

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

**PŘEHLED A ANALÝZA OPATŘENÍ
PROVEDENÝCH NA ZÁKLADĚ
VÝSLEDKŮ ZÁTĚŽOVÝCH TESTŮ NA
JADERNÝCH ELEKTRÁRNÁCH
U NÁS A VE SVĚTĚ**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

LUBOMÍR LUDVÍK

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Lubomír Ludvík

ID: 146893

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

**Přehled a analýza opatření provedených na základě výsledků zátěžových testů
na jaderných elektrárnách u nás a ve světě**

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s problematikou projektových a nadprojektových havárií jaderných elektráren. Prostudujte průběh, příčiny a následky havárie na JE Fukušima.
2. Proveďte přehledovou hloubkovou rešerši problematiky zadání, řešení a výsledků zátěžových testů jaderných elektráren v ČR, v EU i jinde ve světě.
3. Stručně zpracujte výsledky zátěžových testů českých jaderných elektráren Dukovany a Temelín a dejte je do kontextu s výsledky jiných testovaných reaktorů typu VVER.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího a konzultanta práce

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 30.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce: Ing. Ervín Hoffman, ČEZ, a.s., Elektrárna
Dukovany

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

LUDVÍK, L. *Přehled a analýza opatření provedených na základě výsledků zátěžových testů na jaderných elektrárnách u nás a ve světě*. Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2014, 60 stran. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Poděkování:

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Ervínu Hofmannovi a Ing. Miroslavu Trnkovi za poskytnutí teoretických podkladů a odbornou konzultaci při vypracovávání této bakalářské práce. Podobně bych chtěl poděkovat vedoucímu mé práce panu Ing. Karlu Katovskému Ph.D. za odbornou pomoc a podporu.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

Přehled a analýza opatření provedených na základě výsledků zátěžových testů na jaderných elektrárnách u nás a ve světě

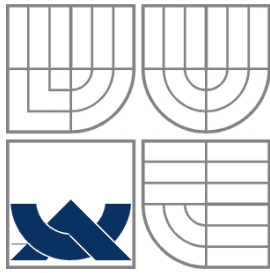
Lubomír Ludvík

Vedoucí: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Konzultanti: Ing. Ervín Hofmann, Ing. Miroslav Trnka

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2014

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering

Bachelor's Thesis

Overview and analysis of follow-up actions based on nuclear power plants stress-test results in the Czech Republic and world-wide

by

Lubomír Ludvík

Supervisor: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Consultants: Ing. Ervín Hofmann, Ing. Miroslav Trnka

Brno University of Technology, 2014

Brno

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou zátěžových testů, jakožto reakcí na události v jaderné elektrárně Fukušima. V první části se práce zabývá bezpečností na jaderných elektrárnách a způsobem řízení v různých režimech. Další kapitola rozebírá problematiku havárie v JE Fukušima a to během celého průběhu této události. Důležitost je upřena především na závěrečná poučení, na kterých jsou zátěžové testy stavěny. Hlavní částí této práce jsou samotné zátěžové testy, které byly provedeny na všech JE v Evropské unii. Rozsah testování byl soustředěn na odolnost vůči extrémním přírodním vlivům, úplné ztrátě bezpečnostních systémů a postupu při řešení těžkých havárií, včetně tavení AZ a následných efektů. Podrobněji jsou rozebrány pro české jaderné elektrárny, pro ty evropské jen okrajově. Nakonec jsou shrnuta doporučení, které budou v rámci několika let uskutečněny a tím posíleno zvládání nadprojektových událostí.

KLÍČOVÁ SLOVA: jaderná elektrárna Dukovany; jaderná elektrárna Temelín; projektové události; nadprojektové události; zátěžové testy; Fukušima; bezpečnost; radiační ochrana

ABSTRACT

This thesis deals with the issue of the stress tests as a reaction to Fukushima accident. Nuclear safety and control systems are generally described in different modes. Fukushima accident is analyzed and described in details. Special attention is focused on the final results and lessons learnt as the background for stress tests goals. The main part of the thesis are the stress tests at all NPP in the European Union overview. Scope of tests was focused on resistance to extreme environmental conditions, a complete loss of safety systems and actions with solution of the severe accidents, including reactor core melting and subsequent effects. The Czech NPPs are discussed in detail, the others in particular way. Finally, recommendations that will be implemented within a few years are summarized. It will strengthen the management of severe accidents beyond the design basic events.

KEY WORDS: nuclear power plant Dukovany; nuclear power plant Temelín; design basic event; beyond design basic event; stress tests, Fukushima, nuclear safety, radiation protection

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
1 ÚVOD	14
2 BEZPEČNOST NA JADERNÝCH EKTRÁRNÁCH	15
2.1 RADIAČNÍ OCHRANA	16
2.2 RADIAČNÍ KONTROLA	16
3 PROVOZNÍ STAVY NA JADERNÝCH ELEKTRÁRNÁCH.....	17
3.1 REGULACE REAKTORU	17
3.2 BEZPEČNOSTNÍ BARIÉRY	17
3.3 JADERNÉ ELEKTRÁRNY V ČR	18
3.4 PROJEKTOVÁ VÝCHODISKA	19
3.5 NADPROJEKTOVÉ HAVÁRIE.....	19
3.6 ŽIVOTNOST	20
3.6.1 PRODLOUŽENÍ ŽIVOTNOSTI.....	21
3.6.2 PROČ PRODLOŽOVAT	21
4 JE FUKUŠIMA	22
4.1 LOKALITA.....	22
4.2 TYPY REAKTORŮ A HISTORIE.....	23
4.3 PŘÍČINY HAVÁRIE	24
4.4 PRŮBĚH HAVÁRIE.....	26
4.4.1 HAVARIJNÍ CHLAZENÍ	27
4.4.2 TAVENÍ AZ A EXPLOZE VODÍKU	30
4.4.3 ZAPLAVENÍ REAKTORŮ SLANOU VODOU	32
4.4.4 BAZÉNY SKLADOVÁNÍ VYHOŘELÉHO PALIVA	32
4.5 STABILIZACE REAKTORŮ.....	32
4.6 RADIAČNÍ SITUACE	33
4.7 REAKCE VE SVĚTĚ.....	34
5 ZÁTĚŽOVÉ TESTY JADERNÝCH ELEKTRÁREN V EVROPĚ	35
5.1 POUČENÍ Z FUKUŠIMY	35
5.2 ZADÁNÍ.....	35
5.3 PROVEDENÍ ZÁTĚŽOVÝCH ZKOUŠEK	36
5.3.1 ODOLNOST VŮČI EXTRÉMNÍM PŘÍRODNÍM VLIVŮ JE V EU	36
5.3.2 ÚPLNÁ ZTRÁTA BEZPEČNOSTNÍCH SYSTÉMŮ (NAPÁJENÍ).....	37
5.4 ZHODNOCENÍ A VÝSLEDKY.....	38
6 ZÁTĚŽOVÉ TESTY ČESKÝCH JADERNÝCH ELEKTRÁREN	39
6.1 JE DUKOVANY	39
6.1.1 EXTRÉMNÍ PŘÍRODNÍ VLIVY.....	39

6.1.2 ZTRÁTA TVD	46
6.1.3 ZTRÁTA VNĚJŠÍHO NAPÁJENÍ A ZTRÁTA REZERVNÍCH ZDROJŮ	51
6.1.4 STATION BLACKOUT	52
6.1.5 DOPLNĚNÍ STÁVAJÍCÍHO PROGRAMU ZLEPŠOVÁNÍ BEZPEČNOSTI O OPATŘENÍ INICIOVANÉ STRESS TESTY	53
6.2 JE TEMELÍN.....	56
6.2.1 EXTRÉMNÍ PŘÍRODNÍ VLIVY	56
6.2.2 ZTRÁTA NAPÁJENÍ	59
6.2.3 ZTRÁTA NAPÁJENÍ SE ZTRÁTOU REZERVNÍCH ZDROJŮ VČETNĚ ZTRÁTY TRVALE INSTALOVANÝCH DIVERZNÍCH REZERVNÍCH ZDROJŮ.....	59
6.2.4 DOPLNĚNÍ STÁVAJÍCÍHO PROGRAMU ZLEPŠOVÁNÍ BEZPEČNOSTI O OPATŘENÍ INICIOVANÉ STRESS TESTY	60
7 ZÁVĚR.....	62
POUŽITÁ LITERATURA	63

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. č.1 - Rozdělení průměrných dávek obyvatelstvu</i>	<i>15</i>
<i>Obr. č.2 - Ukázka stavového stromu pro iniciaci poklesu hladiny v kompenzátoru objemu ...</i>	<i>20</i>
<i>Obr. č.3 - Japonské jaderné elektrárny.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. č.4 - 4 reaktory v Fukušima – Daiichi</i>	<i>24</i>
<i>Obr. č.5 - Umístění jaderných elektráren vůči epicentru, modifikováno</i>	<i>25</i>
<i>Obr. č.6 - Zatopení areálu jaderné elektrárny Fukušima I.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. č.7 - Závislost tepelného výkonu reaktorů Fukušima na čase</i>	<i>27</i>
<i>Obr. č.8 - Nouzové systémy odvodu tepla reaktoru BWR</i>	<i>28</i>
<i>Obr. č.9 - Havarijní chlazení na 1. bloku JE Fukušima – Daiichi.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. č.10 - Havarijní chlazení na 2. a 3. bloku JE Daiichi</i>	<i>30</i>
<i>Obr. č.11 - Exploze na jednotlivých blocích 1-4 JE Fukušima I.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. č.12 - Letecký snímek areálu Fukušima I – únor 2013.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. č.13 - Seismické z odolnění kompenzátoru objemu na EDU</i>	<i>41</i>
<i>Obr. č.14 - Seismické z odolnění stavební konstrukce na EDU</i>	<i>41</i>
<i>Obr. č.15 - Schéma dostupných objemů po IU extrémní vítr</i>	<i>48</i>
<i>Obr. č.16 - Návrh dodavatele REKO Praha</i>	<i>50</i>
<i>Obr. č.17 - Umístění a zapojení UHS.....</i>	<i>51</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka č.1 - Srovnání reaktoru typu BWR a VVER.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabulka č.2 - Parametry pro zatížení od extrémních přírodních jevů</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka č.3 - Bezpečnostně významné objekty EDU</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka č.4 - Shrnutí zdrojů pro doplňování TVD po události extrémní vítr na HVB1</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka č.5 - Shrnutí průtoků pro HVB a doby výpadku TVD</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka č.6 - Zodolnění EDU pro zvládnutí nadprojektových událostí</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka č.7 - Zodolnění systémů v oblasti havarijní odezvy.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka č.8 - Projektové hodnoty zrychlení na ETE.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka č.9 - Přehled zodolnění JE pro zvládání nadprojektových havárií.....</i>	<i>60</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

ATWS - Anticipated Transient Without Scram (Havárie, kdy se nepodaří odstavení reaktoru.)

AZ - Aktivní zóna.

BD - Bloková dozorna.

BSVP - Bazén skladování vyhořelého paliva

BWR - Boiling Water Reactor

CČS - Centrální čerpací stanice

CDF - Core damage frequency

CET - Central Europe Time

CCHV - Chladicí cirkulační voda

DE - Design Earthquake

DGS - Dieselgenerátorová stanice

EDU - Elektrárna Dukovany

ELS - Automatika postupného spouštění (Emergency Load Sequencer)

ENSREG - European Nuclear Safety Regulators

ETE - Elektrárna Temelín

HCP - Hlavní Cirkulační Potrubí

HO-1 (RTS) - Systém pro rychlé havarijní odstavení reaktoru

HVB – Hlavní výrobní blok

HZO - Havarijní zábleskové ochrany (ochrana VN rozváděčů před účinky zkratového oblouku)

HZSp – Hasičský záchranný sbor podniku

I.O. - Primární okruh

II.O. - Sekundární okruh

INES - International Nuclear and Radiological Event Scale

IU - Iniciační událost

IZS - Integrovaný záchranný systém

JB - Jaderná bezpečnost

JE - Jaderná elektrárna

KO - Kompenzátor objemu

LOCA - Loss of Coolant Accident (Havárie se ztrátou chladiva, maximální projektová havárie)

LTO - Long term operation

MAAE - Mezinárodní agentura pro atomovou energii (IAEA)

MaR – Měření a regulace

MDE - Maximum Design Earthquake

ND - Nouzová dozorna

OZE - Obnovitelné zdroje energie

PG - Parogenerátor

PGA - Peak Ground Acceleration

PWR - Pressurized water reactor. Západní koncepce tlakovodních reaktorů

QV,QW,QX - Dieselgenerátory 1., 2. a 3. systému

SBO - Station Blackout (Blackout všech bloků)

SHN - Super havarijní napájení

SKŘ - Systém Kontroly a Řízení

SÚJB - Státní úřad pro jadernou bezpečnost

SZN - Systém zajištěného napájení

TEPCO -Tokyo Electric Power Company

TVD - Technická voda důležitá

UHS - Ultimate Heat Sink (Koncový jímač tepla)

VS - Vlastní spotřeba

VTO TG - Vysokotlaký ohřívák turbogenerátoru

VVER - Vodovodní energetický reaktor (Tlakovodní energetický reaktor)

WENRA - Western European Nuclear Regulators Association (Společenství představitelů dozorných orgánů zemí Západní Evropy s jaderným programem)

1 ÚVOD

Jaderná energetika se po nešťastných událostech ve Fukušimě dostala opět do hledáček odpůrců jádra a především dala podnět k politickým debatám o bezpečnosti jaderných elektráren po celém světě.

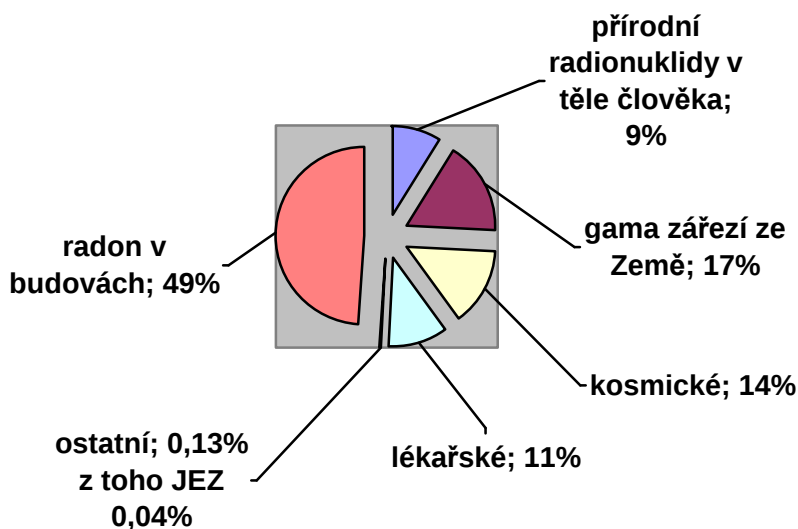
Tato nečekaná událost urychlila stavbu nových zdrojů vyrábějících elektřinu z OZE, mnohdy tam, kde zcela postrádá smysl a původní myšlenku. Zároveň některé státy zcela zastavily výstavbu nových jaderných zdrojů, které před Fukušimou byly nedílnou součástí jejich energetického mixu. Tento prostor nyní budou muset vyplnit jiným typem elektráren.

Také vývoj ceny silové elektřiny na burze dosti ovlivnil výstavbu nových jaderných zdrojů, podobně jako v ČR. Dalšímu rozvoji jaderné energetiky u nás brání silná investorská nejistota a s finanční podporou státu téměř neuskutečnitelná. Je otázkou, jakou pozici by měla jaderná energetika nebýt dotací do OZE.

Dovolím si úvodem citovat docenta Račka z jeho publikace: „*I když energetická politika každého státu závisí na jeho konkrétních podmínkách a některé země jadernou energetiku ze zásady odmítají, je zřejmé, že vzhledem k ekologickým rizikům klasické energetiky (škodlivé exhalace, skleníkový efekt, vyčerpání zásob fosilních paliv a omezeným možnostem alternativních zdrojů energie (sluneční, větrné apod.)) nebude se lidstvo moci alespoň v určité etapě bez jaderné energie obejít*“ [1].

2 BEZPEČNOST NA JADERNÝCH EKTRÁRNÁCH

Při provozování jaderného zařízení vznikají přeměnou jader radioaktivní látky, které jsou doprovázeny ionizujícím zářením. Jadernou elektrárnu lze považovat za bezpečnou pouze tehdy, pokud je zajištěna bezpečnost personálu a okolního obyvatelstva proti vnějšímu a vnitřnímu ozáření a ochrana životního prostředí jak při běžném provozu tak i v abnormálních či havarijních situacích. Ze zjištěných hodnot průměrně obdržených dávek obyvatelstva ČR lze konstatovat, že ozáření v jaderné elektrárně je nižší než hodnoty obdržené v běžném životě, viz obr. č.1.



Obr. č.1 - Rozdělení průměrných dávek obyvatelstvu [3]

Jaderně energetická zařízení se tedy podílí velmi nepatrnou složkou na obdrženém záření. Proto je na místě otázka, proč se lidé zaměřují s kritikou především na umělé zdroje záření, když největším zdrojem je právě zdroj přírodní?

Průměrná dávka, kterou obdrží obyvatel ČR za rok se pohybuje v hodnotách do 4 mSv. Záleží to na více faktorech. Na místě bydliště, intenzitě letů letadlem a počtu lékařských vyšetření (rentgen a CT vyšetření). Pro srovnání: V roce 2012 byla v JE Dukovany naměřena nejvyšší roční efektivní dávka u pracovníka dodavatelské firmy a to 6,97 mSv, průměrná osobní efektivní dávka potom činila 0,2 mSv. V elektrárně Temelín to bylo ještě nižší než v EDU. Nejvyšší obdržená roční efektivní dávka byla naměřena u pracovníka dodavatelské firmy a to 2,23 mSv, přičemž průměrná osobní dávka na jednoho pracovníka byla 0,09 mSv. Při odstávce, tedy otevřeném reaktoru se dávka pohybuje okolo 1 μ Sv za hodinu. Pro porovnání dávka obdržená při letu dopravním letadlem ve výšce 10 km odpovídá cca 4 μ Sv/hod [2].

