VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

JADERNÉ HAVÁRIE

NUCLEAR ACCIDENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE MARTIN MIK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. JITKA MATĚJKOVÁ
SUPERVISOR

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Mik

který/která studuje v **bakalářském studijním**

programu obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Jaderné havárie

v anglickém jazyce:

Nuclear accidents

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o rešeršní práci, která se zabývá jadernými haváriemi a nehodami ve světě i u nás a jejich hodnocením podle stupnice INES.

Cíle bakalářské práce:

1) Objasnění pojmů týkající se jaderné bezpečnosti a související předpisy
2) Popis mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí
3) Výčet jaderných havárií a nehod

Seznam odborné literatury:

MATAL, Oldřich a Hugo ŠEN. Jaderná zařízení a jejich bezpečnost. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM,
Internetové články

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jitka Matějková

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 19.11.2012

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc. Ředitel ústavu	prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c. Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je rešerše zabývající se jadernými haváriemi a nehodami ve světě i u nás. Práce je rozdělena do několika částí. První část se zabývá dozorem nad jadernou bezpečností v České republice. Ve druhé části je popsána mezinárodní stupnice INES. Poslední a největší část se zabývá samotnými haváriemi a nehodami.

KLÍČOVÁ SLOVA

Havárie, hodnocení, Fukušima, Černobyl, záření, radiace, následky

ABSTRACT

This thesis is a research dealing with nuclear accidents and disasters in the world and us. The work is divided into several parts. The first part deals with the regulation of nuclear safety in the Czech Republic. The second part describes the international INES scale. The last and largest section deals with the actual accidents and disasters.

KEYWORDS

Accident, evaluation, Fukushima, Chernobyl, radiation, radiation effects

;

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MIK, M. *Jaderné havárie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jitka Matějková.

;

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Jaderné havárie jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne ....

(podpis autora)

;

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jitce Matějkové za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne ....

....

(podpis autora)

;

Obsah

Úvod **1**

1 Jaderná bezpečnost **2**

1.1 Radioaktivita a vliv na člověka 2
1.2 Státní úřad pro jadernou bezpečnost 3
1.3 Vyhlášky a nařízení platné v ČR 4

2 Mezinárodní stupnice INES **6**

2.1 Využívání stupnice 6
2.2 Obecný popis stupnice 7
2.3 Dopad na okolí a vně zařízení 9
2.3.1 Definice stupňů 10
2.4 Dopad uvnitř zařízení 11
2.4.1 Definice stupňů 11
2.5 Dopad na ochranu do hloubky 12
2.6 Revize stupnice 13

3 Havárie sedmého stupně **14**

3.1 Černobyl 14
3.1.1 Příčiny havárie 15
3.1.2 Průběh havárie 16
3.1.3 Následky havárie 18
3.2 Fukušima 20
3.2.1 Popis elektrárny 20
3.2.2 Popis havárie 22
3.2.3 Následky 25
3.3 Nejnovější poznatky 26

4 Havárie šestého stupně **27**

4.1 Majak 27

5 Havárie pátého stupně **29**

5.1 Three Mile Island 29

5.2 Sellafield 31
5.3 Goiania 32

6 Havárie čtvrtého stupně **33**

6.1 Saint Laurent 33
6.2 Jaslovské Bohunice 34
6.3 Sellafield 36
6.4 Tokaimura 36
6.5 Fleurus 37

7 Nehody třetího stupně **38**

7.1 Paks 38
7.2 Vandellos 38
7.3 Ostatní nehody 38

8 Nehody druhého stupně **39**

8.1 Dukovany 39
8.2 Forsmark 39
8.3 Wylfa 39
8.4 Mihama 39
8.5 Ostatní nehody 40

9 Nehody stupně nula a jedna **41**

9.1 Dukovany 42
9.2 Temelín 42

10 Závěr **44**

Literatura **45**

Seznam zkratek **50**

Seznam veličin **51**

Seznam tabulek **51**

Seznam obrázků **52**

Seznam grafů **52**

Úvod

V současné době si jen těžko dovedeme představit život bez elektrické energie. Její spotřeba však velmi rychle roste a zásoby klasických energetických zdrojů se tenčí. Řešením této situace jsou alternativní zdroje energie a jaderná energie.

