdf](http://otazky-fukusima.cvrez.cz/web/sites/images/fukusima_popis.pdf).
- [12] Examining some old Fukushima news. *Nuclear power? Yes please* [online]. 2011 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://nuclearpoweryesplease.org/blog/2012/02/26/some-fukushima-news/>.

- [13] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Boiling Water Reactor (BWR) Systems*. Dostupné z: <http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/teachers/03.pdf>.
- [14] Jak se chladí reaktory jaderné elektrárny Fukušima 1. *Objective Source E-Learning* [online]. 6. 5. 2011 [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=5681>.
- [15] Schématický náčrt různých chladících obvodů ve varném reaktoru. *Objective Source E-Learning* [online]. 6.5.2011 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/popisek.php?popisek=17197&img=1304673117.jpg>.
- [16] Zemětřesení v Japonsku a jaderná elektrárna Fukušima. *Idnes.cz* [online]. 13.3.2011 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://nejedly.blog.idnes.cz/c/181735/Zemetreseni-v-Japonsku-a-jaderna-elektrarna-Fukusima.html>.
- [17] Zemětřesení a tsunami v Tóhoku 2011. *Wikipedie* [online]. 7.5. 2012 [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Zem%C4%9Bt%C5%99esen%C3%AD\\_a\\_tsunami\\_v\\_T%C3%B3hoku\\_2011](http://cs.wikipedia.org/wiki/Zem%C4%9Bt%C5%99esen%C3%AD_a_tsunami_v_T%C3%B3hoku_2011).
- [18] National Geophysical Data Center. [online]. [cit. 2012-04-02]. Dostupné z: [http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/results?eq\\_0=9799&t=101650&s=18&d=398,91,95,93&nd=display](http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/results?eq_0=9799&t=101650&s=18&d=398,91,95,93&nd=display).
- [19] WAGNER, Vladimír. Japonsko: přírodní katastrofa zasáhla čtyři jaderné elektrárny. *Objective Source E - Learning* [online]. 24.3 2011 [cit. 2012-04-04]. Dostupné z: <http://osel.cz/index.php?clanek=5627>.
- [20] FRÝBORT, Jan. Jaderná havárie v JE Fukušima. *KJR FJFI ČVUT* [online]. 15.9.2011 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: [http://katedra-reaktoru.cz/dokumenty/pripravny\\_kurz2011/pripravny\\_kurz.pdf](http://katedra-reaktoru.cz/dokumenty/pripravny_kurz2011/pripravny_kurz.pdf).
- [21] Fukushima Accident 2011. *World Nuclear Association* [online]. 2011, 29.3. 2012 [cit. 2012-04-04]. Dostupné z: [http://www.world-nuclear.org/info/fukushima\\_accident\\_inf129.html](http://www.world-nuclear.org/info/fukushima_accident_inf129.html).
- [22] Examination of Accident at Tokyo Electric Power Co., Inc.'s Fukushima Daiichi Nuclear Power Station and Proposal of Countermeasures. *Japan Nuclear Technology Institute* [online]. Listopad 2011 [cit. 2012-04-04]. Dostupné z: [http://www.gengikyo.jp/english/shokai/Tohoku\\_Jishin/report.pdf](http://www.gengikyo.jp/english/shokai/Tohoku_Jishin/report.pdf).
- [23] WAGNER, Vladimír. Jak se vyvíjí radiační situace ve Fukušimě a okolí. *Objective Source E-Learning* [online]. 4.4.2011 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z: <http://osel.cz/index.php?clanek=5640>.

- [24] Radioaktivita způsobená jodem 131 v různých zdrojích pitné vody v prefektuře Fukušima klesla na bezpečné hodnoty. *Objective Source E-Learning* [online]. 4.4.2011 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/popisek.php?popisek=16988&img=1301926771.jpg>.
- [25] Hodnoty efektivní dávky, kterým byli vystaveni obyvatelé některých oblastí vzdálenějších od elektrárny. *Objective Source E-Learning* [online]. 4.4.2011 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/popisek.php?popisek=16988&img=1301926771.jpg>.
- [26] Dávkový příkon z prefektury Fukušima. *Objective Source E-Learning* [online]. 4.4.2011 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/popisek.php?popisek=16989&img=1301926880.jpg>.
- [27] WAGNER, Vladimír. Konec roku ve Fukušimě. *Objective Source E-Learning* [online]. 11.12. 2011 [cit. 2012-04-11]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=6033>.
- [28] Fukušima: první pohled dovnitř reaktorového kontejmentu. *Objective Source E-Learning* [online]. 23.1. 2012 [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=6094>.
- [29] Práce na likvidaci následků havárie ve Fukušimě I se rozjely naplno. *Objective Source E-Learning* [online]. 21.4. 2012 [cit. 2012-04-23]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=6232>.
- [30] Jak to je s obnovenou štěpnou reakcí ve Fukušimě I. *Objective Source E-Learning* [online]. 7.11. 2011 [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=5970>.
- [31] Změť trosk popadaných do bazénu třetího bloku. *Objective Source E-Learning* [online]. 21.4.2012 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/popisek.php?popisek=19274&img=1335001924.jpg>.
- [32] Rok po havárii v jaderné elektrárně Fukušima I. *Objective Source E-Learning* [online]. 6.3.2012 [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=6163>.
- [33] Obyvatelé se mohou začít vracet do zakázané zóny okolo Fukušimy I. *Objective Source E-Learning* [online]. 01.04. 2012 [cit. 2012-04-23]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=6208>.
- [34] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Černobylská havárie* [online]. c2012 [citováno 11. 04. 2012]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=%C4%8Cernobylsk%C3%A1\\_hav%C3%A1rie&oldid=8383055](http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=%C4%8Cernobylsk%C3%A1_hav%C3%A1rie&oldid=8383055).
- [35] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: RBMK* [online]. c2012 [citováno 11. 04. 2012]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=RBMK&oldid=8255722>.