2.1 Radiační ochrana

Monitorování probíhá v každé elektrárně, zejména v tzv. kontrolovaném pásmu (dále jen KP). Vstup do něj je omezen na osoby, které jsou pravidelně lékařsky kontrolovány a prošly speciálním školením. Do KP se vstupuje po převlečení do speciálních oděvů, nejčastěji žluté barvy. Je zde přísně zakázáno pít, jíst, kouřit nebo žvýkat žvýkačku. Každý pracovník je vybaven elektronickým dozimetrem, který zobrazuje obdrženou dávku záření. Všechny údaje jsou vkládány do systému a uchovávány pro další kontrolní orgány. Při výstupu z exponovaných pracovišť musí všichni absolvovat kontrolu na přítomnost radioaktivních látek na ochranných pomůckách či na kůži. Další dvojité měření se poté absolvuje při opouštění KP. Ještě jedna kontrola probíhá přímo na vrátnici, jejíž význam spočívá v kontrole vnášení a vynášení předmětů. Z hlediska radiační ochrany má důležitost při radiační havárii, když by došlo k zasažení pracovníků mimo KP [15].

2.2 Radiační kontrola

Dohled nad radiační situací na elektrárně představuje centrální dozorná radiační kontroly. Kontroluje se úroveň záření, radionuklidy ve vzduchu a kontaminace povrchů. Hlídá se pochopitelně také přítomnost radionuklidů v technologických okruzích a to:

- Těsnost pokrytí paliva
- Těsnost teplosměnných ploch
- Účinnost čištění médií
- Únik při mimořádných situacích

Provádí se také měření v okolí elektráren. Kontroluje se půda, rostliny, voda, zemědělské produkty a ovzduší [15].

3 PROVOZNÍ STAVY NA JADERNÝCH ELEKTRÁRNÁCH

Hlavním konceptem provozování jaderného zařízení je především jeho bezpečnost v souvislosti s ekonomickou výhodností provozu a vyloučení zneužití pro vojenské účely. Předpokládá se využití dvou bezpečnostních principů:

- základních fyzikálních principů, které samy od sebe vyloučí možnost havárie (tzv. inherentní bezpečnost)
- pasivní bezpečnost – zmírnění následků společně s bariérami v případě selhání aktivních a havarijních systémů

3.1 Regulace reaktoru

Reaktor je navržen a zabezpečen tak, aby zvládnul poruchy a chybné funkce i při abnormálních provozních podmínkách. Jedná se o schopnost odstavit reaktor a udržet jej v tomto stavu při zachování chlazení aktivní zóny.

V průběhu kampaně dochází štěpením ke snižování obsahu uranu ^{235}U v palivu, což se musí kompenzovat koncentrací kyseliny borité v chladicí vodě. Jedná se tedy o dlouhodobou regulaci výkonu. Pro rychlé změny v regulaci se používají tzv. regulační tyče. U reaktorů VVER-440 se zasouváním těchto tyčí směrem dolů pomocí elektropohonů dostává absorpční část do aktivní zóny a naopak palivo se dostává mimo AZ. V extrémních případech systém nebo operátor z blokové dozorny tyto regulační kazety odpojí od elektronických obvodů a ty samovolně vlastní vahou spadnou do AZ a do několika sekund zastaví štěpnou reakci a přechází se do podkritického stavu [1].

3.2 Bezpečnostní bariéry

Ochranu před únikem radioaktivních látek z reaktoru zajišťuje několik bariér, které jsou provozně ověřené a za normálního provozu jsou velice spolehlivé a efektivní [1]:

- Samotná palivová matrice (zejména UO_2)
- Pokrytí paliva (zejména Zr)
- Stěny primárního okruhu (nejčastěji nerezová ocel)
- Stěny hermetického prostoru (ocelová konstrukce zalitá betonem)
- Ochranná obálka, tzv. kontejnment (v ČR pouze JE Temelín)

3.3 Jaderné elektrárny v ČR

Obě jaderné elektrárny v České republice používají typ reaktoru VVER, JE Dukovany čtyři bloky s typovou řadou VVER 440 V-213 a JE Temelín se dvěma bloky VVER 1000 V-320. První blok Dukovan byl přifázován do sítě roku 1985. Plány na výstavbu Dukovan sahají až do roku 1970 (před událostmi na elektrárnách Three Mile Island a Černobyli), kdy se Československo a Sovětský svaz dohodly o stavbě dvou jaderných zdrojů (na Slovensku to byly Jaslovské Bohunice). Stáří Dukovan je tedy téměř 30 let a původní plány počítaly s životností 30 let [15].

Od změny politického režimu probíhá svobodný dialog mezi Východem a Západem a nastává dokazování, že projekt VVER a všechny jeho technologie jsou bezpečné a dostačující ostatním jaderným elektrárnám na západní polokouli. V roce 1994 provedla mezinárodní organizace MAAE bezpečnostní nálezy (Safety Issues), jejímž výsledkem byly projektové nedostatky reaktorů provozovaných na území tzv. bývalého východního bloku. Roku 1995 se odborníci MAAE zaměřili konkrétně na elektrárnu Dukovany a zjistili řadu projektových nedostatků [15]:

- Potřeba obnovit SKŘ (systém kontroly a řízení)
- Ověření, že důležité zařízení pro bezpečnost nemůže selhat z důvodů extrémního počasí (vysoká teplota, extrémní sníh, vítr, záplavy apod.)
- Ověření funkčnosti barbotážního systému jako adekvátní náhrady za plnotlaký kontejnment
- Systémy monitorující pohavarijní situaci
- Úpravy bezpečnostních systémů:
 - zvýšení spolehlivosti zajištěného napájení (DGS, baterie)
 - vybudování 4. systému zajištěného napájení
 - úpravy sacích jímek bezpečnostních čerpadel

Dnes je většina projektových nedostatků vyřešena technickou úpravou, popřípadě vyvrácena prvotní domněnka o nedostatku (barbotážní systém). Díky využití mezinárodní metodiky pro srovnání bezpečnosti jaderných bloků jsou výsledky více objektivní a podle zhodnocení výsledků jsou na tom Dukovany velice dobře. Podle mezinárodních ukazatelů WANO jsou bloky EDU v první třetině nejlépe hodnocených. Podle bezpečnostního faktoru CDF mají bloky EDU pravděpodobnost poškození aktivní zóny 10^{-5} , ETE dokonce 10^{-7} .

Po událostech v Three Mile Island a Černobyli došlo ke změně filosofie řešení havarijních situací. Postupuje se podle symptomaticky orientovaných předpisů vytvořených podle Westinghouse guidelines. Jedná se o symptomaticky orientované předpisy, kdy vedoucí reaktorového bloku pokládá otázky a podle odpovědí operátorů postupuje následujícím způsobem. V případě odpovědi ANO postupuje dolů v levém sloupci, při odpovědi NE vykoná činnost v pravém sloupci. Byl vybudován plnorozsahový trenažér, který je neustále aktualizován, což přispělo k vysoké úrovni obslužného personálu a ke zvládnutí havárie [15].

3.4 Projektová východiska

Projektová východiska jsou předem definované provozní stavy, odchylky od běžného provozu a události, které vedou k abnormálnímu provozu nebo havarijním podmínkám. Projektové havárie jsou ty, které zařízení bezpečně zvládne s dodržáním požadavků jaderné bezpečnosti.

Musí obsahovat všechna projektová východiska, při kterých mohou nastat poruchy vyvolané selháním části zařízení elektrárny, chybami obsluhy nebo zásahem vnějších událostí. Jednotlivá opatření se liší podle typu reaktorů, ovšem většina principů díky mezinárodní spolupráci je stejných nebo velmi podobných.

Nutno podotknout, že žádné preventivní opatření nevytloučí výskyt závažnějších nehod zcela na nulu. Proto jsou připravena technická opatření přímo v projektu, která omezí následky takových stavů v mezích přípustných pro ochranu pracovníků a obyvatelstva.

Maximální projektové havárie u obou reaktorů v ČR uvažují protržení hlavního cirkulačního potrubí, tzv. LOCA havárie. Původní reaktory VVER 440 V-230 počítaly pouze s trhlinou o průměru 32 mm kdekoli v primárním okruhu, kdežto od novější V-213 již uvažují úplné prasknutí (gilotinový řez s oboustranným výtokem). Je to dáno barbotážním systémem, který částečně nahrazuje kontejnment a při havárii zajistí kondenzaci vzniklé páry.

3.5 Nadprojektové havárie

Jedná se o události, které přesahují rámec událostí s nimiž bylo uvažováno v projektu, např. blackout, ATWS apod. Jedná se také o projektovou událost, při které dojde k selhání některého z bezpečnostních systémů nebo nastane současně více projektových událostí. Při nadprojektové události se ještě nemusí jednat o těžkou havárii, ale může.

Provozní předpisy pro řešení různých stavů jsou psány ve dvousloupcovém formátu s jasným postupem. Dělí se do několika skupin podle typu události:

P002 – Předpisy pro likvidaci abnormálních stavů (nedojde k odstavení reaktoru)

P003 – Předpisy pro likvidaci mimořádných stavů (dojde k odstavení reaktoru (HO-1 (RTS)))

Přehled některých podskupin:

P002a - Úniky na I.O a II.O.

P002b - Napájení VS při nehodě typu blackout

P002c – Likvidace poruchových stavů v režimech 4 až 7

P002e – Poruchy ze strany I.O

P002f – Poruchy ze strany II.O

P002g – Odstraňování poruch zařízení elektrické části a MaR

P002h – Požáry

P002i – Výpadky technologických médií

P002o – Ostrovní provoz

P002r – Mimořádné přírodní události (destrukce chladicích věží a elektrického vedení)

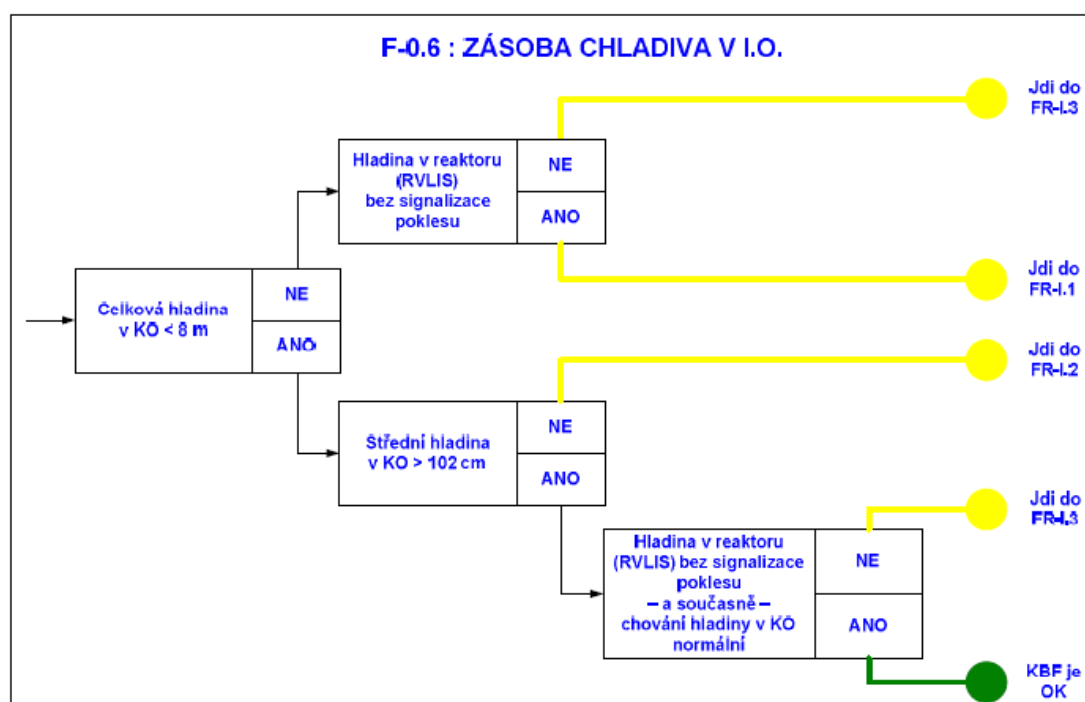
P002z – Zápavy

P003a,b – Likvidace mimořádných stavů

P003c – Likvidace mimořádných stavů – výkladová část (čítanky EOPs)

P003t – Hodnotící manuály pro předpisy na řešení havarijních stavů (manuály TPS)

P004a,b – Návod pro řízení těžkých havárií



Obr. č.2 - Ukázka stavového stromu pro iniciaci poklesu hladiny v kompenzátoru objemu

3.6 Životnost

Díky zkušenostem vlastním i ze světa a díky lepší technice, která umožňuje podrobnější a přesnější informace o stavu opotřebení klíčových komponent se počítá s provozem minimálně do roku 2025, v ideálním případě do roku 2035 (projekt LTO). Okolnosti, které nutí původní projekt doplňovat a zlepšovat [15]:

- Vývoj techniky
- Politické a ekonomické změny
- Zpřísnění legislativy
- Srovnání se světem
- Události na jiných JE

3.6.1 Prodloužení životnosti

Pro prodloužení životnosti elektrárny jsou důležité stavy klíčových komponent výrobního cyklu. Například parogenerátor má rezervu čerpání teplosměnné plochy 20% a za 20 let provozu se vyčerpala rezerva pouze 1%. Na základě vlastních zkušeností a ze světa, včetně detailnějších informací o stavu opotřebení hlavních komponent byl po roce 2000 připravován projekt na prodloužení provozu EDU alespoň do roku 2025, tzv. projekt LTO (Long term operation). Tento projekt představuje přibližně 180 rekonstrukcí či výměn s cílem prodloužit licenci ještě o 10-15 let po roce 2025. Přehled některých již realizovaných obnov (realizace 2009-2012): [15]

- náhrada HZO
- rekonstrukce silových částí rozvodů 6 kV
- výměna kabelových rozvodů bezpečnostních systémů
- modernizace zavážecího stroje
- rekonstrukce elektrických ochranných bloků
- rekonstrukce filtrace hermetické zóny a vzduchotěsné zóny
- rekonstrukce potrubí TVD na sekundárním i primárním okruhu
- výměna VTO TG
- náhrada akubaterií na systémech zajištěného napájení I. kategorie.

3.6.2 Proč prodlužovat

Výstavba nového zdroje představuje obrovské množství legislativních úkonů a především dlouhou dobu do začátku prací. Nové jaderné zdroje, které nabízí přední špičkové firmy, uvádějí sice výstavbu zvládnutelnou za 40 měsíců, ovšem licence a další legislativa zabere několik let. Pokud se podíváme na náklady na prodloužení provozu o celkových 20 let jedná se o cca 0,8 milionu € / MW. Oproti tomu nový zdroj dnes vychází až na 5 mil € / MW. U dostavby Temelína se počítá s cenou cca 2 mil € / MW [15].

V JE Dukovany pracuje zhruba tisíc lidí. Další dva tisíce v servisních firmách nebo jsou na provoz elektrárny napojeni. Potencionální zavření elektrárny by znamenalo pro region Třebíče naprostý kolaps. Lidé, kteří jsou přímo spojeni s elektrárnou totiž dávají pracovní příležitosti dalším lidem ve službách, ubytování, stravování nebo školství.

4 JE FUKUŠIMA

4.1 Lokalita

Jaderná elektrárna Fukušima se nachází na východním pobřeží japonského ostrova Honšú, přibližně 250 km severně od Tokia. Spadá do prefektury Fukušima a dělí se na dvě samostatné elektrárny, Fukušima I – Daichii a Fukušima II – Daini. Všechny jaderné elektrárny se nacházejí na pobřeží, což je způsobeno několika důvody. Neomezené množství vody pro kondenzátor, možnost dopravy paliva nebo velkých komponentů po vodě, protože Japonsko je členité a doprava po vnitrozemí by byla komplikovaná, ne-li nereálná. Těžko zde nalezneme místo, které není seismicky aktivní. Nicméně je třeba upozornit, že všechny JE v Japonsku byly stavěny na extrémně velká zemětřesení [16].



Obr. č.3 - Japonské jaderné elektrárny [16]

4.2 Typy reaktorů a historie

Obě tyto japonské jaderné elektrárny používají varné jaderné reaktory, tzv. BWR (Boiling Water Reactor). Hlavní rozdílem mezi tlakovodním a varným reaktorem je absence sekundárního okruhu. V praxi to znamená, že zde není parogenerátor a radioaktivní pára se dostává přímo z reaktoru na lopatky turbíny. Naopak jejich konstrukce je jednodušší, rychlejší a pochopitelně levnější. Základní srovnání je v tabulce č.1 [9].

Tabulka č.1 – Srovnání reaktoru typu BWR a VVER [9]

	VÝHODY		NEVÝHODY	
BWR	Nízké provozní parametry (7,6 MPa, 285 °C)	Jednoduchost konstrukce (absence parogenerátorů)	Velké rozměry reaktoru	Pára vstupující do turbíny je radioaktivní
VVER 1000	Malá nádoba reaktoru	Primární a sekundární okruh je oddělen	Vysoké provozní parametry (15,7 MPa a 320 °C)	Složitější konstrukce

V Daichii je 6 reaktorů o celkovém výkonu cca 4700 MW, v Daini 4 reaktory o celkovém výkonu 4400 MW. Postiženy byly první čtyři bloky v Daichii. Bloky 4, 5 a 6 v byly v plánované odstávce (výměna paliva a údržba komponent). Blok 4 byl dokonce úplně bez paliva, které se nacházelo v bazénu vyhořelého paliva. Avšak i blok č.4 byl poškozen explozí vodíku vygenerovaného na vedlejším bloku. Obě JE provozuje japonská firma TEPCO [6].