Vznik jaderné energie se datuje do poloviny 30. let minulého století, kdy němečtí vědci poprvé pojmenovali jev jaderné štěpení. Také zjistili, že nejlépe se pro štěpení hodí izotop ^{235}U. Počátkem 40. let byl objeven další vhodný prvek a to plutonium. Brzy na to 2. prosince 1942 byl postaven první jaderný reaktor. Reaktor byl postaven na chicagské univerzitě a byl pojmenován Chicago Pile-1. Pro výrobu elektřiny byl však reaktor použit až 20. prosince 1951 a první jaderná elektrárna byla postavena v Sovětském svazu 27. června 1954. Její elektrický výkon činil 5MW. Od té doby šel rozvoj jaderné energetiky strmě nahoru. Na konci 50. let činil instalovaný výkon necelý 1 GW, na konci 70. let to bylo 100 GW a na konci 80. let již 300 GW. Ke dnu 1. ledna 2013 bylo dle statistik v provozu 435 jaderných reaktorů ve 29 státech světa s celkovou instalovanou kapacitou 374,1 GW. Tyto reaktory vyrábí asi 13,5% světové elektřiny. Dalších 65 reaktorů je právě ve výstavbě a plánuje se dalších 167. [1]

Jaderná energie je celkem levný zdroj elektřiny, avšak nese i určitá rizika. V průběhu její dlouhé historie se přihodilo několik nehod, přičemž některé z nich byly menší a jiné byly naopak velmi závažné s obrovským počtem obětí. Na základě těchto událostí byly zakládány nejrůznější organizace a společenství, jako jsou například Mezinárodní agentura pro atomovou energii nebo Státní úřad pro jadernou bezpečnost. Jejich úkolem je pomoci zabránit dalším haváriím tvorbou pravidel pro využívání jaderné energie. Po každé nehodě v jaderném zařízení se důkladně vyšetřovaly příčiny jejího vzniku a na základě výsledků vyšetřování se upravovaly předpisy pro provoz jaderných elektráren.

V této práci se pokusíme vysvětlit příčiny a následky jaderných havárií, jež historie zaznamenala a proč byly klasifikovány určitými úrovněmi v rámci mezinárodní stupnice INES. Dále se pokusíme objasnit základní pojmy, jež s touto problematikou souvisí.

1 Jaderná bezpečnost

Cílem jaderné bezpečnosti *„je zabránit nekontrolovanému rozvoji štěpné řetězové reakce, zabránit nedovoleným únikům radioaktivních látek nebo ionizujícímu záření do životního prostředí a omezovat následky nehod“*. [1] V České republice jsou tyto požadavky definovány Atomovým zákonem a souvisejícími předpisy. Dále platí mezinárodní doporučení, která vydávají organizace, jako jsou například Mezinárodní agentura pro atomovou energii nebo WANO.

1.1 Radioaktivita a vliv na člověka

Radioaktivita je přírodní jev, kdy jádra některých atomů mění svou vnitřní strukturu a při tomto ději uvolňují radioaktivní záření. Izotop jednoho prvku se mění na izotop jiného prvku.

Aktivita označuje množství radioaktivní látky. Jedná se o počet radioaktivních přeměn za jednotku času. V přírodě je aktivita radionuklidů menší než několik kilobecquerel (dále uvádíme pouze zkratku kBq). Dřívější jednotka byla curie (Ci), která odpovídala 1 g izotopu radia (^{226}Ra). Tyto jednotky můžeme navzájem převádět pomocí vztahu 1 Ci = $3{,}7 \cdot 10^{10}$ Bq. Aktivitu zářiče pak můžeme mít plošnou, objemovou nebo hmotnostní.

Absorbovaná dávka je množství energie, které vstřebala jednotka hmotnosti látky, přičemž není podstatné, jak velké množství částic dopadlo. Absorbovaná dávka se měří v Gy, tedy v jednotce gray. Dřívější jednotka byl 1 rad, kde 1 rad = 0,01 Gy. Udává se, že smrtelná dávka je 5 Gy. Tedy energie 375 joulů pro člověka, který váží 75kg. Dávkový příkon Gy/s nám tedy udává dávkový příkon v časovém úseku.

Ekvivalentní dávka patří mezi radiobiologické veličiny a je to dávka, která v sobě zahrnuje vliv typu záření na organismus. Existuje několik typů radioaktivního záření, které se liší svou schopností pronikat látkami. Od nejméně průrazných se dělí na záření α, β a γ. Největší vliv na organismus má například alfa záření a těžké nabité částice. Vliv nejmenší má pak záření gama. Jednotkou dávkového ekvivalentu je 1 seivert (Sv). Starší jednotkou je 1 rem. Pro tuto dvojici jednotek tak platí, že 1 Sv = 100 rem. Existuje také ekvivalentní dávkový příkon Sv/s. Smrtelná dávka pro člověka je 4 Sv.