- [36] Atomová elektrárna Černobyl. *RBMK* [online]. 10.4.2005 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.pavrda.cz/cernobyl/reaktor.html>.
- [37] PETR, Jaroslav. Je Fukušima srovnatelná s Černobylem?. *Objective Source E-Learning* [online]. 23.3.2012 [cit. 2012-04-16]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=6196>.
- [38] Národní zpráva: Zátěžové zkoušky. *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. Prosinec 2011 [cit. 2012-04-16]. Dostupné z: [http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/aktualne/Narodni\\_zprava\\_ceska\\_final\\_1.pdf](http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/aktualne/Narodni_zprava_ceska_final_1.pdf).
- [39] Souhrn průběhu nehody v JE Fukušima Dai-ichi. *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. 2011 [cit. 2012-02-10]. Dostupné z: [http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/aktualne/souhrn\\_final\\_draft-\\_2\\_.pdf](http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/aktualne/souhrn_final_draft-_2_.pdf).
- [40] Výsledky zátěžových testů jaderných elektráren budou mít zpoždění. *EurActiv* [online]. 27.4. 2012 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.euractiv.cz/energetika/clanek/vysledky-zatezovych-testu-jadernych-elektren-budou-mit-zpozdeni-009858>.
- [41] WAGNER, Vladimír. Německé odstoupení od jádra už je jasné. A jak tomu bude jinde?. *Objective Source E-Learning* [online]. 31.5. 2011 [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=5723>.
- [42] WAGNER, Vladimír. Jaderná energetika v roce 2011. *Objective Source E-Learning* [online]. 21.1. 2012 [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=6092>.
- [43] Kirill Komarov: Češi jsou výjimkou, chtějí stavět Temelín za vlastní peníze. *E15* [online]. 5.3. 2012 [cit. 2012-04-23]. Dostupné z: <http://zpravy.e15.cz/nazory/rozhovory/kirill-komarov-cesi-jsou-vyjimkou-chteji-stavet-temelin-za-vlastni-penize-748764>.
- [44] DOSTÁL, Václav. Mimo EU bez stresu. *Jarní seminář ČNS, CYG, WIN a OBK* [online]. 20.4.2012 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.csvts.cz/spolecnosti/cns/jarniseminar/prispevky/Dostal.pdf>.
- [45] Japonsko je po 40 letech bez jaderné energie. Na jak dlouho?. *E15.cz* [online]. 5.5.2012 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://zpravy.e15.cz/zahranicni/udalosti/japonsko-je-po-40-letech-bez-jaderne-energie-na-jak-dlouho-764667>.
- [46] Reaktory IV generace. *Objective Source E-Learning* [online]. 16.05.2008 [cit. 2012-05-02]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=3568>.
- [47] Fakta a mýty o jaderné energetice. *Ústav jaderného výzkumu Řež a.s.* [online]. © 2011 [cit. 2012-05-02]. Dostupné z: <http://www.ujv.cz/web/ujv/fakta-a-myty-o-jaderne-energetice>.
-

- [48] Jádru versus fotovoltaika 1:0. *3 pól: Magazín plný pozitivní energie* [online]. 2.4. 2012 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://3pol.cz/1209-jadro-versus-fotovoltaika-1-0>.
- [49] Solární systémy. *VPO Protivanov* [online]. 2012 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.vpo.cz/solarni-systemy--455.html>.
- [50] Elektřina: Víte, kdy spotřebováváme nejvíc?. *Nazeleno.cz* [online]. 2008 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/energie/energetika/elektrina-vite-kdy-spotrebovavame-nejvic.aspx>.
- [51] Jaderná elektrárna Dukovany. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. 29.3. 2012 [cit. 2012-05-07]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1\\_elektr%C3%A1rna\\_Dukovany](http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_elektr%C3%A1rna_Dukovany).
- [52] Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 7/2011. *ERÚ* [online]. 23.11.2011 [cit. 2012-05-07]. Dostupné z: [http://www.eru.cz/user\\_data/files/cenova%20rozhodnuti/CR%20elektro/2011/ER%20CR%207\\_2011OZEKVETDZ.pdf](http://www.eru.cz/user_data/files/cenova%20rozhodnuti/CR%20elektro/2011/ER%20CR%207_2011OZEKVETDZ.pdf).
- [53] Území vhodná pro umístění větrných elektráren: Rozbor závažnosti střetů s ochranou přírody. *Energetický regulační úřad* [online]. 2006 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: [http://www.eru.cz/user\\_data/files/statistika\\_elektro/rocni\\_zprava/2006/mapy/15.htm](http://www.eru.cz/user_data/files/statistika_elektro/rocni_zprava/2006/mapy/15.htm).
- [54] Dohnal, P. Větrná elektrárna ve vybrané lokalitě. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 84 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Martinec, Ph.D..

## Seznam použitých symbolů

Bq	bequerel
Bq/l	becquerel na litr
cm	Centimetr
ČR	Česká republika
EU	Evropská unie
FVE	Fotovoltaická elektrárna
GW	Gigawatt
JE	Jaderná elektrárna
MPa	Megapascal
mSv	milisievert
MW	Megawatt
USD	americký dolar
VTE	Větrná elektrárna