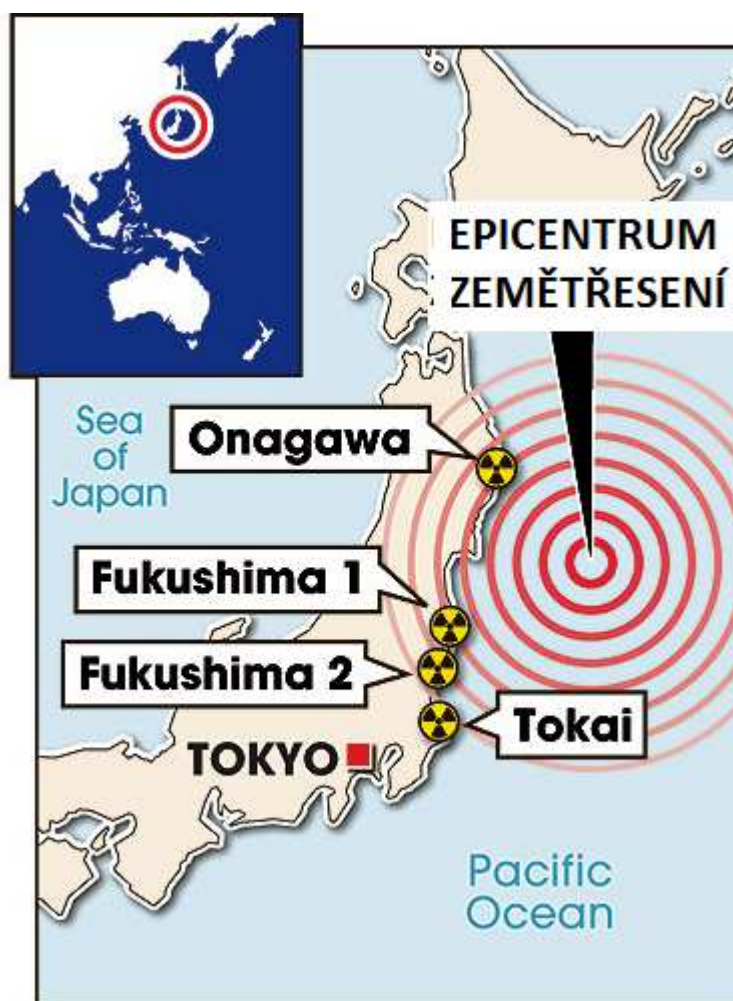
Obr. č.4 – 4 reaktory v Fukušima – Daichii [16]

Reaktory v elektrárnách Fukušima byly uvedeny do provozu v letech 1971 – 1978, jejich stáří v době havárie tedy bylo přibližně 30-40 let.

4.3 Příčiny havárie

Zemětřesení nastalo 11. března 2011 ve 14:46 japonského času (6:46 CET). Z historického hlediska se jednalo o největší zaznamenané zemětřesení v Japonsku a 5. největší zaznamenané ve světě. Jeho síla byla 9.0 M (Magnitudo¹). JE Fukušima byla připravená “pouze” na 8.2 M, toto zemětřesení tedy bylo 8x větší, jelikož stupnice magnituda je logaritmická. Zemětřesení je nejčastěji tektonického původu, třením nebo nárazem dvou litosférických desek v tektonicky aktivních oblastech. Zde se jednalo o podsunutí pacifické (tichomořské) desky pod filipínskou desku [16].

¹ Magnitudo se určuje z maximální výchylky na seismografu, což je přístroj na měření zemětřesení.



Obr. č.5 - Umístění jaderných elektráren vůči epicentru, modifikováno [7]

Zemětřesení vzniklé pod oceánem sice nemá tak velké přímé účinky, ovšem je nejčastěji doprovázeno přílivovou vlnou tsunami, jejíž velikost nejvíce závisí právě na velikosti zemětřesení. V japonsku mají automatické ochrany při zemětřesení, které odstaví reaktory v blízkosti epicentra. Ve Fukušimě byly odstaveny do 2 min po zemětřesení pomocí tzv. havarijních tyčí.

Toto zemětřesení dalo do pohybu 40 miliard tun vody a na japonské pobřeží dorazila vlna tsunami o výšce až 23 m (vypočteno a změřeno GPS) se zpožděním 15minut. K JE Fukušima dorazila za 55 minut s výškou 14 m (uvádí TEPCO), všechny reaktory již byly odstaveny, nicméně Fukušima 1 byla projektována pouze na vlnu o výšce 5,7 m, což se později ukázalo jako fatální nedostatek.

Zasaženy byly i JE Onagawa a Tokai. Onagawa byla ovšem na rozdíl od Fukušimy 1 projektována na přílivovou vlnu o výšce 25 m. S dochlazováním po odstavení reaktoru tedy nebyly problémy, které by se nedaly zvládnout. V JE Tokai to bylo obtížnější, nicméně i díky zvýšení ochranné hráze z původních 4,9 m na 6,1 m nenastaly takové komplikace. Nakonec dorazila vlna o výšce cca 5,4 m, která nezaplavila dieselgenerátory. Zemětřesení sice

způsobilo výpadek napájení z vnější sítě a jedno ze tří čerpadel na vodu z oceánu vypovědělo službu. Havarijní dieselgenerátor byl schopen napájet zbylá dvě čerpadla, která zvládla dodávat dostatek vody a uchladiť reaktor. Totéž se povedlo udržet i v JE Fukušima II -Daini [8].



Obr. č.6 – Zatopení areálu jaderné elektrárny Fukušima I [16]

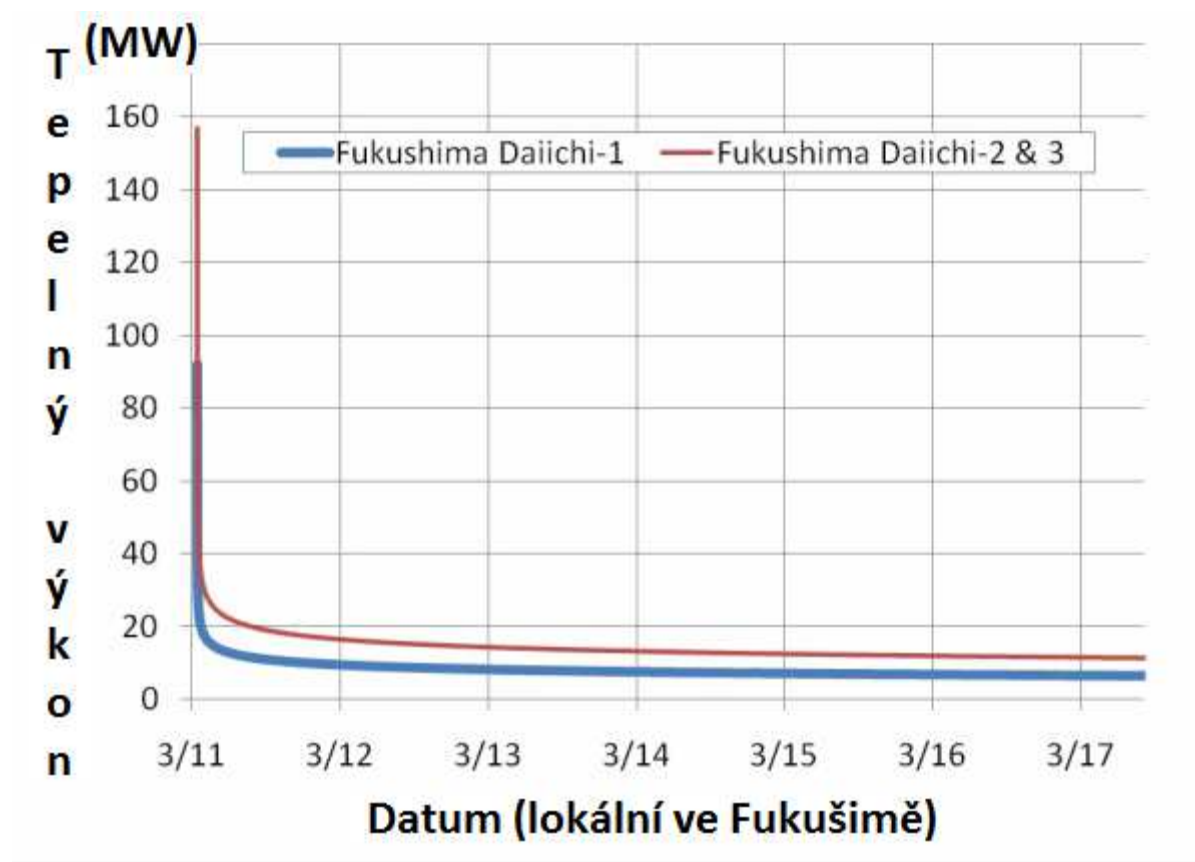
4.4 Průběh havárie

Pro chlazení varného reaktoru potřebujeme mít funkční:

- Přívod elektřiny k pohonu čerpadel
- Palivo pro DG v režimu nouzového napájení
- Zásoby užitkové vody

Po přerušení dodávky elektřiny z vnější sítě vlivem zemětřesení je JE závislá pouze na vlastní energii. Poté co hlavní turbogenerátory přestaly pracovat, startuje v JE Daiichi 14 dieselgenerátorů, které zajišťují dostatek elektrické energie pro chlazení ze záložního chlazení. Pracují v pořádku přibližně hodinu, ale následná vlna však všechny zaplavuje slanou vodou, včetně palivových nádrží a dochází ke ztrátě nouzového napájení z DG. Systém tedy začíná brát elektrické napájení z druhého zdroje nouzového napájení a to z akumulátorových baterií [16].

Po uplynutí 5 hodin od odstavení je potřeba stále odvádět z aktivní zóny reaktoru 1. bloku tepelný výkon přibližně 14 MW, z každého bloku 2, 3 potom po cca 24 MW. V následujícím grafu je vidět exponenciální průběh tepelného výkonu na čase po odstavení reaktoru [9].



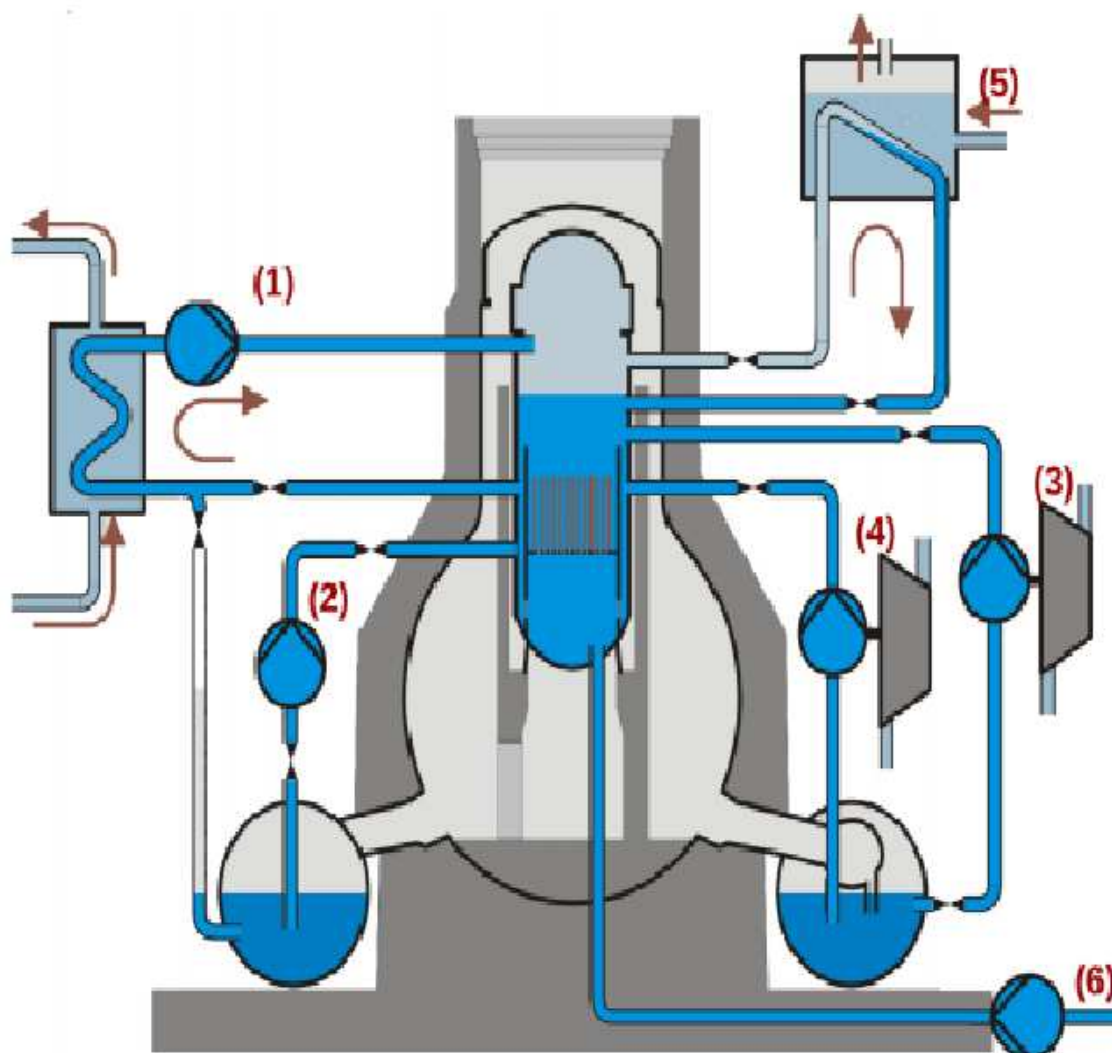
Obr. č.7 – Závislost tepelného výkonu reaktorů Fukušima na čase [9]

4.4.1 Havarijní chlazení

Při zachování přívodu elektřiny by bylo při havarijním stavu k dispozici několik systému dochlazování odstaveného reaktoru (viz obr. č.7) [10]:

1. Systém odvodu zbytkového tepla
2. Nízkotlaký systém sprchování AZ
3. Vysokotlaký systém vstřikování vody do AZ
4. Systém chlazení izolovaného reaktoru
5. Kondenzátor chlazení izolovaného reaktoru
6. Vstřikování kyseliny borité

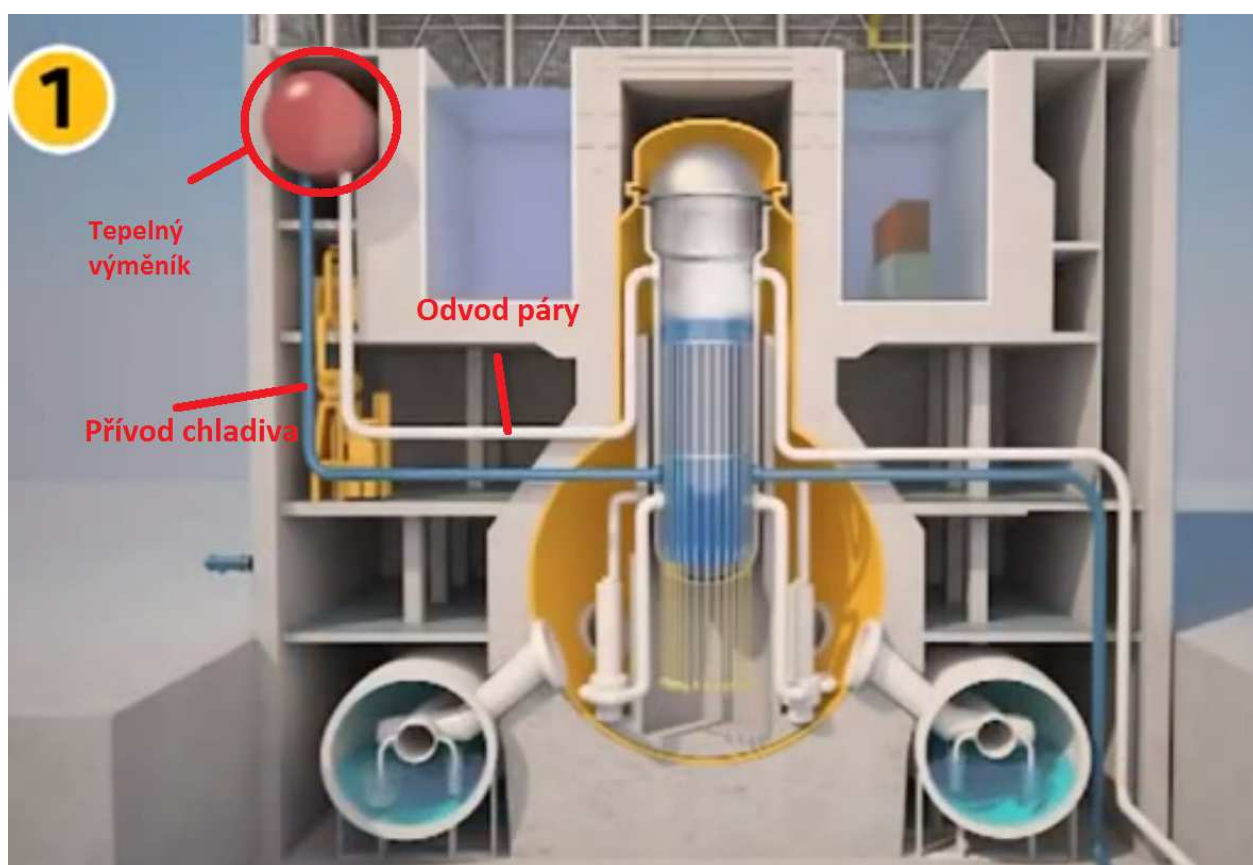
K havárii došlo kvůli společné příčině – selhaly všechny systémy s výjimkou jednoho! Na každém bloku tak mohli chladit AZ pouze jedním systémem a pouze po omezenou dobu.