Radioaktivitu můžeme dělit na dva typy a to přírodní a umělou. *Přírodní radioaktivitu* tvoří tzv. přírodní pozadí. To je způsobováno kosmickým zářením, kdy s nadmořskou výškou jeho vliv stoupá. Asi 50 % přírodního ozáření je způsobeno inhalací radonu ^{222}Rn, který se ve formě plynu uvolňuje ze země. Tento plyn je všude, avšak jeho koncentrace se značně liší. Závisí na typu zemského podloží. Příklady radiačního pozadí: v ČR je to v průměru 3 mSv/rok, v Kerali v Indii 17 mSv/rok, v Guapari v Brazílii 175 mSv/rok a v Ramsaru v Iránu až 400 mSv/rok. Ačkoli se přírodní pozadí někde liší až stonásobně, lidský organismus je schopen se tomu přizpůsobit a v těchto lokalitách není zvýšený výskyt nemocí způsobených radiací. *Umělá radioaktivita* se na nás přenáší nejen z jaderných zařízení, ale především ze zařízení lékařských jako jsou rentgeny. Příkladem těchto záření může být let letadlem ve 4 000 km, kdy dostaneme dávku 40 μSv, rentgen zubů 5 μSv, pobyt v okolí 50 km od jaderné elektrárny 0,1 μSv/rok, rentgen hrudníku 20 μSv. Přírodní dávka tvoří asi 85% naší celkové roční dávky. [1]

Radioaktivní záření může při svém působení na organismus poškozovat buňky. Tyto buňky se mohou zregenerovat a žít dál, nebo zahynou a pak záleží na jejich množství. Při velkém množství mohou selhat postižené orgány a tím nastane smrt jedince. Důvodem je takzvaná akutní nemoc z ozáření. Při dávkách 30 Sv je zasažen centrální mozkový systém, ke smrti dochází do několika hodin. Při dávkách 10 – 30 Sv je poškozeno trávicí ústrojí a smrt nastává do několika týdnů. Při dávkách v rozmezí 1 – 10 Sv zemře polovina lidí na následky poškození buněk v kostní dřeni, které zásobují organismus krví. Poslední variantou je, že buňka přežije, ale neopraví se. Taková to buňka se dále množí a může tak vzniknout rakovinné bujení, tato situace nastává při menších dávkách kolem 1 Sv. [3]

Při havárii či nehodě může dojít k úniku mnoha radioaktivních prvků. Mezi nejvýznamnějšími patří jód (I), který napadá štítnou žlázu. Dále jsou to stroncium (Sr), které se váže do kostí, ničí zuby a způsobuje vypadávání vlasů. Cesium (Cs) se kumuluje ve svalech a ničí buněční metabolismus. Polonium (Po) poškozuje imunitní systém. Plutonium (Pu) je plicní a kostní toxin. Radium (Ra) způsobuje leukémii.

Tyto prvky však mají různé poločasy rozpadu, a jejich nebezpečnost na místě po havárii s postupem času klesá. Například ^{131}I má poločas rozpadu 8 dní, ^{137}Cs 30 let a ^{239}Pu 24 000 let.

1.2 Státní úřad pro jadernou bezpečnost

V České republice má nad jadernou energetikou dohled Státní úřad pro jadernou bezpečnost (dále jen SÚJB). Jeho prací je dbát na bezpečnost v jaderných elektrárnách Temelín a Dukovany. Tento úřad byl zřízen zákonem č.21/1993 Sb. a 1. ledna 1993 převzal úlohu státní správy a dozoru nad mírovým využíváním jaderné energie a ionizujícího záření od svého předchůdce ČSKAE. Jeho působnost je dána „Atomovým“ zákonem č.18/1997 Sb. Tento úřad má svůj vlastní rozpočet, jenž je schvalován Parlamentem ČR a v jeho čele stojí předseda, taktéž volen vládou ČR. V roce 2000 byla působnost SÚJB rozšířena zákonem č.249/2000 Sb. o výkon státní správy a kontrolu v oblasti zákazu chemických zbraní. V roce 2002 pak dále o kontrolu nad oblastí zákazu biologických a toxinových zbraní zákonem č.281/2002 Sb. A nakonec ještě v roce 2005 i o zodpovědnost za technickou bezpečnost jaderných zařízení na základě zákona č.253/2005 Sb. [1], [6]