Obr. č.8 – Nouzové systémy odvodu tepla reaktoru BWR [10]

4.4.1.1 Blok č. 1

Na prvním reaktoru byla pro havarijní chlazení uplatněna přirozená cirkulace v kondenzátoru chlazení (viz obr. č.8 – bod (5)). Ten potřebuje mít zajištěnou dodávku chladicí vody, která nešla zajistit a postupně došlo k vyprázdnění. Po cca 5 hodinách od úderu vlny tsunami je v reaktoru 2x vyšší tlak než normálně, AZ se odhaluje a hrozí roztavení paliva, které později také nastává.

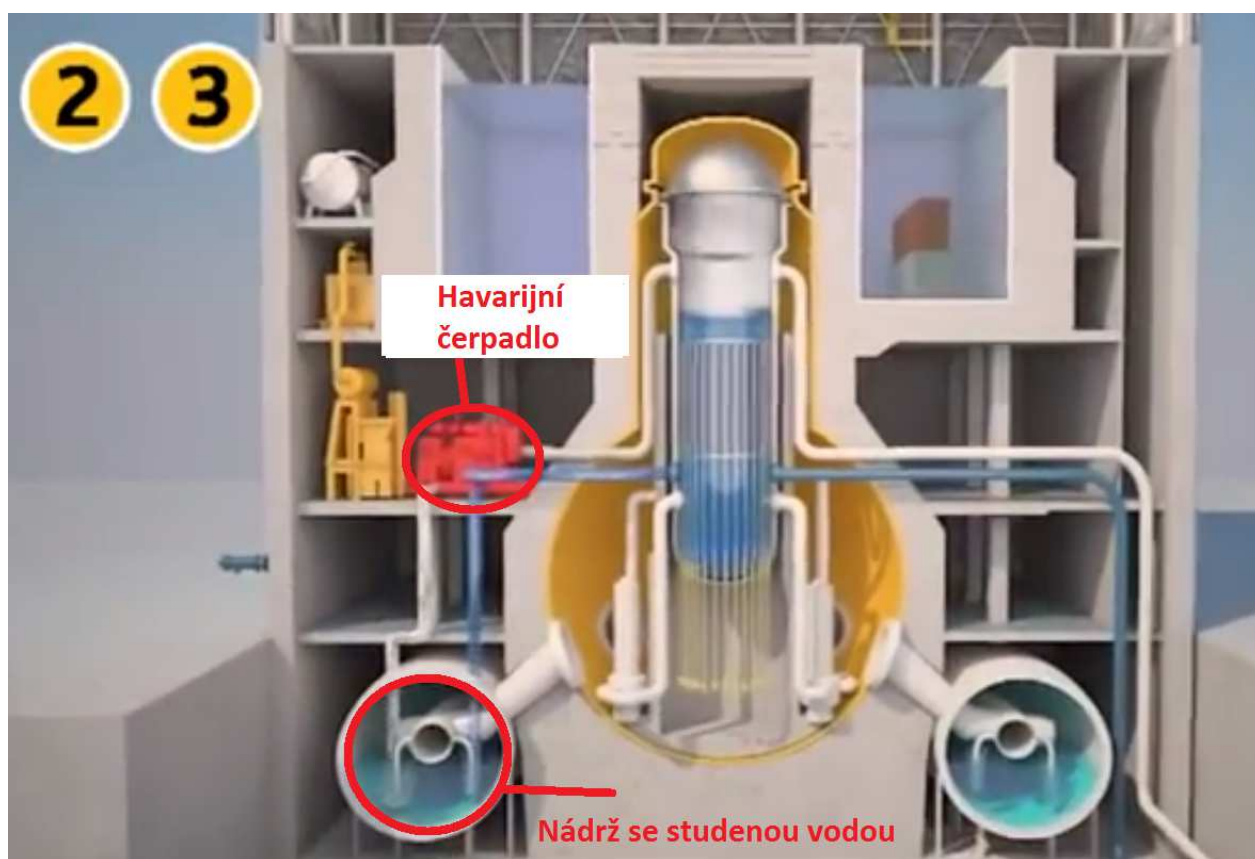


Obr. č.9 – Havarijní chlazení na 1. bloku JE Fukušima – Daiichi, modifikováno z [11]

4.4.1.2 Blok č.2 a č.3

V nouzovém režimu pro reaktory č. 2, 3 pára putuje do nádrží se studenou vodou, která se zde ochlazuje a nouzové baterie napájí čerpadlo, které odvádí studenou vodu do nádoby reaktoru.

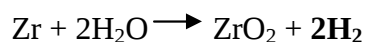
Chlazení nebylo dostačující (baterie slábly až vypověděly službu úplně) a u všech tří bloků došlo postupně k tavení aktivní zóny v důsledku obnažování palivových tyčí. Průběh tavení byl u všech velice podobný, avšak časově odlišný (viz. obr. č.11).



Obr. č.10 – Havarijní chlazení na 2. a 3. bloku JE Fukušima – Daiichi, modifikováno z [11]

4.4.2 Tavení AZ a exploze vodíku

Hladina vody v reaktoru klesala a teplota se zvyšovala. Při dosažení vysoké teploty začíná exotermickou reakcí reagovat slitina zirkonia s vodní párou a vzniká vodík. Odhaduje se, že na prvním bloku vzniklo 300 – 600 kg a na bloku č. 2 a č. 3 cca 300 až 1000 kg. [10]

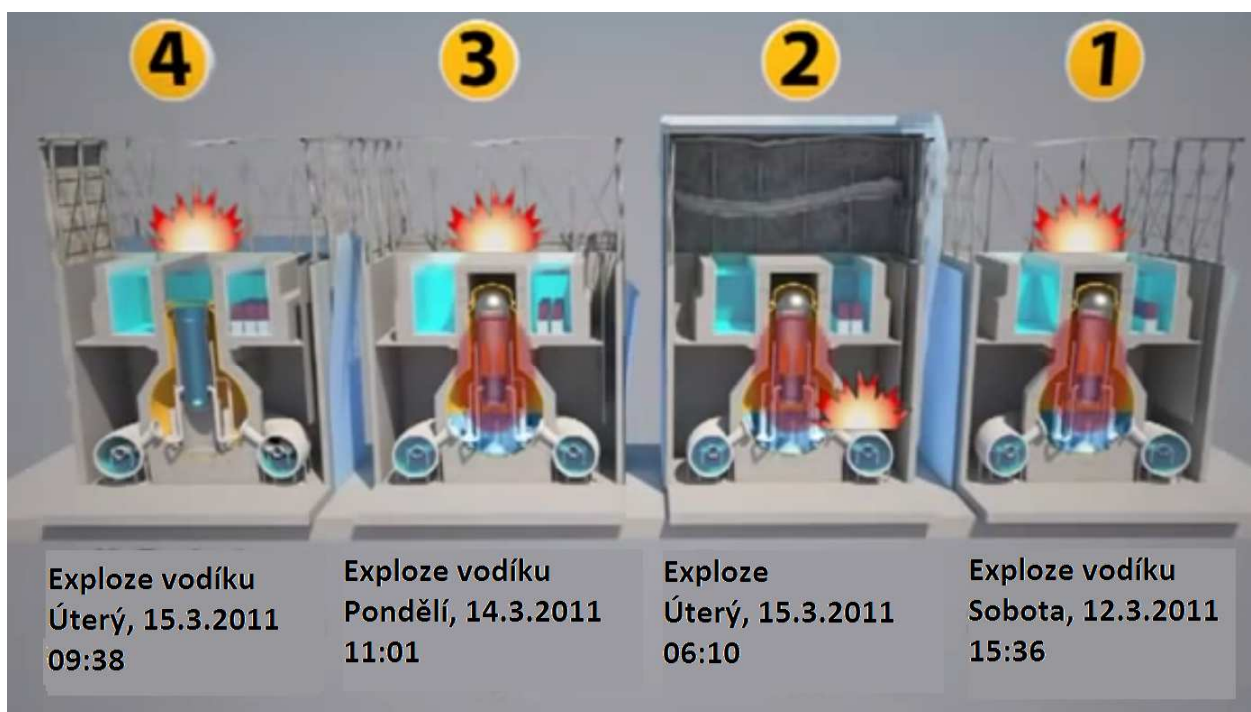


Pro předejití roztržení tlakové nádoby reaktoru byla pára z reaktoru upuštěna do budovy kolem reaktoru, včetně několika radioaktivních prvků (jód, cesium, atd.). Pára obsahovala také některé vzácné plyny i zmíněný vodík, který je v určité koncentraci v reakci se vzduchem (respektive s kyslíkem) vznětlivý. Dolní mez hořlavosti ve směsi se vzduchem je 4%, dolní mez výbušnosti je 18,3%. Opuštěním páry byl snížen přetlak z 0,8 MPa na 0,4 MPa (projektováno na max. přetlak 0,4 – 0,5 MPa).

V případě odhalení palivových tyčí na 50% sice dochází k výraznému nárůstu teploty na palivových krytech, ale nedochází k závažnějšímu trvalému poškození. Při poklesu chladiva pod 1/3 tyčí už dochází k nárůstu teploty nad 900 °C, pokrytí praská a štěpné produkty mohou unikat do okolí.

Vodík, který se společně s párou nahromadil v budovách reaktorových sálů bloku 1 a 3 vytvořil natolik koncentrovanou směs, až došlo k výbuchu. Došlo k poškození střechy budovy, nicméně železobetonová konstrukce reaktoru zůstala nepoškozena a výbuch nenapáchal závažnější škody. Do 4. bloku se vodík dostal přes společný ventilační systém ze třetího bloku.

Na druhém bloku byl průběh odlišný. Exploze nastala v budově reaktoru, nicméně někde v okolí kondenzační části ochranné obálky, která nevydržela tlak který se nacházel uvnitř obálky. Došlo k nekontrolovatelnému úniku plynů, vody (dávka 1000 mS/hod), štěpných produktů a aerosolů skrz cca 20 cm trhlinu což zkomplikovalo další záchranné práce a způsobilo ozáření v okolí elektrárny.



Obr. č.11 – Exploze na jednotlivých blocích 1-4 JE Fukušima I, modifikováno [11]

4.4.3 Zaplavení reaktorů slanou vodou

Výbuch a požáry poškodily všechny 4 reaktorové budovy a na blocích 1-3 bylo poškozeno palivo. Dalším řešením tedy bylo zalít reaktory a ochranné obálky slanou, oceánskou vodou společně s kyselinou boritou. To se dělo nejprve požárními auty a poté přes jeřáby na čerpání betonu, které byly úspěšnější než požární auta. S podporou zalévání později také pomohly vrtulníky a lodě. Tlak byl regulován upouštěním páry do ovzduší, čímž došlo ještě k několika menším únikům radioaktivních látek.

4.4.4 Bazény skladování vyhořelého paliva

V areálu JE Fukušimě I je vyhořelé palivo uloženo v sedmi bazénech. Šest bazénů je vedle jednotlivých reaktorů, jeden společný bazén je mimo budovy s reaktory.

Tyto bazény pro skladování vyhořelého paliva z reaktorů se nachází v pravé horní části (viz. obr. č. 9). Velkou hrozbou bylo to, že v případě odpaření vody by mezi obnaženým vyhořelým (radioaktivním) palivem a okolním prostředím nebyla ochranná obálka tak jako u reaktoru. Blok č.4 byl v době úderu tsunami v pravidelné odstavce. Samotný reaktor byl prázdný a všechny palivové soubory byly v BSVP. Jak ty vyhořelé, tak nové články čekající na zavážku do reaktoru. Celkem bylo 204 nových a 1331 těch, které v reaktoru už nějakou dobu byly. Dohromady tak bylo v BSVP 1535 palivových souborů. Bylo vyřazeno chlazení bazénů a musela být doplňována voda, aby bylo zamezeno tavení vyhořelého paliva. Nouzové chlazení bylo zajištěno pouze doléváním vody z oceánu, takže se do bazénů dostala sůl a další nečistoty. Výbuch vodíku zdevastoval celou horní část budovy a různé části trosek tak napadaly i do bazénů s vyhořelým palivem. Po podrobnějším prozkoumání se ukázalo, že trosky nezpůsobily žádné větší problémy.

4.5 Stabilizace reaktorů

Úniky vysoce radioaktivní vody z 2. bloku byly zastaveny, tato voda byla zachytávána v nádržích, které běžně slouží pro likvidaci nízko aktivní vody, která je součástí běžného provozu JE. Nízko aktivní voda musela být vypuštěna do oceánu, aby bylo uvolněno místo pro 10 tisíc tun vysoce aktivní vody. NA voda o objemu 1 m³ odpovídá přibližně 1 litru VA vody. [10]

Dále je do kontejnmentu čerpán dusík, aby byla vyloučena další exploze vodíku s kyslíkem.

Nyní probíhá přemístění vyhořelého paliva z bazénů do připravených kontejnerů a je odváženo mimo budovu reaktoru. Likvidace všech následků ovšem bude trvat několik let. [13]

4.6 Radiační situace

Původní 3 km evakuační zóna v prvních dnech byla včas rozšířena na 30 km, což zabránilo potencionálnímu ohrožení okolního obyvatelstva. Počáteční obavy ze zasažení Tokia (cca 250km) radiačním mrakem nakonec byly zbytečné, neboť záření v této oblasti bylo naměřeno na úrovni přirozeného pozadí.

Na obr. č. 12 z února roku 2013 lze vidět, že na první budově je již postavena provizorní obálka, zamezující vniku dešťové vody. Na reaktoru č.3 a č.4 probíhají pohavarijní práce. Časový odstup úkonů personálu byl z hlediska klesající nebezpečnosti poškozeného paliva odložen. Za povšimnutí také stojí enormní množství nádrží na zachycení radioaktivní vody.

Obnovené chlazení reaktorů a bazénů skladování paliva zajišťuje teplotu v bezpečných mezích. Díky instalaci filtrace vzduchu v budovách reaktorů byl umožněn vstup pracovníků.



Obr. č.12 – Letecký snímek areálu Fukušima I – únor 2013 [12]

Událost byla ohodnocena nejvyšším stupněm podle stupnice INES (International Nuclear and Radiological Event Scale). Kritéria pro hodnocení události jsou následující [14]:

- Dopad na životní prostředí
- Úroveň poškození zařízení a zasažení prostředí uvnitř JE
- Dopad na bezpečnostní systémy

Jednotlivé stupně (7) :

1. Funkční nebo provozní odchylka. Nepředstavuje riziko, ale upozorňuje na nějaký nedostatek
2. Porucha, která neovlivňuje bezpečnost, ale na jejím základě může dojít k přehodnocení bezpečnostních systémů
3. Vážná porucha při které dojde k úniku radioaktivity mimo elektrárnu, ale není třeba zvláštních opatření
4. Havárie s účinky v JE s částečným poškozením AZ, ozáření pracovníků, únik radioaktivity mimo areál JE, ale není třeba zvláštních opatření
5. Havárie s účinky na okolí kdy je poškozena velká část AZ s únikem radioaktivity mimo elektrárnu. Postupuje se podle havarijních plánů.
6. Závažná havárie při které dojde k úniku biologicky významných radionuklidů mimo elektrárnu. Opatření podle havarijních plánů.
7. Velká havárie s únikem velkého množství radionuklidů do okolí s možností zdravotních následků obyvatel, dlouhodobé následky na životní prostředí

4.7 Reakce ve světě

Události v JE Fukušima jsou největší od havárie v Černobylu roku 1986. Vyvolaly ve světě nejistotu a mnoho otázek o zabezpečení ostatních jaderných zařízení. Jako první zareagovalo Německo, které nechalo jako předběžné opatření odstavit 8 nejstarších jaderných bloků. Dále se rozhodlo, že do roku 2022 odstaví i zbylé jaderné elektrárny (9 reaktorů). Evropská unie reagovala povinnou prověrkou všech evropských JE. Jedná se o zátěžové zkoušky, tzv. stress testy, kterým se věnuje další kapitola.

Média (hlavně bulvární) zkreslují fakta. Navzdory dvěma desítkám tisíc mrtvých v důsledku zemětřesení a tsunami se informování o přírodní katastrofě v Japonsku velice rychle zúžilo na mnohdy zavádějící zprávy o havárii Fukušima, viz. bulvární titulek “Takhle míří RADIOAKTIVNÍ MRAK do Česka!”²

Trefně reagovala na ukvapené závěry v médiích předsedkyně SÚJB paní Dana Drábová: „Panika, kterou mohou vyvolat média i politici, představuje větší nebezpečí, než skutečné ohrožení radiací“ [22]

² Dostupné na: <http://tn.nova.cz/zpravy/zahranici/infografika-tak-muze-radioaktivni-mrak-dorazit-do-ceska.html>

5 ZÁTĚŽOVÉ TESTY JADERNÝCH ELEKTRÁREN V EVROPĚ

V první řadě je třeba říci, že přes veškeré znalosti a schopnosti moderní techniky nemůžeme jadernou havárii zcela vyloučit, a proto musíme být připraveni ji v případě potřeby zvládnout tak, aby dopad na životní prostředí a okolní obyvatelstvo byl co nejmenší.