Na základě „Atomového“ zákona SÚJB vykonává tyto činnosti:

- vykonává státní dozor nad jadernou bezpečností, fyzickou ochranou, radiační ochranou, havarijní připraveností, jadernými materiály v prostorách jaderného zařízení. Do jaderných zařízení jsou zařazeny stavby s jaderným reaktorem, úložiště jaderného odpadu či materiálu a zařízení pro zpracovávání jaderných materiálů,
- vydává povolení k výkonu činnosti při využívání jaderné energie,
- schvaluje dokumentaci, seznamy, způsoby zajištění fyzické ochrany, havarijní řády,
- vymezuje zónu havarijního plánování a schvaluje vymezení kontrolovaného pásma,
- vydává povolení k umístění, výstavbě, rekonstrukcím, jednotlivým etapám uvádění do provozu a k provozu jaderného zařízení,
- poskytuje obcím a krajům údaje o hospodaření s radioaktivními odpady na jimi spravovaném území,
- ustavuje státní a zkušební komise pro ověřování odborné způsobilosti pracovníků.

- sleduje a posuzuje stav ozáření osob,
- kontroluje nešíření jaderných zbraní,
- vydává a eviduje radiační průkazy,
- kontroluje zajištění a dodržování požadavků na havarijní připravenost. [1], [6]

1.3 Vyhlášky a nařízení platné v ČR

V této kapitole blíže popíšeme několik vyhlášek a nařízení, jež rozšiřují zákon č.18/1997 Sb. Tyto vyhlášky se týkají především jaderné bezpečnosti.

- Vyhláška č.144/1997 Sb. se týká fyzické ochrany jaderných materiálů a jaderných zařízení a jejich zařazováním do příslušných kategorií. Jaderné materiály se dělí do I., II. nebo III. kategorie. [6]
- Vyhláška č.146/1997 Sb. *„Stanovuje činnosti, které mají bezprostřední vliv na jadernou bezpečnost a činnosti zvláště důležité z hlediska radiační ochrany. Dále stanovuje požadavky na kvalifikaci a odbornou přípravu, způsob ověřování zvláštní odborné způsobilosti a udělování oprávnění vybraným pracovníkům a způsob provedení schvalované dokumentace pro povolení k přípravě vybraných pracovníků.“* [7]
- Vyhláška č 132/2008 Sb. nahradila vyhlášku č.214/1997 Sb. a tato vyhláška *„Zabezpečuje jakost při činnostech souvisejících s využíváním jaderné energie a činnostech vedoucích k ozáření a o stanovení kritérií pro zařazení a rozdělení vybraných zařízení do bezpečnostních tříd.“* [8]
- Vyhláška č.215/1997 Sb. Tato vyhláška stanovuje rozhodující kritéria pro posouzení vhodnosti dané lokality pro umístění jaderných zařízení a velmi významných zdrojů ionizujícího záření. [9]
- Vyhláška č.195/1999 Sb. *„Tato vyhláška stanovuje požadavky na řešení jaderných zařízení k zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany a havarijní připravenosti.“* [10]
- Vyhláška č.106/1998 Sb. *„Tato vyhláška stanovuje etapy uvádění jaderného zařízení do provozu, technické a organizační podmínky k zajištění jaderné bezpečnosti jaderných zařízení při jejich uvádění do provozu a při jejich provozu, opětovného uvedení jaderného reaktoru do kritického stavu po výměně jaderného paliva,* rozsah *a způsob provedení schvalované dokumentace pro udělení povolení k jednotlivým etapám uvádění do provozu a provozu jaderného zařízení a postup při předkládání a posuzování dokumentace pro povolení opětovného uvedení jaderného reaktoru do kritického stavu po výměně jaderného paliva.“* [11]
- Vyhláška č.185/2003 Sb., která ruší vyhlášku č196/1999 Sb. Tato vyhláška stanovuje způsob a rozsah vyřazování jaderných zařízení III. nebo IV. kategorie. Zařízení III. kategorie jsou pracoviště pro těžbu a zpracování uranové rudy. Zařízení IV. kategorie jsou pracoviště s otevřenými radionuklidovými zářiči. [12]
- Vyhláška č.317/2002 Sb. Podle této vyhlášky se schvalují obalové soubory pro přepravu, skladování jaderných materiálů a radioaktivních látek. Dále popisuje způsob přepravy radioaktivních odpadů a uzavřených zářičů tak, aby byly v souladu s právem Evropského společenství. [13]
- Nařízení vlády č.11/1999 Sb. Tento návrh obsahuje návod pro stanovení zóny

havarijního plánování. Dále obsahuje výčet možných radiačních havárií a popis předpokládaného průběhu radiační havárie. [14]

- Nařízení vlády č.416/2002 Sb. Toto nařízení stanovuje výše odvodu a způsob platby původcům radioaktivních odpadů na jaderný účet a roční výši příspěvku pro obce a pravidla pro jeho poskytování. [15]

2 Mezinárodní stupnice INES

V následující kapitole si představíme mezinárodní stupnici hodnocení závažných jaderných událostí INES, v originále International Nuclear Event Scale, která je určena pro snazší komunikaci mezi veřejností, sdělovacími prostředky a odborným jaderným společenstvím. Komunikace musí probíhat v takové terminologii, aby byly přesně pochopeny všechny bezpečnostní významy událostí, které byly nahlášeny z jaderných zařízení.

Stupnice INES byla vytvořena v březnu 1990 skupinou expertů svolaných společně Mezinárodní agenturou pro atomovou energii (IAEA) a Agenturou pro jadernou energii při Organizaci pro ekonomickou spolupráci a rozvoj (OECD/NEA). Ve stupnici jsou zahrnuty poznatky z využívání obdobných stupnic nejen v zemích, jako jsou Francie či Japonsko, ale také z jiných zemí, kde byly podobné stupnice navrženy. V počátcích své existence byla stupnice používána zkušebně ke klasifikaci událostí v jaderných elektrárnách, avšak v roce 1992 byla stupnice rozšířena takovým způsobem, aby byla uplatnitelná pro všechna zařízení spojená s civilním jaderným průmyslem. Do tohoto odvětví patří jakákoliv událost spojená s radioaktivním materiálem nebo s radiací a dále sem také spadá i přeprava radioaktivních materiálů. V současné době je stupnice používána v 60 zemích světa, včetně České republiky. [16]

2.1 Využívání stupnice

Bezpečnostní jaderná a radiační kritéria jsou si všude ve světě velmi podobná, přesto však může být jejich popis odlišný. Právě z tohoto důvodu byla mezinárodní stupnice INES vytvořena. Slouží k pohotovému hodnocení vniklých situací. Může se však stát, že některé události bude možné ohodnotit až po delší době, proto se stanoví předběžné hodnocení, které se po uplynutí této doby může na základě nových získaných poznatků změnit. [16]

I když se stupnice používá pro veškerá zařízení, je v některých typech zařízení fyzicky vyloučeno, aby události způsobily úniky významného množství radioaktivních materiálů do životního prostředí. Pro taková zařízení by nebyly vyšší stupně použitelné. Mezi taková zařízení patří výzkumné reaktory, zařízení ke zpracování neozářeného paliva nebo sklady odpadů. [16]

Důležitým faktem je, že INES nenahrazuje již přijatá národní a mezinárodní kritéria určená pro technickou analýzu a ohlašování událostí orgánům dozoru. Rovněž není součástí oficiálních havarijních opatření existujících v každé zemi k vypořádání se s radiačními nehodami. [16]

Není vhodné využívat tuto stupnici pro srovnávání bezpečnosti v jednotlivých zemích, jelikož každá země sděluje v jiné míře méně významné události veřejnosti. Je například velmi obtížné najít mezinárodní shodu při hodnocení událostí na pomezí stupňů 1 a 0. Přestože informace o událostech hodnocených jako stupeň 2 a vyšší jsou dostupné, je jich oproti ostatním událostem velmi malý počet, který se navíc stále zmenšuje. Toto stěžuje provádění smysluplných mezinárodních hodnocení. [16]

2.2 Obecný popis stupnice

Stupnice zařazuje události do sedmi stupňů: vyšší stupně (4-7) se označují jako *havárie*, nižší stupně (1-3) *nehody*. Události stupně 0 se nazývají *odchylky* a nemají žádný bezpečnostní význam. Události nesouvisející s bezpečností se označují jako události „mimo stupnici“. Struktura stupnice se základními pojmy je uvedena v Tab. 1. Přesný popis jednotlivých stupňů bude přesně definován v kapitolách 2.3, 2.4 a 2.5 v dalších částech této práce. Stručný popis s příklady některých havárií je k dispozici v Tab. 2. Události jsou posuzovány podle tří rozdílných dopadů reprezentovaných jednotlivými sloupci: dopad na okolí, vliv na jaderné zařízení a dopad na hloubkovou ochranu. [16]