5.1 Poučení z Fukušimy

Zpětně jsme schopni vydedukovat několik závěrů, ze kterých se dá poučit [22]:

- V jednu chvíli může dojít k havárii na více blocích, klidně ze stejné příčiny.
- K havárii může dojít v důsledku extrémní přírodní události, která může způsobit výpadek několika bezpečnostních smyček v jeden okamžik, popřípadě rychle po sobě.
- Může dojít ke zničení infrastruktury, takže JE by měla zvládnout havárii i bez podpory z vnějšku.
- Dostatečná robustnost jednotlivých bezpečnostních bariér a správné pochopení a principy ochrany

5.2 Zadání

Po těžké havárii v JE Fukušima Daiichi, která odstartovala 11.3.2011, požádala Evropská rada na svém zasedání ze dne 24. a 25. března 2011 o komplexní ověření připravenosti jaderných elektráren EU ve světle události z Fukušimy. Jednalo se o zátěžové testy, tzv. stress testy, které se poprvé dotknuly všech 140 reaktorů ve státech Evropské Unie (včetně Švýcarska a Ukrajiny). Zkušenosti z události ve Fukušimě mohou být využity k případnému přehodnocení dosavadních postupů [17].

Evropská rada vyzvala agenturu ENSREG (European Nuclear Safety Regulators) a Evropskou komisi, aby určily rozsah a zaměření stress testů s podporou asociace WENRA (Western European Nuclear Regulators Association), která vypracovala předběžnou specifikaci zátěžových testů v dubnu roku 2011 v závislosti na zkušenostech z JE Fukušima. Celkové stanovisko rozsahu těchto testů bylo prezentováno 24. května 2011 a to v podobě tří bodů [17]:

I. Odolnosti jaderných zařízení vůči extrémním vnějším přírodním vlivům:

- Zemětřesení větší než maximální projektové
- Záplavy větší než maximální projektové

II. Úplná ztráta bezpečnostních systémů

- Dlouhotrvající úplná ztráta elektrického napájení
- Dlouhotrvající ztráta koncového jímáče tepla

III. Postup při řešení těžkých havárií

- Havárie s tavením AZ, včetně následných efektů (tvorba vodíku)
- Podmínky v bazénu skladování vyhořelého paliva

Výsledky prověrek měly být provedeny tak, aby je provozovatel předal do konce října 2011 regulačnímu orgánu a ten je do konce roku 2011 předal Evropské radě. Samotné zhodnocení začalo 1. ledna 2012. Zátěžové testy provedli provozovatelé jaderných elektráren (u ČR ČEZ a.s.) pod dohledem kompetentních národních regulačních orgánů (v ČR SÚJB).

Cílem zátěžových testů bylo zodpovězení několika otázek:

- Ovlivnění bezpečnosti JE vlivem lokality či chybami v projektu
- Dostatečná odolnost vůči extrémním přírodním vlivů včetně těch, které se na našem území za dobu provádění záznamů nevyskytly, ale teoreticky mohou
- Rezervy do maximální myslitelné havárie
- Rozumně aplikovatelná opatření (technická a organizační) pro zvýšení rezerv bezpečnosti při maximální havárii

5.3 Provedení zátěžových zkoušek

V období červen – září 2011 proběhlo samotné provedení testů – hodnocení odolnosti JE v podmínkách, které nastaly ve Fukušimě.

5.3.1 Odolnost vůči extrémním přírodním vlivů JE v EU

Technický návrh a provoz zařízení musí být schopno vypořádat se s nepředvídatelným vnějším nebezpečím, tj. zemětřesení, záplavy a extrémní počasí, které nebyly v původním projektu uvažovány (mimo konstrukční rezervy).

5.3.1.1 Zemětřesení

Seismické přístroje by měly být součástí každé JE. Rozlišujeme dva druhy návrhu úrovně zemětřesení:

- Maximální výpočtové zemětřesení (MDE) – četnost jednou za 10 tisíc let
- Projektové zemětřesení (DE) – četnost jednou za 100 let

Ke konci procesu vzájemného hodnocení vydala IAEA několik zjištěných z jednotlivých národních zpráv, které byly doporučeny pro zlepšení. Všechny důležité budovy a zařízení by měly odolat horizontálnímu seismickému zrychlení $0,1g$ s četností výskytu 10^{-4} za rok. Mělo by být použito tvrdších materiálů pro konstrukci bezpečnostních systémů, struktur a komponent tak, aby vydržely i maximální výpočtové zemětřesení [19].

Téměř všechny země mají už v projektu projektové zemětřesení s výskytem jednou za 10 tisíc let. Nicméně se objevily specifické případy [18]:

- Francie - Doporučuje se zavést tzv. „Pravděpodobnostní seismické ohrožení“ pro navrhování nových jaderných zdrojů a pro budoucí revize seizmických návrhů na základě stávajících reaktorů za účelem poskytnutí informací o pravděpodobnosti událostí (roční četnost výskytu).
- Rumunsko - Analýzy ukázaly, že pravděpodobnost překročení projektového zemětřesení bylo počítáno s četností 10^{-3} za rok. To sice splňuje s minimální úrovní mezinárodních standardů, ovšem ne s běžnou praxí v Evropě. Dodatečnou modernizací se dosáhne odolnosti s opakováním 5×10^{-5} za rok pro bezpečnostní systémy, komponenty a budovy.

Opatření by mělo být použito takové, aby konstrukce bezpečně zvládly zemětřesení opakující se jednou za 10 tisíc let se špičkovým zrychlením podloží alespoň 0,1g.

5.3.1.2 Záplavy

Téměř všechny země považují za projektové záplavy ty s pravděpodobností 10^{-4} za rok. Byly vydány doporučení spíše orientované na vydatnější, déle trvající deště. Jedná se například o zvýšení vstupů do budov, které obsahují bezpečnostně významné systémy a komponenty. Také se provedlo zvýšení odolnosti kabelových kanálů proti dlouhotrvajícím deštům. Některé doporučení pro konkrétní země: [18]

Belgie – Původní projekt počítal s opakováním záplav jednou za 400 let, novější návrh bude počítat s četností jednou za 10 tisíc let, tzv. nový DBF (Design Basis Flood).

Francie – S ohledem na statistické záznamy je projektová povodeň projektována pouze na 10^{-3} za rok.

Nizozemí – JE Borssele je chráněna proti zaplavení sítí hrází v Zeelandu (nizozemská provincie). Vylepšením této sítě dosáhne pravděpodobnost výskytu záplavy 4×10^{-3} za rok.

5.3.1.3 Ostatní

Bylo testováno, zda střechy důležitých budov vydrží větší souvislou vrstvu sněhu, než s kterou bylo počítáno v projektu. Z ČR víme, že muselo být vyztuženo několik střech, včetně střechy hasičského záchranného sboru.

5.3.2 Úplná ztráta bezpečnostních systémů (napájení)

Jedná se o tzv. SBO (Station blackout) což je celková ztráta elektrického napájení v elektrárně. Po přechodu na SBO nastává u většiny reaktorů zahřívání AZ po 1 - 10 hodinách. Záleží na typu reaktoru, u BWR nastává zvýšení teploty AZ po 30 – 40 minutách. Jedná se o reaktory Olkiluoto 1 a 2 (Finsko) a Forsmark 1 a 2 (Švédsko), které mají chlazení zajištěno ze

systémů pracujících na elektrickém napájení. Podle Švédského regulátora byl tento nedostatek zjištěn v původním návrhu a nouzové napájení by bylo zajištěno ze 4 havarijních DG nebo 2 havarijních DG a plynových turbín.

Každá elektrárna má odlišné možnosti pro obnovení elektrického napájení. Některé elektrárny mají možnost přivést nouzové napájení přímo z okolní přehrady, popř. jiného zdroje, který má dostatečný výkon.

Ztráta koncového jímače tepla a chybějící alternativní chlazení nebylo identifikováno jako překvapivý stav pro jakoukoliv testovanou JE. Každá elektrárna má k dispozici několik možností chlazení, které zajistí chlazení po dobu alespoň 72 hodin, ovšem v případě že má napájení z nouzového zdroje (DG, akumulátorové baterie). Objem chladicí vody, která je k dispozici na místě vystačí na 6-8 dní. Silně se doporučuje identifikovat a implementovat alternativní způsob chlazení.

5.4 Zhodnocení a výsledky

Konečné hodnocení, tzv. peer review provádělo 70 expertů z různých zemí světa včetně organizace IAEA (MAAE).

Prvotní proces hodnocení výsledných zpráv z jednotlivých JE bylo tzv. plošné zhodnocení (Desktop review). Každý hodnotitel měl přístup ke všem zprávám ze všech elektráren a mohl položit písemnou otázku na příslušný národní regulační úřad. Takto bylo podáno přes 2 tisíce otázek [17].

Následující proces, tzv. dílčí zhodnocení (Topical reviews) trval od 5. do 17. února 2012, kdy se všichni hodnotitelé sešli a provedli hloubkovou analýzu. Každý ze zástupců své země provedl prezentaci pro každý bod zadání a odpověděl na otázky, které vznikly v první části hodnocení. Závěrem tohoto hodnocení byla doporučení pro jednotlivé JE včetně seznamů doplňujících otázek, které mají být v průběhu návštěv jednotlivých států vyjasněny [17].

Další část byla tzv. zhodnocení jednotlivých států (Country reviews), kdy během března 2012 navštívili každou ze 17 zemí a provedli podrobnější přezkoumání o jednotlivých JE.

Výsledky zátěžových testů jasně ukazují, že zvláštní pozornost je třeba věnovat pravidelnému bezpečnostnímu hodnocení, jako mocnému nástroji k pravidelnému přehodnocení bezpečnosti JE. Externí přírodní nebezpečí by mělo být kontrolováno a přehodnoceno tak často, jak to je vhodné, nejméně však jednou za 10 let.

6 ZÁTĚŽOVÉ TESTY ČESKÝCH JADERNÝCH ELEKTRÁREN

Zátěžové testy byly provedeny na ETE a EDU v rozmezí červen – září 2011. Provozovatelem je firma ČEZ a.s. a výsledky byly předány příslušnému dozornému orgánu, tedy SÚJB.

6.1 JE DUKOVANY

6.1.1 Extrémní přírodní vlivy

6.1.1.1 Zemětřesení

Dukovany se nacházejí v tektonicky klidné oblasti a obecně v celém regionu Střední Evropy se nenachází žádné oblasti, které by umožňovaly vznik extrémně silných zemětřesení srovnatelných se silou v Japonsku 11.3.2011.

Analýzy jsou prováděny na základě výpočtů a mapy seizmického ohrožení daného místa. Lokalita EDU má úroveň seizmického ohrožení lokality hodnotu špičkového zrychlení podloží $SL2 = 0,06 \text{ g}$ s dobou výskytu 10^{-4} / rok, která nebude v 95 % překročena. Projektové zemětřesení skupiny $SL1$ má četnost výskytu 1x za 100 let (10^{-2} / rok) se zrychlením podloží $0,05 \text{ g}$ v horizontálním směru a $0,035 \text{ g}$ ve vertikálním směru s pravděpodobností 90% nepřekročení.

PGA (Peak ground acceleration, špičkové zrychlení základu) je zrychlení při zemětřesení, ale narozdíl od RichtEROVY stupnice to není údaj o celkové energii zemětřesení, ale údaj o tom jak silně se země třese v konkrétní geografické oblasti. Energie z epicentra se rozptyluje ve vlnách a PGA zaznamenává zrychlení těchto pohybů. V rámci jednoho zemětřesení se hodnoty PGA na různých místech liší a závisí na mnoha faktorech, např. geologii terénu, vzdálenosti od epicentra, hloubce zemětřesení, atd. [23].

Špičkové zrychlení se vyjadřuje nejčasteji v g (gravitační zrychlení) jako desetinná část nebo v procentech, přičemž $1 \text{ g} = 9,81 \text{ m} / \text{s}^2$.

Obecně lze říci:

$0,001 \text{ g}$ ($0,01 \text{ m} / \text{s}^2$) – zemětřesení, které je rozpoznatelné lidskými smysly

$0,02 \text{ g}$ ($0,2 \text{ m} / \text{s}^2$) – lidé ztrácejí rovnováhu

$0,50 \text{ g}$ ($4,9 \text{ m} / \text{s}^2$) – velmi silné zemětřesení, odolá jen dobře navržená stavba

Zátěžové testy vyžadovaly ověření způsobilosti na přibližně dvojnásobné hodnoty, než na které byl původní projekt navržen. Střední doba návratu $1 \times 10\,000$ let, $0,1 \text{ g}$ v horizontálním směru a $0,067 \text{ g}$ ve vertikálním směru. Proběhlo zodolnění bezpečnostně významných zařízení a budov na hodnotu špičkového zrychlení podloží $0,1 \text{ g}$ [17].

Realita je ovšem taková, že intenzita seismické události 0,1 g v lokalitě EDU není dle analýz a geologického průzkumu možná. Aproximací křivek seismického ohrožení EDU protažením do hodnot vyšších intenzit dostaneme četnost výskytu události o intenzitě 0,1 g 1x za 100 miliónů let!

Zařízení a stavební objekty, ve kterých se nacházejí bezpečnostní prvky byly zařazeny do kategorie „S“ a následně se dělí do 3 skupin:

- Sa (nově 1a) – Je vyžadováno zachování plné funkční způsobilosti během a po zemětřesení až do úrovně maximálního výpočtového zemětřesení včetně této hodnoty.
- Sb (nově 1b) – Je vyžadováno zachování mechanické pevnosti a hermetičnosti po zemětřesení až do úrovně max. výpočtového zemětřesení včetně.
- Sc (nově 1c) – Je vyžadována seismická odolnost jen z hlediska možných seismických interakcí, zejména zachování stability polohy během a po zemětřesení až do úrovně max. výpočtového zemětřesení včetně.

Na základě využití typových zkoušek, výpočtů nebo nepřímého hodnocení na základě provozních zkušeností byly rozděleny stavební konstrukce a zařízení spadající do kategorie „S“ do jednotlivých kategorií.

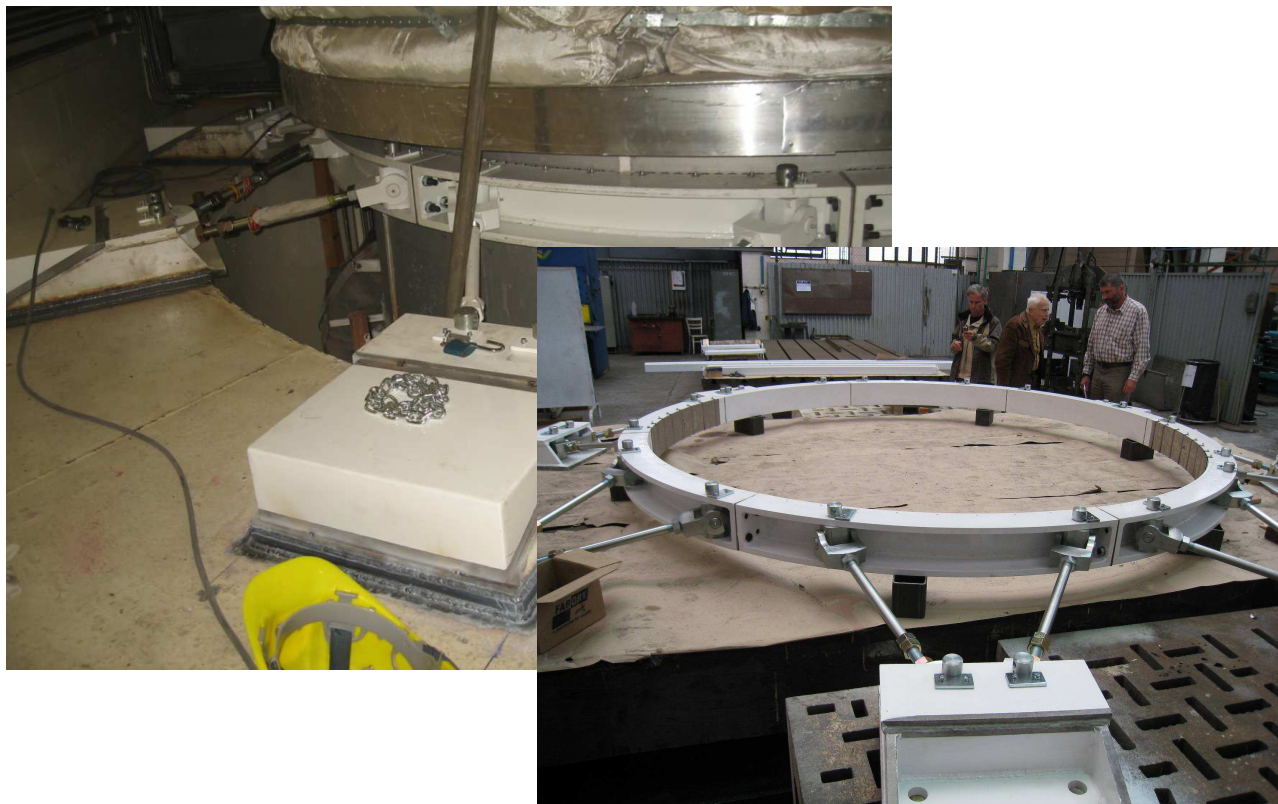
Bazén skladování vyhořelého paliva je součástí odolné železobetonové obálky, který by neztratil integritu ani při špičkovém zrychlení podloží 0,1 g.

V roce 2014 bude také provedeno seismické z odolnění budov. Přehled některých konkrétních projektových z odolnění:

- Seismické z odolnění stavebních konstrukcí, panelů a pultů
- Dostrojení omezovačů švihnutí HCP
- Zamezení úplné ztráty chladiwa při LOCA
- Zajištění seismické odolnosti TVD
- Z odolnění tělesa KO proti kmitům
- Zajištění obyvatelnosti BD a ND a rekonstrukce ventilace

Problémy by nastaly také v oblasti komunikace uvnitř i vně EDU. Proto byla zřízena speciální linka pro komunikaci mezi řídícím a zasahujícím personálem pomocí satelitních telefonů.