Tab. 1: Stupnice INES [16]

	Oblast dopadu		
	Dopad vně zařízení	Dopad uvnitř zařízení	Dopad na ochranu do hloubky
7 Velmi Těžká havárie	Rozsáhlý únik: Široce rozšířené dopady na životní prostředí		
6 Těžká havárie	Závažný únik: Pravděpodobné nasazení veškerých plánovaných protiopatření		
5 Havárie s rizikem vně zařízení	Omezený únik: Pravděpodobné částečné nasazení plánovaných protiopatření	Vážné poškození aktivní zóny reaktoru / radiačních bariér	
4 Havárie bez vážnějšího rizika vně zařízení	Menší únik: Ozáření obyvatelstva řádově	Významné poškození aktivní zóny reaktoru / radiačních bariér / smrtelné ozáření zaměstnanců	
3 Vážná nehoda	Velmi malý únik: Ozáření obyvatelstva zlomkem povolených limitů	Velké rozšíření kontaminace / akutní účinky na zdraví zaměstnanců	Téměř havarijní stav nezůstaly žádné bezpečnostní bariéry
2 Nehoda		Významné rozšíření kontaminace / nadměrné ozáření zaměstnance	Nehoda s významným poškozením bezpečnostních opatření
1 Anomálie			Anomálie od schváleného provozního režimu
0 Odchylka	Žádný bezpečnostní význam		

Tab. 2: Charakteristika stupňů [16]

Stupeň/popis	Povaha události	Příklady
7 **VELMI** **TĚŽKÁ HAVÁRIE**	□ Únik značné části radioaktivních materiálů z velkého zařízení (například z aktivní zóny energetického reaktoru) do okolí. Typicky obsahujících směs radioaktivních štěpných produktů s dlouhými i krátkými poločasy rozpadu (s aktivitou přesahující desítky tisíc TBq ^{131}I). Takový únik by vyústil do možnosti akutních zdravotních účinků; zpožděné zdravotní účinky v rozsáhlé oblasti s možností zasažení více než jedné země; dlouhodobé důsledky pro životní prostředí.	Jaderná elektrárna Černobyl, SSSR (nyní Ukrajina), 1986
6 **TĚŽKÁ HAVÁRIE**	□ Únik radioaktivních materiálů do okolí (s aktivitou tisíce až desítky tisíc TBq ^{131}I). Takový únik by pravděpodobně vyústil do plného uplatnění protiopatření zahrnutých v místních havarijních plánech ke zmenšení pravděpodobnosti zdravotních následků.	Kyštym, Přepracovatelský závod, SSSR (nyní v Ruské Federaci), 1957
5 **HAVÁRIE S RIZIKEM VNĚ ZAŘÍZENÍ**	□ Únik radioaktivních materiálů do okolí (s aktivitou stovek až tisíců TBq ^{131}I). Takový únik by pravděpodobně vyústil do částečného uplatnění protiopatření zahrnutých v místních havarijních plánech ke zmenšení pravděpodobnosti zdravotních následků. □ Těžké poškození jaderného zařízení. Může to zahrnovat těžké poškození velké části aktivní zóny energetického reaktoru, velká havárie s kritičností, nebo velký požár či exploze uvolňující velké množství radioaktivity uvnitř zařízení.	Windscale Pile, Velká Británie, 1957 Three Mile Island jaderná elektrárna, USA, 1979
4 **HAVÁRIE BEZ VÁŽNĚJŠÍHO RIZIKA VNĚ ZAŘÍZENÍ**	□ Únik radioaktivních materiálů do okolí s následkem dávky pro kritickou skupinu v řádu několika milisievertů. S takovým rozsahem úniku by pravděpodobně obecně nebyly spojovány žádné vnější ochranné zásahy s výjimkou místní kontroly potravin. □ Významné poškození zařízení. Taková havárie může zahrnovat poškození vedoucí k velkým potížím uvnitř zařízení, jako je částečné tavení aktivní zóny v energetickém jaderném reaktoru a srovnatelné události v zařízeních bez reaktoru. □ Takové ozáření jednoho nebo více zaměstnanců, že je vysoká pravděpodobnost rychlého úmrtí.	Windscale Pile, Přepracovatelský závod, Velká Británie, 1973 Saint Laurent, jaderná elektrárna, Francie, 1980 Buenos Aires, kritický soubor, Argentina, 1983
3 **VÁŽNÁ NEHODA**	□ Únik radioaktivních materiálů do okolí s následkem dávky pro kritickou skupinu v řádu desetin milisievertů. Při takovém úniku nemusí být vnější ochranná opatření zapotřebí. □ Událost uvnitř zařízení s důsledkem takového ozáření zaměstnanců, že by způsobilo akutní zdravotní následky a/nebo událost s výsledkem těžkého rozšíření kontaminace, například několika tisíc TBq aktivity uvolněné v sekundárním kontejnmentu, kde lze materiál vrátit do vyhovujících skladovacích prostor. □ Nehoda, při níž by další porucha bezpečnostních systémů mohla vést k havarijním podmínkám, nebo situace, ve které by nebyly bezpečnostní systémy schopné zabránit havárii, pokud by nastaly určité iniciační události.	Vandellos, jaderná elektrárna, Španělsko, 1989