Lze konstatovat, že po úplném dokončení všech seismických z odolnění EDU budou zachovány bezpečnostní funkce až do hodnoty zrychlení podloží 0,1 g v horizontální rovině a 0,067 g ve vertikálním směru. Tato hodnota je výrazně nad hodnotou reálného ohrožení elektrárny.



Obr. č.13 – Seismické z odolnění kompenzátoru objemu na EDU[20]



Obr. č.14 – Seismické z odolnění stavební konstrukce na EDU [20]

6.1.1.2 Zápavy

Areál EDU se nachází v nadmořské výšce 383,5 - 389,10 m n. m, přičemž hlavní stavební objekty v kterých jsou důležité systémy z hlediska jaderné bezpečnosti leží na nejvyšší kótě, tedy 389,1 m. n. m. Nehrozí zatopení z přírodních nebo zvláštních povodní. Odtok z objektu elektrárny směřuje střechovitě do hluboko položených údolí řeky Jihlavy a Rokytne [21].

Vodní nádrž Dalešice se nachází na řece Jihlavě ve vzdálenosti 4 km od elektrárny. Maximální hladina vody při průchodu velkých vod je maximálně na kótě 381,50 m n. m. Výška samotné hráze je 88 m ode dna. Hypotetická vlna, která by nastala při protržení hráze nemůže nikterak ohrozit areál EDU (rozdíl max. hladiny a kóty elektrárny je 8 m a vzdálenost je příliš velká). Zařízení, které by potenciálně bylo ohroženo je čerpací stanice surové vody, která zajišťuje dodávku průmyslové vody pro provoz EDU. Čerpací stanice není řazena mezi bezpečnostní systémy a ztráta je řešena jako abnormální stav – požadavek na odstavení všech reaktorů. Doba na kterou vystačí zásoby surové vody v elektrárně pro práci čerpadel TVD je minimálně 400 hodin. Nejdůležitějšími zdroji tepla v případě havárie jsou [21]:

- Reaktor po cca 6 hodinách od odstavení – 11 MWt
- BSVP – 1 až 3 MWt (dle počtu skladovaných palivových kazet)
- 1 DG – 2 MWt (na jedoucí DG je potřeba cca 300 m³ za hod. TVD na chlazení)

Celkem se tedy jedná o zbytkový výkon z reaktorů 44 MWt, z BSVP až 12 MWt a pro všechny jedoucí DG na nominálním výkonu až 24 MWt.

Vodní dílo Mohelno, které se nachází 1 km od areálu elektrárny nepředstavuje taktéž potenciální hrozbu, neboť maximální dosažitelná hladina vody je o přibližně 80 m níže než areál Dukovan.

Na obou dílech jsou prováděny pravidelné technicko-bezpečnostní prověrky, které nezaznamenaly žádné jevy či skutečnosti, které by naznačovaly ohrožení bezpečnosti nádrží.

Hladina podzemních vod se nachází několik metrů pod základy staveb. Projektové hodnoty maximálních denních úhrnů dešťových srážek podle četnosti opakování jsou:

- 77 mm / den s opakováním 1 x 100 let
- 115 mm / den s opakováním 1 x 10 000 let.

Dešťová kanalizace stavebních objektů EDU byla navržena na hltnost 50 mm / hod dle původní normy ČSN. Proto lze očekávat problémy s hltností dešťové kanalizace při dlouhodobém a zvláště přívalovém dešti.

V budovách kde se nacházejí DG byla nainstalována mobilní protipovodňová stěna, která by se v extrémních případech namontovala na vstupní vrata a tím zamezila přístup vody. Bylo také provedeno z odolnění kabelových kanálů proti zatopení zvýšením výškové dispozice vstupů do kanálů.

6.1.1.3 Extrémní klimatické podmínky

Původní projektová východiska měla uvažovat četnost opakování 10 000 let. Před výstavbou EDU ovšem nebyly k dispozici dostatečné meteorologické podklady z lokality. Proto se použily hodnoty, které udávala norma ČSN pro běžné objekty.

V roce 2000 byly hodnoty přehodnoceny a z údajů naměřených alespoň za 30 let v lokalitě EDU a na okolních meteorologických stanicích stanoveny nové hodnoty. Pro projektové zatížení s četností 1 x za 100 let a pro extrémní výpočtové zatížení klimatickými účinky 1 x za 10 tisíc let.

V letech 2009 – 2010 byla provedena kontrola výpočtem na odolnost bezpečnostně významných objektů proti větru.

Pro ocenění odolnosti stavebních objektů a zařízení se uvažovaly tyto extrémní vlivy:

- Vítr
- Sníh / led
- Vysoká / nízká teplota

Tabulka č.2 – Parametry pro zatížení od extrémních přírodních jevů [21]

	Doba návratu 100 let		Doba návratu 10 000 let	
	Hodnota	Zatížení	Hodnota	Zatížení
Nárazový vítr	46,2 m/s	0,69 kN/m ²	60,6 m/s	1,26 kN/m ²
Sníh	109,0 mm	1,09 kN/m ²	195, 0 mm	1,95 kN/m ²
Max. teplota	39,0 °C		46,2 °C	
Min. teplota	-30,8 °C		-46,7 °C	

Hodnocení proti extrémním hodnotám meteorologických vlivů bylo provedeno pro objekty seismické odolnosti kategorie S (Sa, Sb, Sc).

Tabulka č.3 – Bezpečnostně významné objekty EDU [21]

ZNAČENÍ	NÁZEV	SEIZMICKÁ KATEGORIE
800/1-01,02	HVB budova reaktorů	Sb ³
805/1-01,02	Podélná etažérka	Sb
806/1-01/04	Příčná etažérka	Sb
490/1-01,02	Strojovna	Sb
530/1-01,02	Dieselgenerátorová stanice	Sb
460/1-01,02	Ventilační komín	Sb
593/1-01,02	Přístavek SHN	Sb
1-4A2.3	Přístavek elektro – 4. systém	Sb
581/1-01,02,05,06	Chladicí věže (CHV)	Sb
584/1-01,02	Centrální čerpací stanice (ČČS)	Sb
	Nádrže demivody 1000 m ³	Sb

Extrémní vítr

Revize parametrů zatížení větrem byla provedena v roce 2010. U některých objektů byla zjištěna nižší mezní odolnost než odpovídá nárazovému větru s dobou návratu 10 000 let [21].

V souvislosti se zahrnutím extrémních meteorologických podmínek do bezpečnostní zprávy EDU bylo zjištěno, že při extrémním větru s periodicitou jednou za 10 tisíc let (60,6 m/s $\approx$ 218 km/hod) nelze vyloučit zborcení chladicích věží. Únosnost věží je zajištěna jen do max. hodnoty s periodicitou 100 let (46,2 m/s $\approx$ 166 km/hod). S pádem chladicích věží je velice pravděpodobná také porucha „Uplná ztráta napájení vlastní spotřeby“ na všech blocích, protože dle ČEPS je projektová odolnost vedení vn a vvn v lokalitě EDU do rychlosti větru cca 30 – 33 m/s (108-119 km/hod) [21].

Bezpečnostní systém technické vody důležité nemá samostatný odvod tepla do atmosféry a je propojen s chladicími věžemi. V případě poškození CHV by se snížila schopnost odvodu tepla prostřednictvím TVD do koncového jímáče tepla pro všechny 4 bloky EDU. Je třeba si uvědomit, že ztráta koncového jímáče tepla by vedla k nárůstu teplot TVD a tudíž k horšímu chlazení DG, což zvyšuje riziko jejich výpadku s postupným přechodem do SBO [21].

³ Sb - Je vyžadováno zachování mechanické pevnosti a hermetičnosti po zemětřesení až do úrovně max. výpočtového zemětřesení včetně

Hlavní rizikem extrémního větru je to, že systém TVD nemá jiný nezávislý systém odvodu tepla (rozstřík, rozliv, atd.) a hlavní chladicí věže nejsou dostatečně odolné.

Extrémní sníh

Případné poškození střechy CČS (Centrální čerpací stanice) v důsledku extrémního větru by mohlo mít dopad na provozuschopnost čerpadel TVD. Pokud vezmeme v úvahu umístění obou CČS není pravděpodobné, že by EDU přišlo o všech 2 x 12 čerpadel TVD v jednom okamžiku.

Nový výpočet zatížení střechy strojovny tíhou sněhu z roku 2010 odhalil odlišnost oproti výpočtům z roku 2000. Nový výpočet mezní odolnosti je pouze $0,95 \text{ kN/m}^2$ (95 cm čerstvého sněhu), tedy nižší hodnota než která odpovídá úrovni stoletého sněhu.. Pád střechy strojovny v důsledku extrémního větru nebo sněhu by mohla přinést určitá rizika, jelikož se zde nacházejí některá bezpečnostně významná zařízení (havarijní napájení PG, potrubí TVD, systémy dochlazování reaktoru, atd.). Při nejméně příznivém vývoji by mohlo dojít ke ztrátě TVD nebo ztrátě chlazení DG. Poškození paliva v reaktoru nebo BSVP vlivem pádu střechy reaktorového sálu je velice nepravděpodobné [21].

Nejohroženějším stavebním objektem v areálu EDU jsou garáže HZSp, kde se dostáváme při souvislé pokrývce čerstvým sněhem na hodnotu mezní únosnosti konstrukce již při 33 cm. Střecha strojovny CČS má mezní statickou únosnost 73 cm čerstvého sněhu.

Preventivním opatřením je včasné povolání pohotovosti na odklizení sněhu, případně zvýšením teploty uvnitř budovy, která sníží vrstvu sněhu odtáváním. Pokud vrstva sněhu na objektech CČS, HVB dosáhne mezní hodnoty, aktivuje se havarijní štáb a odstavují se bloky.

Extrémní teploty

Pro podmínky extrémně vysokých teplot se uvažuje provoz po dobu 6 hodin na teplotě okolního vzduchu $46,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Pokud by došlo k výpadku napájení z vnější sítě, bylo by zregulováno na vlastní spotřebu a tedy napájeno z vlastní výroby. V případě nezregulování na VS by bloky přešly na napájení z DG. Teplota mazacího oleje se musí udržovat na cca $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a teplota chladiva vnitřního okruhu na $83 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [21].

Při působení extrémně nízké teploty vzduchu po dobu 5 dní ($-35,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ s periodou opakování 10 000 let) byly uvažovány všechny vlivy a možnosti, které elektrárna „nabízí“. Z výsledků hodnocení vyplývá, že vytápění a ochrany proti zamrznutí jsou dostatečně dimenzovány tak, aby zvládly pokrýt potřeby tepla i za velmi nízkých teplot.

Závěrem bylo doporučeno udělat analýzu odolnosti objektů hasičského záchranného sboru, HVB a CČS na extrémní podmínky, včetně realizace opatření pro záložní koncový jímáček tepla.

6.1.2 Ztráta TVD

Cílem této analýzy je určit dobu, po kterou vydrží zásoby technické vody důležité v případě iniciační události extrémní větr.

Systém technické vody důležité (TVD) je podpůrný systém určený k odvodu tepla ze zařízení bezpečnostních systémů a systémů souvisejících s bezpečností. Jelikož se společně s aktivními systémy havarijního chlazení aktivní zóny podílí na likvidaci havarijních stavů, je klasifikován jako bezpečnostní systém. Svou funkci zastává také při normálním provozu. Každému bloku přísluší tři nezávislé podsystémy technické vody důležité. Každý z těchto tří podsystémů je dle projektu schopen dodat 100 % množství TVD, které je nutné pro zajištění odvodu tepla z I.O. a bazénu skladování vyhořelého paliva. Limitní teplota TVD je stanovena na 33°C z důvodu dodržení projektové funkce systému TVD [23].

Iniciační událost, kdy dojde k pádu všech chladících věží v důsledku extrémního větru o rychlosti větší než 218 km / hod, který také způsobí výpadek linek 400 kV a 110 kV společně s nezregulováním bloků na vlastní spotřebu. Pádem věží dojde k porušení integrity potrubí všech 3 systémů TVD v oblasti sifonů u chladících věží. Dochází tedy k úplné ztrátě koncového jímáče tepla systému TVD a sifony na vratných trasách TVD jsou zničeny. Čerpací stanice Jihlava je bez elektrického napájení, nelze tedy po delší dobu chladit a doplňovat okruh TVD.

Uražený sifon znamená porušení okruhu a rozliv vody u bazénu věží. Veškerá TVD se tedy nebude vracet přes vratky do okruhu. V případě že nemáme možnost doplňování z gravitačního vodojemu, znamená tato událost nevratnou ztrátu TVD. Pokud by navíc trosky z věží ucpaly spojovací kanál mezi bazénem věže a sacími jímkami čerpadel TVD, ocitla by se technologie bez technické vody důležité.

Důležitý je zásah personálu, který provede:

1. Odstranění průtoku přes nepotřebné spotřebiče, snížení průtoku přes nezbytné spotřebiče.
2. Maximální využití všech dostupných zdrojů vody pro doplňování jímek čerpadel provozovaného systému TVD.

6.1.2.1 Zásoba vody využitelné pro doplňování TVD

Využitelný objem je kalkulován v rozmezí od provozní hladiny v CČS -1,15 m až -5,5 m, při které dochází k automatickému odstavení čerpadel TVD. Množství využitelných zásob TVD je pro EDU následující [24]:

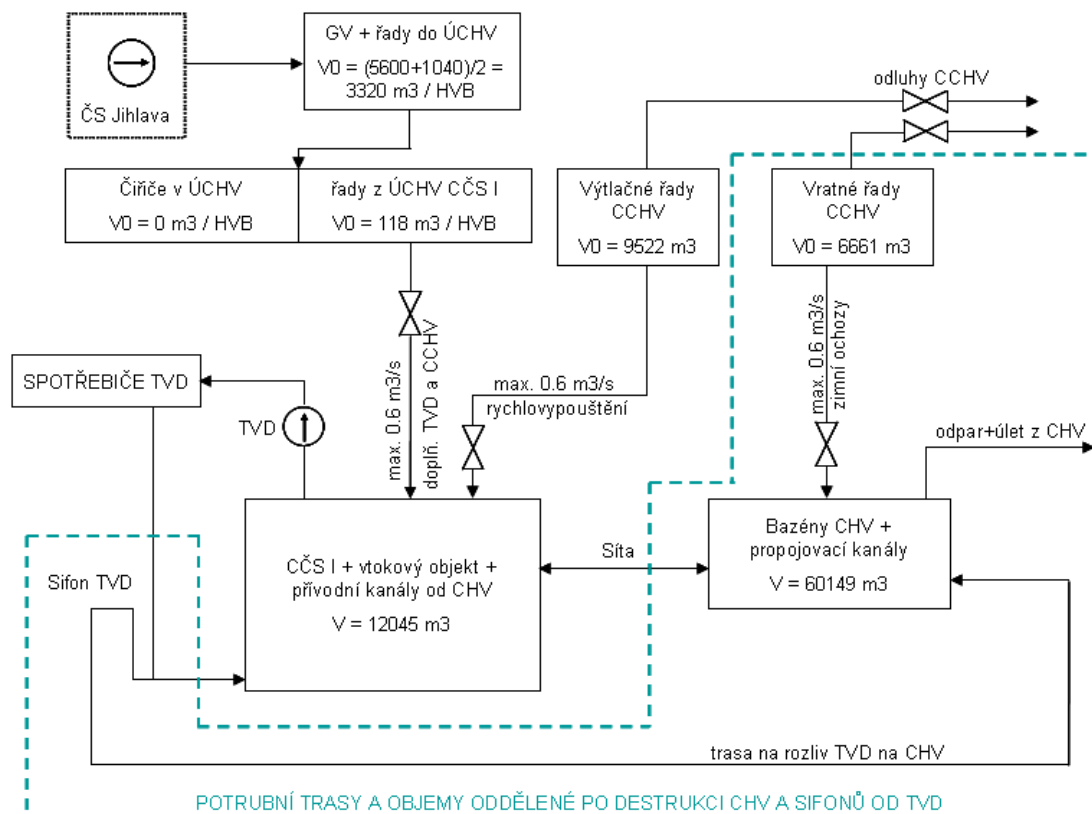
- a) **Gravitační vodojem** - pohotovostní objem vody v GV je v rozmezí 5600 – 7200 m³. Ve výpočtu bylo uvažováno s nejnižší hladinou 3.5 m, která odpovídá objemu 5600 m³ pro oba HVB.
- b) **Přívody z gravitačního vodojemu** - přívodní řady mají světlost DN 1200 (vnitřní průměr v milimetrech) a délku cca 1700 m. Vzhledem k výškovému vedení

přívodních potrubí lze z celkové délky využít jen cca 2 x 460 m, což odpovídá objemu 1040 m³.

- c) **Čiřiče v ÚCHV** - V objektu ÚCHV se nachází dvě trojice čiřičů s celkovým objemem 12 000 m³ (20 x 20 x 5), které nejsou využívány k čiření, ale zejména jako zásoba vody pro nouzové chlazení. Otázkou však zůstává jak dopravit vodu z čiřičů na CČS a s jakým průtokem, případně alespoň do nádrží demivody. Voda z čiřičů je totiž odváděna pouze po úroveň horního žlabu a je nutné provést technické úpravy na ÚCHV tak, aby mohla být voda z čiřičů gravitačně odváděna i při poklesu hladiny pod úroveň horního žlabu.
- d) **Přívodní řady** - Přívodní řady z ÚCHV do ČS I jsou dlouhé cca 150 m, přívodní řady do ČS II pak cca 1050 m. Světlost řadů je DN 1000. Tomu odpovídá využitelný objem přívodních řadů do CČS I 118 m³ a využitelný objem přívodních řadů do CČS II 825 m³.
- e) **Výtlačné řady cirkulační chladicí vody** - Využitelný objem od čerpadel BQDV3,4 po vstup do HVB1 je cca 4 689 m³ a využitelný objem od čerpadel BQDV1,2 po vstup do HVB1 je cca 4 833 m³. Celkový objem je tedy 9 522 m³
- f) **Vratné řady CCHV** - Od HVB1 po vstup na věže 1,4 je objem vody cca 5095 m³ a po vstup na věže 2,3 je objem vody cca 5525 m³. Celkový objem je tedy 10 620 m³. Nicméně pro využití vody z vratných řad CCHV potřebujeme mít průtočné kanály z bazénů věží k CČS, takže s tímto objemem nelze počítat.
- g) **CČS, vtokový objekt a odtokové kanály** – Celkový využitelný objem CCHV+TVD v CČS v rozsahu hladin -1,15 až -5,5 m je 12 045 m³.
- h) **Bazény chladících věží** – Při konzervativním scénáři se uvažuje ucpání síta mezi bazénem chladicí věže a přítokem do CČS, nemůžeme tedy objem 60 000 m³ v bazénech chladících věží využít.

Tabulka č.4 – Shrnutí zdrojů pro doplňování TVD po události extrémní vítr na HVB1[5]

Zdroj vody pro doplňování TVD	Využitelný objem [m ³]
Gravitační vodojem	2800
Řady z GV do ÚCHV	520
Řady z ÚCHV do CČS I	118
Výtlačné řady CCHV	9522
CČS + vtokový objekt + přívod. kanály (CCHV+TVD)	12045
CELKEM / 1 HVB	25005



Obr. č.15 – Schéma dostupných objemů po IU extrémní vítr [5]

6.1.2.2 Průtoky v systému TVD

Pro analýzu bylo nutno rozlišovat 4 režimy provozu TVD [5]:

- 1) **Nominální provoz TVD** - Na hlavní výrobní blok je průtok přes spotřebiče v nominálním režimu bloku 4700 m³/h
- 2) **Provoz TVD po IU (před náběhem DG a startem ELS)** - Po iniciační události dochází k destrukci sifonů TVD pod CHV a k nevratné ztrátě TVD proudící z otevřených řádů. Současně dojde i k výpadku napájení pro čerpadla TVD, tudíž průtok ve výtlačných řádech klesá na nulu. V jímkách TVD hladina dokonce mírně roste, neboť je doplňováno surovou vodou z GV. Jímky TVD jsou hydraulicky propojeny s jímkami BQDV, nárůst hladiny tedy není nijak vysoký.
- 3) **Provoz TVD v průběhu ELS** - Sumární průtok v režimu ELS je 6733 m³/h a je vyšší než v nominálním režimu především v důsledku zvýšení průtoku TVD na DG a spotřebičů najetých v rámci ELS. K mírnému zvýšení průtoku také přispělo zvýšení počtu provozovaných čerpadel TVD ze 2 na 4 (cca o 110 m³/h na 1 systém). Pokud by personál neprovedl redukci spotřebičů, tento průtok by byl i nadále v dalším časovém horizontu.

4) Provoz TVD po redukci průtoků TVD (po ukončení ELS):

- a. Obsluha provede odstavení DG 1,2QX a redukci nepotřebných spotřebičů na 1. a 2. systému SZN2 (systém zajištěného napájení). Celkový průtok se tak sníží na více než polovinu oproti stavu ELS a to na 3045 m³/h.
- b. Obsluha BD provede další činnosti dle předpisu P002i a odstaví další spotřebiče. Některé činnosti jdou provést přímo z BD, ale některé musí provést obsluha na místě. Celkový průtok se tedy povedlo snížit na cca 1600 m³/h.

Tabulka č.5 – Shrnutí průtoků pro HVB a doby výpadku TVD [5]

Fáze	Průtok TVD na HVB [m ³ /hod]	Doba do výpadku TVD
Nominální provoz bloku (výchozí stav před poruchou)	4700	-
Stav při chodu ELS na všech systémech	6733	-
Bez zásahu operativního personálu	6733	2,3 hod
Stav po odstavení DG 1,2QX a redukci nepotřebných spotřebičů na 1. a 2. systému SZN2	3045	7,2 hod
Stav po odstavení DG 1,2QW+QX a redukci nepotřebných spotřebičů na 1. systému SZN2	1600	12,5 hod

Postupem se zabývá předpis ES-0.7 (Vychlazování bloku s omezenou zásobou TVD). Základem je rychlé uzavření odluhu z výtlačných a vratných řádů BQDV (odluh cca 1 440 m³ / h pro oba HVB). Správnou manipulací podle předpisů se dá oddálit výpadek TVD, a tím přechod na SBO z původních 2,3 hodin na 7,2 hodin, případně až na 12,5 hodiny, což je téměř šestinásobná doba než kdyby manipulace provedeny nebyly. Problém ztráty koncového jímače tepla budou řešit ventilátorové věže (viz kapitola 6.1.2.3) [24].

6.1.2.3 Ventilátorové věže

Budou sloužit jako koncový jímač tepla, tzv. UHS (Ultimate Heat Sink) pro odvod zbytkového tepla z HVB při pádu chladících věží. Rozměr stavby bude 27 x 40 x 17 metrů a výstavba již byla zahájena na jaře roku 2014. Původní chladící věže budou zachovány pro chlazení kondenzátorů turbín. Umístění bude v dostatečné vzdálenosti od chladících věží tak, aby v případě pádu nedošlo k poškození ventilátorových věží⁴. [20]

Parametry ventilátorových věží:

Tepelný výkon:	88,4 MW / divize TVD
Plnění bezpečnostní funkce:	min 72 hodin (3 až 30 dnů)
Zálohování:	3 x 100%, oddělení záložních divizí

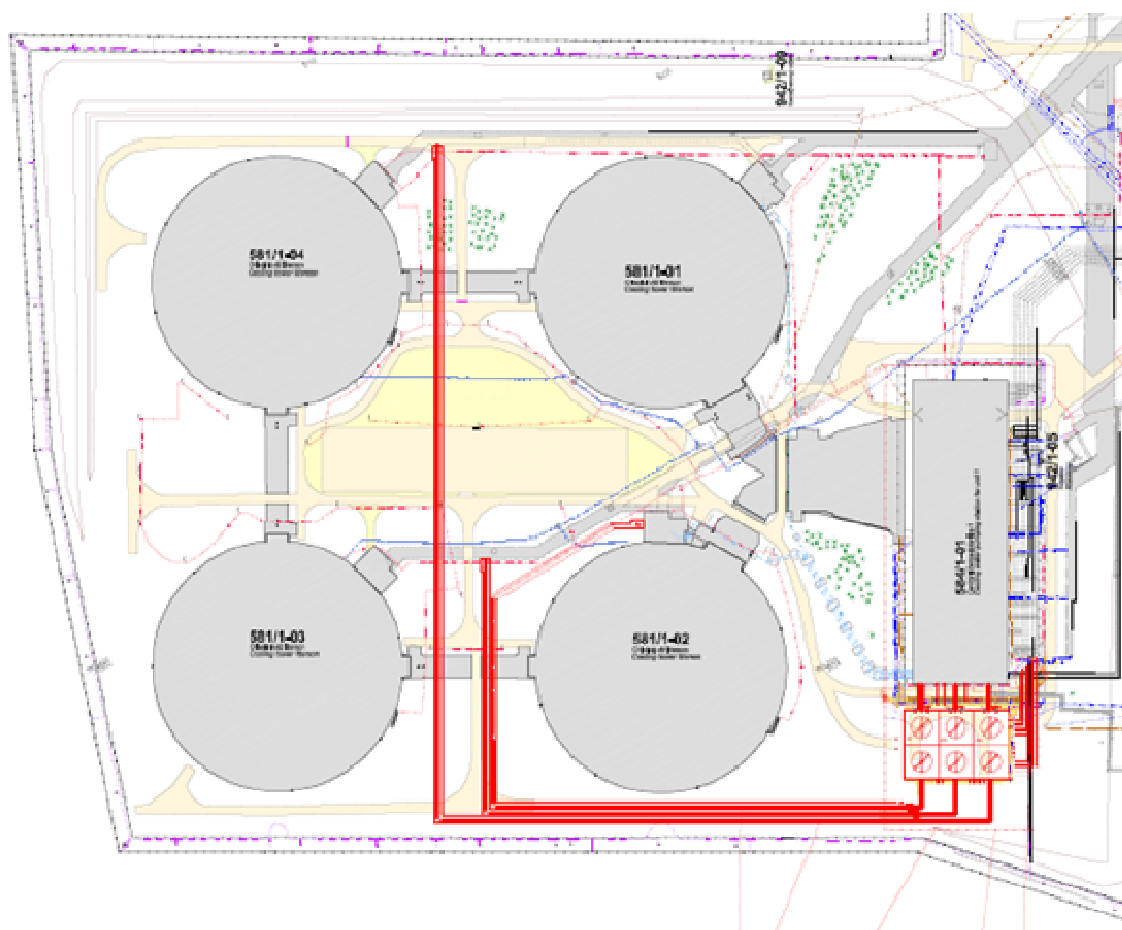
Požadovaná odolnost pro vnější iniciační události - externí vlivy:

extrémní vítr	70 m/s
extrémní teplota	+46 °C a -46°C
extrémní sněhové srážky	195 mm vodního sloupce
extrémní dešťové srážky	115 mm
seismická událost	PGA - 0,1g odpovídá cca 5,5° dle Richtera



Obr. č.16 - Návrh dodavatele REKO Praha [20]

⁴ Po osobní návštěvě areálu musím ovšem konstatovat, že ventilátorové věže rozhodně nejsou v dostatečné vzdálenosti, tedy cca 120 metrů od chladících věží. V areálu už na ně prostě není místo. Nicméně vypracovaná studie tvrdí, že věže by se při eventuálním pádu hroutili dovnitř, tedy vzdálenost přes 100 m není podmínkou.



Obr. č.17 - Umístění a zapojení UHS [20]

6.1.3 Ztráta vnějšího napájení a ztráta rezervních zdrojů

Rezervním zdrojem napájení jsou dvě linky 110kV z rozvodn Slavětice a Oslavany.

Nouzovými (havarijními) zdroji jsou pro každý blok 3 x DG s výkonem 2,8 MW, což je dostačující pro bezpečné odstavení a dochlazení reaktoru. Je tedy zajištěna 200 % záloha (3 x 100%). Spotřebiče 1. kategorie jsou ještě napájeny z akumulátorových baterií. Projektem požadovaná minimální výdrž baterií při maximální zátěži je 2 hodiny. Analyticky bylo prokázáno, že už při minimální redukci zátěže by byla prodloužena výdrž na 6–8 hodin a po odpojení některých nedůležitých spotřebičů a nouzového osvětlení by se výdrž baterií prodloužila odhadem na 10-20 hodin.

Při ztrátě pracovního i rezervního napájení, bez možností využít nouzové napájení bloků z DG, mohou být využity následující zdroje napájení:

Rezervní přípojnice 6 kV

V případě SBO pouze na některých blocích je možnost přivést napájení z jiného funkčního bloku popř. z funkčních DG náležících jinému bloku pomocí rezervních 6 kV přípojníc.

Využití linek 400 kV nebo 110 kV

Pokud po předcházejících událostech zůstává možnost připojit EDU přes vybrané napájecí trasy 400 kV nebo 110 kV, byla by vlastní spotřeba napájena z jedné z vodních elektráren, VE Dalešice (4 x 120 MW) nebo VE Vranov (3 x 6,3 MW). Obě možnosti byly v minulosti zkoušeny. Vranov byl testován v roce 2004, 2010 a systém obstál v pořádku. Dalešice mají možnost startu ze tmy a po lince 400 kV jsou schopny napájet EDU za 30 minut (60 min po 110 kV).

6.1.4 Station Blackout

Station Blackout je charakterizován jako ztráta všech napájení (pracovní, rezervní i nouzové) na všech blocích JE. Úplná ztráta elektrického napájení je vysoce nadprojektovou a nepravděpodobnou havárií a došlo by k ní pouze v případě, že by nenajelo ani jedno z níže uvedených napájení [21]:

- Vnější pracovní zdroje - normální napájení z rozvodny 400 kV Slavětice
- Vnitřní pracovní zdroje - nezregulování žádného z turbogenerátorů na vlastní spotřebu
- Vnější rezervní zdroje - rezervní napájení z rozvodny 110 kV Slavětice
- Vnější rezervní zdroje - rezervní napájení z rozvodny 110 kV Sokolnice
- Vnější rezervní zdroje - rezervní napájení z rozvodny 110 kV Čebín
- Vnitřní rezervní zdroje – napájení z VS sousedního bloku
- Všechny tři redundantní nouzové zdroje střídavého napájení pro SZN 6 kV na všech 4 blocích EDU (tj. celkem 12 DG)
- Diverzní vnější zdroj střídavého napájení vodní elektrárna Dalešice přes vedení 110 kV
- Diverzní vnější zdroj střídavého napájení vodní elektrárna Dalešice přes vedení 400 kV
- Diverzní vnější zdroj střídavého napájení vodní elektrárna Vranov přes vedení 110 kV

Při SBO je také nezbytné, aby byl směnový personál schopen zvládnout potřebná elektrická přepojení.

Dále bylo rozhodnuto o pořízení dvou kusů mobilních DG, tzv. SBO DG v EDU i ETE k ještě většímu posílení bezpečnosti při ztrátě napájení. S výstavbou se začalo na jaře 2014.

Pro zamezení rozvoje SBO jsou z hlediska technologie k dispozici dostatečné alternativní zdroje chladiva pro dlouhodobé chlazení AZ i BSVP bez dodávky elektrické energie. Rezervu 20 hodin pro obnovu napájení poskytuje gravitační vylévání napájecí vody z napájecích nádrží (2 x 150 m³) do PG (podmínka tlaku v PG < 0,9 MPa). Další časový prostor poskytuje hasičský záchranný sbor. Mobilními čerpadly je schopno dodávat požární vodu (popř. demivodu) do PG (připojení v zadní části bloků). Zásoby demivody jsou 3 x 1000 m³ pro každý dvojblok. Součet všech zásob vystačí na cca 4 dny [21].

Bazén skladování vyhořelého paliva by byl doplňován gravitačním drenážováním vody z barbotážních žlabů bez potřeby elektrického napájení, případně mobilními čerpadly hasičského záchranného sboru.

6.1.5 Doplnění stávajícího programu zlepšování bezpečnosti o opatření iniciované stress testy

Zátěžové testy poukázaly na nutnost provést několik zlepšení jak v oblasti lepšího zvládnutí nadprojektových událostí, tak v oblasti havarijní odezvy.

6.1.5.1 Zodolnění projektu JE Dukovany pro zvládání nadprojektových událostí

Tabulka č.6 - Zodolnění EDU pro zvládnutí nadprojektových událostí [21]

Opatření	Koncový termín realizace
Realizace diverzních systémů odvodu tepla z AZ přes II.O: - Doplňování vody do PG alternativním způsobem s dostatečným zdrojem vody - Doplnění přípojných míst pro alternativní odvod tepla pomocí požárního čerpadla	2013
Zajištění odolnosti proti SBO: - Zajištění napájení I.kategorie - Obyvatelnost BD/ND - Zabezpečení odvodu tepla z prostředků SKŘ	2013
Prodloužení vybíjecí doby AKU baterií I.kategorie: Zajištění napájení I. kategorie při SBO	2013

Záložní napájení TSFO (Technické systémy fyzické ochrany): ▪ Zajistit napájení komunikačních prostředků, osvětlení a turniketů	2012
Záložní napájení krytů (+ napájení tel. ústředny a svítidel): ▪ Vybudovat záložní elektrické napájení krytů AB1, PB1, PB2	2013
Zavedení důležitých měření do systému pohavarijního monitorování: ▪ Doplnění Pohavarijního monitorovacího systému o měření RA situace a stavu BSVP	2015
Zdodolnit stavební objekty vůči extrémním klimatickým vlivům. (Práce běží od října 2011)	2014
Zvýšení výkonu systému pohavarijní likvidace vodíku: ▪ Likvidace vodíku při vzniklých nadprojektových haváriích	2015
Koncový jímač tepla (ventilátorové věže): ▪ Oddělení bezpečnostních systému chlazení AZ od provozního systému chlazení (TVD, CHCV)	2015/2016

6.1.5.2 Zodolnění systémů v oblasti havarijní odezvy

Tabulka č.7 – Zodolnění systémů v oblasti havarijní odezvy [21]

Opatření	Koncový termín realizace
Zvládnout řízení při mimořádných podmínkách v lokalitě: ▪ Náhradní způsob řízení mimořádné události při ztrátě havarijního řídicího střediska nebo technicky podpůrného střediska	2014
Připravit školení a výcvik personálu pro zvládnutí mimořádných podmínek v lokalitě: ▪ nastavit systém a realizovat proškolení včetně výcviku pro těžké havárie	2014
Zabezpečit funkční systém komunikace a varování při mimořádných podmínkách v lokalitě: ▪ Vnitřní komunikace ▪ Komunikace s vnějšími orgány ▪ Alternativní varování a vyrozumění	2013
Zabezpečit zdroje pro podporu při zvládnutí mimořádných podmínek v lokalitě: ▪ Nezbytné technické dovybavení a proškolení pro provádění činností ▪ Personální zajištění ▪ Ochrana techniky a osob při seismické události ▪ Spolupráce s vnějšími složkami	2012

6.2 JE Temelín

6.2.1 Extrémní přírodní vlivy

6.2.1.1 Zemětřesení

V lokalitě ETE se nevyskytují žádné tektonické struktury, které by umožňovaly vznik silných zemětřesení. Dlouhodobé monitorování i vyhodnocení historických dat prokázalo, že oblast je seismicky velmi klidná. Dosavadní výsledky monitorování jsou [21]:

- V okruhu 40 km kolem ETE se nevyskytlo žádné zemětřesení s magnitudem větším než 1.
- V okruhu 50 km kolem ETE se vyskytlo pouze 9 mikrozemětřesení s magnitudy v rozmezí 1 - 2 a žádné s magnitudem větším.

V souladu s celosvětovou praxí se uvažují v projektu ETE dvě návrhové úrovně zemětřesení:

- MVZ – Maximální výpočtové zemětřesení (SL2)
- PZ – Projektové zemětřesení (SL1)

Tabulka č.8 – Projektové hodnoty zrychlení na ETE [21]

DBE	Úroveň	Zrychlení (PGA)	Doba trvání [s]	
MVZ (MDE)	SL2 _{hor} ⁵	0,7 g	4 – 8	7°MSK-64
	SL2 _{ver}	0,07 g	4 – 8	
PZ (DE)	SL1 _{hor} ⁶	0,05 g	4 – 8	6°MSK-64
	SL1 _{ver}	0,035 g	4 – 8	

PGA je maximální hodnota zrychlení v horizontálním a vertikálním směru v úrovni volného terénu. Četnost výskytu MVZ je jednou za 10 000 let, v případě PZ je to jednou za 100 let.

Bez ohledu na to, že ETE splňuje doporučení IAEA z hodnocení ohrožení lokality, bylo potřeba testovat na hodnotu zrychlení v horizontálním směru $PGA_{hor} = 0,1g$

V lokalitě nemůže dojít s 95% pravděpodobností k zemětřesení většímu než $PGA_{hor} = 0,08g$ (6,5°MSK-64). Výsledky analýz prokázaly, že všechny objekty i zařízení v nichž jsou umístěny některé bezpečnostní prvky dokonce výrazně překračuje stanovenou hodnotu $PGA_{hor} = 0,1g$, takže existuje ještě jistá rezerva na zbývající 5% neurčitost.

⁵ SL-2 – maximální výpočtové zemětřesení, četnost výskytu jednou za 10 000 let

⁶ SL-1 – projektové zemětřesení, četnost výskytu jednou za 100 let.

Budova hasičského záchranného sboru nebyla v rámci stress testů zahrnuta, nicméně i zde se provedlo několik zlepšení k posílení odolnosti.

6.2.1.2 Zápavy

Lokalita ETE se nachází v oblasti s normálním výskytem srážek. Objekty jsou z hlediska odtoku postaveny kaskádovitě, budovy jsou na nejvyšší kótě 507,10 m n. m. Maximální hodnoty denních srážek jsou 47,2 mm při 100 letém opakování a 88,1 mm při 10 000 letém opakování. Celková kanalizace má dostačující objem a je pravidelně udržována [21].

Hlavní objekty ETE jsou 135 m nad hladinou Hněvkovského vodního díla. Nádrž Lipno reaguje na požadavky dispečinku z nádrže Hněvkovice tak, aby byla zachována minimální hladina pro čerpání do elektrárny. Doplnujícím účelem udržování hladiny ve VD Hněvkovice je jako alternativní vnější zdroj pro napájení vlastní spotřeby v případě SBO.

Areál ETE není nikterak ohrožen záplavami. Jediné ohrožení představují vnější záplavy způsobené srážkami. Vzhledem k projektovým opatřením (prahům, utěsnění vstupních a montážních otvorů) nemůže voda natéci do objektů v elektrárně ETE a je postupně odváděna gravitační kanalizací dešťové vody.

Ohrožení představují lokální záplavy, kdy by činnost odstavení reaktoru a jeho udržování prováděl personál vykonávající směnu. Střídání personálu by bylo zajištěno s pomocí orgánů státní zprávy (IZS, armáda, atd.). Záplavy na řece Vltavě mohou vést ke ztrátě čerpací stanice surové vody z VD Hněvkovice. Tato indispozice ovšem neohrožuje bezpečnost JE [21].

Jako příležitosti ke zlepšení ochrany bylo doporučeno např. zodolnění objektu s DG proti vnější záplavě, analýza ohrožení krytů při záplavách

6.2.1.3 Extrémní klimatické podmínky

Zatížení přírodními jevy je zpracováno ze statistického zpracování naměřených dat v horizontu alespoň 30 let v oblasti ETE nebo v oblasti s podobným rázem krajiny. Účinkům extrémního zatížení od přírodních jevů odolají všechny objekty 1. seismické kategorie. Analýzami je prokázána odolnost proti extrémním klimatickým jevům všech bezpečnostních zařízení [21].

Extrémní vítr

Pro stanovení zatížení se vychází z naměřených ročních maximálních hodnot rychlosti větru. Hodnota, která byla uvažována byla naměřena v Praha-Ruzyně [21]:

- 49 m/s s četností výskytu 100 let
- 68 m/s s četností výskytu 10 000 let

Rychlost větru pro tornáda, která se mohou na našem území vyskytnout odpovídá rychlosti větru při četnosti 10 tisíc let. Lze toto zatížení tedy považovat za vyhovující i z hlediska výskytu tornád.

Při extrémním větru by téměř jistě vypadly linky 400 kV a 110 kV což by znamenalo přechod na vlastní spotřebu.

Extrémní sníh a led

Sníh je přepočten na vodní hodnotu sněhu, tj. odpovídající velikost náhradního vodního sloupce v mm [21]:

- 92 mm s četností výskytu 100 let
- 157 mm s četností výskytu 10 000 let

Ve vodohospodářských objektech s otevřenou hladinou vody nemůže vzhledem k teplotním poměrům vzniknout led.

Všechny systémy důležité z hlediska jaderné bezpečnosti potřebné pro odvod tepla z AZ jsou umístěny buď v podzemních objektech nebo v robustních uzavřených objektech, kde nemůže dojít k zamrznání médií. Voda by mohla zamrznat v chladících věžích nebo rozstřikovacích bazénech. Chladicí věže nikterak neovlivní plnění bezpečnostních funkcí. Pokud je přes rozstřikovací bazény cirkulována teplá voda nemůže dojít k zamrznutí ani při velmi nízkých teplotách.

Maximální a minimální teplota

Zatížení na základě teplot získaných z měření v meteorologické stanici Tábor. Vstupní hodnoty pro výpočet jsou: [21]

- 39,0 °C a -32,3 °C pro návratnost výskytu 100 let
- 45,6 °C a -45,9 °C pro návratnost výskytu 10 000 let

Extrémní teploty mohou způsobit taktéž výpadek linky 400 kV nebo 110 kV. Pro maximální venkovní teploty bylo spočítáno, že nejvyšší projektová hodnota teploty TVD by byla překročena pouze krátkodobě a to při události velké LOCA. Pravděpodobnost souběhu extrémních teplot a havárie LOCA je však velice nízká. V jiných případech není zařízení chlazeného TVD ohroženo.

6.2.2 Ztráta napájení

Pracovním zdrojem napájení je Turbogenerátor 1000 MW (při provozu bloku na výkonu) nebo rozvodna Kočín 400 kV (při nevýkonovém provozu).

Rezervním zdrojem napájení je pro každý blok dvojice rezervních transformátorů, které jsou napájeny linkou 110 kV z rozvodny Kočín. Rezervní transformátory jsou připojeny přes rezervní přípojnice k rozvodnám 6 kV.

Nouzové zdroje napájení jsou DG a baterie. Každý blok má redundanci 3 x 100% a společně 100% + 100%.

Další možností alternativního napájení je využití hydroalternátorů VE Lipno nebo MVE Hněvkovice, což bylo také prakticky odzkoušeno.

6.2.3 Ztráta napájení se ztrátou rezervních zdrojů včetně ztráty trvale instalovaných diverzních rezervních zdrojů

Úplná ztráta všech zdrojů střídavého napájení bloků je vysoce nadprojektovou a dosti nepravděpodobnou havárií. Došlo by k němu pouze v případě, pokud by všechny následující úrovně selhaly [21]:

- Vnější pracovní zdroje - normální napájení z rozvodny 400 kV
- Vnitřní pracovní zdroje - nezregulování turbogenerátoru na vlastní spotřebu
- Vnější rezervní zdroje - rezervní napájení z rozvodny 110 kV
- Vnitřní rezervní zdroje – napájení z rozvodny 110 kV sousedního bloku
- Všechny tři redundantní nouzové zdroje střídavého napájení pro SZN bezpečnostních systémů (bezpečnostní DG) na obou blocích
- Oba nouzové zdroje střídavého napájení pro SZN systémů souvisejících s bezpečností (společné DG)
- Diverzní vnější zdroje střídavého napájení (hydroalternátory VE Lipno a hydroalternátory)
- Vnější zdroj střídavého napájení MVE Hněvkovice

6.2.4 Doplnění stávajícího programu zlepšování bezpečnosti o opatření iniciované stress testy

Podobně jako v JE Dukovany bylo navrženo několik zlepšení, které se budou realizovat v letech 2013-2015 pro lepší zvládání nadprojektových událostí.

6.2.4.1 Zodolnění projektu pro zvládání nadprojektových událostí

Tabulka č.9 – Přehled zodolnění JE pro zvládání nadprojektových havárií [21]

Opatření	Koncový termín realizace
Realizace diverzních systémů odvodu tepla z AZ přes II.O: - Doplňování vody do PG alternativním způsobem s dostatečným zdrojem vody - Doplnění přípojných míst pro alternativní odvod tepla pomocí požárního čerpadla	2013
Realizace diverzního systému doplňování odtlakovaného I.O/BSVP: Doplňování vody do AZ reaktoru nebo BSVP alternativním způsobem s dostatečným množstvím vody	2013
Zajištění odolnosti proti SBO a UHS: - zodolnění budovy DGS proti vnější záplavě - alternativní doplňování nafty pro dlouhodobý provoz DG, včetně zajištění zdroje nafty - implementace opatření pro prodloužení vybíjecí doby akubaterií - napájení systémů zajištěného napájení I. a II. kategorie pomocí diversního SBO DG - alternativní odvod tepla z klíčových bezpečnostních komponent při ztrátě TVD - alternativní odvod tepla ze systémů SKŘ a monitorování klíčových parametrů - izolace kontejnmentu při SBO přepojením vybraných armatur na napájení spotřebičů zajištěného napájení I. Kategorie	2013

Zodolnění kontejnmentu proti následkům těžkých havárií: ▪ realizace systému likvidace vodíku v kontejnmentu pro těžké havárie v AZ a v BSVP ▪ provedení analýz a návrh strategií a harmonogramu implementace opatření pro zachování dlouhodobé integrity kontejnmentu (stabilizace taveniny nebo zabránění přetlakování) v závislosti na zvolených strategiích zvládnutí těžkých havárií	2014/2015
--	-----------

7 ZÁVĚR

Jaderné elektrárny jsou a minimálně ještě řadu desítek let budou jeden z hlavních zdrojů elektrické energie. Celková koncepce energetiky se musí plánovat několik let dopředu, zvláště pak jaderná energetika. Legislativa a samotná výstavba nového jaderného zdroje trvá desítky let a bez politické podpory se nedá uskutečnit. Dotace na obnovitelné zdroje navíc degradují příznivou cenu za vyrobenou MW z jaderného zdroje a pokud připočteme těžko odhadnutelný vývoj ceny elektřiny na burze, nikdo nechce garantovat výkupní cenu na následující roky. Je proto nezbytné usilovat o prodloužení EDU a ETE na co nejdelší dobu s maximálním respektováním bezpečnosti, neboť ta je v jaderné energetice vždy na prvním místě.

Havárie v JE Fukušima je dalším nepříznivým milníkem v historii světové jaderné energetiky, nicméně poskytuje jiný úhel pohledu na opatření proti mimořádným událostem, který je potřeba brát v potaz při navrhování či zlepšování bezpečnostních opatření.

Bilancí TVD bylo potvrzeno, že případná ztráta UHS by znamenala výpadek TVD v poměrně krátké době a to 2,4 hodiny po pádu chladících věží, následovaný výpadkem záložního napájení (DG). Také bylo poukázáno na potřebný zásah řídicího personálu, který dokáže výpadek TVD oddálit téměř na 12,5 hodiny, což dává dostatečný prostor pro zvládnutí iniciační události.

Zátěžové testy v ČR byly provedeny důkladně a poctivě, aby přispěly co největší měrou k bezpečnosti. Je potřeba si uvědomit velkou náročnost celého procesu ať už z pohledu provozovatele, státního dozoru či různých expertů, kteří zajišťovali nezávislou podporu. V neposlední řadě se jedná o nemalé investice, kdy zlepšení bezpečnosti českých JE bude stát desítky miliard korun.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] RAČEK, Jiří. *JADERNÁ ZAŘÍZENÍ*. Brno: BOVPRESS s.r.o., 2009. ISBN 978-80-214-3961-0.
- [2] Zpráva o výsledcích činnosti SÚJB při výkonu státního dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení a radiační ochranou za rok 2012: ČÁST 1. In: Výroční zpráva SÚJB 2012 [online]. 2012 [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/zpravy/vyrocnizpravy/ceske/VZ_SUJB_2012_cast_I.pdf
- [3] Přírodní radioaktivita a problematika radonu. *Státní ústav radiační ochrany* [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: <http://www.suro.cz/cz/prirodnioz>
- [4] ROZMAJZL, Lukáš. ekonom.ihned.cz. *Radiace: utajená hrozba* [online]. 2011 [cit. 2014-01-07]. Dostupné z: <http://ekonom.ihned.cz/c1-51411020-radiace-utajena-hrozba>
- [5] BLAHA, Martin, TES, s.r.o., konzultace s vedoucím práce, Brno, 5/2014
- [6] Přehled jaderných elektráren provozovaných firmou TEPCO. In: *TEPCO - Power plants* [online]. 2010. vyd. [cit. 2014-01-07]. Dostupné z: <http://www.tepco.co.jp/en/challenge/energy/nuclear/pdf/plants-e.pdf>
- [7] SOMMER, Phil. Science 184. *Science 184 – Phil Sommer – Dr. Shatz* [online]. 2012 [cit. 2014-01-07]. Dostupné z: <http://blogs.cas.suffolk.edu/cyberdad/>
- [8] Tōkai Nuclear Power Plant. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-01-07]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/T%C5%8Dkai_Nuclear_Power_Plant
- [9] ŽENÍŠEK, Karel. ČEZ a.s. *CI - aktuálně a do budoucna*. Dukovany, 2013.
- [10] FRÝBORT, Jan. Katedra jaderných reaktorů. In: *Jaderná havárie v JE Fukušima* [online]. 2011 [cit. 2014-01-07]. Dostupné z: http://katedra-reaktoru.cz/dokumenty/pripravny_kurz2011/pripravny_kurz.pdf
- [11] IRSN: Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire. [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.irsn.fr/EN/publications/thematic-safety/fukushima/Pages/video-fukushima-2-years-later.aspx>
- [12] Pohled na areál JE Fukušima I. In: *Idnes: Technet* [online]. 2013 [cit. 2014-01-07]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/foto.aspx?r=veda&c=A130409_153240_veda_mla&foto=MLA4a7cab_fuku_pohled_na_areal.jpg
- [13] Library. *TEPCO: Tokyo Electric Power Company* [online]. 2013 [cit. 2014-01-07]. Dostupné z: <http://www.tepco.co.jp/en/news/library/index-e.html>
- [14] Nuclear Safety & Security. *International Atomic Energy Agency* [online]. 16.8.2013 [cit. 2014-01-07]. Dostupné z: <http://www-ns.iaea.org/tech-areas/emergency/ines.asp>
- [15] KOLEKTIV AUTORŮ. ČEZ a.s.: *Letní univerzita*. Dukovany, 2013.
- [16] *Fukushima Nuclear Power Stations I and II* [online]. 2011 [cit. 2014-01-07]. Dostupné z: http://chong.zxq.net/misc/events/FukushimaPowerStation_I-II.htm

-
- [17] Peer review report: Stress tests performed on European nuclear power plants. In: *Peer review report* [online]. 2012 [cit. 2014-01-07]. Dostupné z: http://www.ensreg.eu/sites/default/files/EU%20Stress%20Test%20Peer%20Review%20Final%20Report_0.pdf
- [18] COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION: Technical summary on the implementation of comprehensive risk and safety assessments of nuclear power plants in the European Union. In: *COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT* [online]. 2013 [cit. 2014-01-07]. Dostupné z: http://ec.europa.eu/energy/nuclear/safety/doc/com_2011_0784_technical_summary.pdf
- [19] Peer review report: Stress tests performed on European nuclear power plants. In: *ENSREG* [online]. 2012 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/aktualne/EU_Stress_Test_Peer_Review_Final_Report.pdf
- [20] ČEZ a.s. *Technická opatření ze Stress testů v JE ČEZ*. Praha, 27.6.2013.
- [21] Státní úřad pro jadernou bezpečnost. In: *Zátěžové zkoušky“ JE Dukovany a JE Temelín: Hodnocení bezpečnosti a bezpečnostních rezerv ve světle havárie JE Fukushima* [online]. Česká republika, 2011 [cit. 2014-01-07]. Dostupné z: http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/aktualne/Narodni_zprava_ceska_final_1.pdf
- [22] DRÁBOVÁ, Dana. Státní úřad pro jadernou bezpečnost. In: *Fukušima - rok poté: Co jsme se doposud naučili?* [online]. 2012 [cit. 2014-01-07]. Dostupné z: <http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/aktualne/Fukushima/PrezentaceDD.pdf>
- [23] Seismická zatížení. *iPotrubí* [online]. 2013 [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://www.ipotrubí.cz/clanky/4.-pevnostni-vypocty-potrubí/3.-zatizení-potrubí/seismicka-zatizeni.html>
- [24] TRNKA, Miroslav, HOFMANN, Ervín, ČEZ, a.s. ústní sdělení, konzultace 23.4.2014, Elektrárna Dukovany