Stupeň/popis	Povaha události	Příklady
2 NEHODA	Nehoda s významným selháním bezpečnostních opatření, ale se zbývající dostatečnou hloubkovou ochranou k vypořádání se dodatečnými poruchami. To zahrnuje události, kde skutečné události byly klasifikovány stupněm1, ale odhalují významné dodatečné organizační dostatky nebo nedostatky v kultuře bezpečnosti. Událost, která vyústila v dávku pracovníkovi, překračující povolený roční limit a/nebo událost, která vede přítomností významných množství radioaktivity uvnitř zařízení v prostorách, kde to projekt nepředpokládá, a které vyžadují nápravná opatření.	
1 ANOMÁLIE	Anomálie od schváleného režimu, ale se zbývající významnou hloubkovou ochranu. K tomu může dojít v důsledku poruchy zařízení, lidské chyby nebo nedostatků postupů a mohou nastat v jakékoliv oblasti, kterou stupnice pokrývá, například provoz jaderné elektrárny, transport radioaktivního materiálu, manipulace s jaderným palivem a skladování odpadů. Mezi příklady patří: porušení technických podmínek nebo přepravních předpisů, nehody bez přímých důsledků, které odhalí nedostatky v organizačním systému nebo kultuře bezpečnosti, defekty v potrubí, menší než předpokládá kontrolní program.	
0 ODCHYLKA	Odchylky, kde nejsou porušeny limity a podmínky provozu, a na které se, v souladu s adekvátními postupy přiměřeně reaguje. Mezi příklady patří: jednoduchá náhodná porucha v redundantním systému, odhalená v průběhu periodických kontrol nebo zkoušek, plánované rychlé odstavení reaktoru, které probíhá normálně, neúmyslná aktivace bezpečnostních systémů, bez významných následků, úniky v radiaci v rámci LaP, menší rozšíření kontaminace uvnitř kontrolovaného pásma bez širších důsledků pro kulturu bezpečnosti.	

2.3 Dopad na okolí a vně zařízení

Klasifikace události podle kritéria dopadu na okolí, tedy vně jaderné elektrárny, počítá se skutečným radiačním dopadem na okolí jaderného zařízení. Tento dopad je vyjádřen množstvím uvolněné aktivity nebo množstvím radiační dávky, které obdrží obyvatelstvo. U velkých havárií se počítá s tím, že v prvotním stádiu nebude možné přesně určit velikost úniku ze zařízení do okolí. Nicméně měli bychom být schopni možný únik odhadnout, a tedy umístit událost na stupnici INES. [16] Proto je nutné poznamenat, že pro základ klasifikace není používán rozsah havarijní odezvy. Někde mohou použít preventivní opatření, ačkoli vzhledem k získaným informacím o úniku nejsou nutná. Právě z tohoto důvodu se pro klasifikaci havárie používají velikost úniku a vyhodnocená dávka, nikoli rozměry ochranné akce uskutečňované v souladu s havarijními předpisy. [16]

Do událostí s oblastí dopadu na okolí spadá pět úrovní, počínaje stupněm nejvyšším 7, kdy se uvolní velká část radioaktivního inventáře aktivní zóny, konče stupněm 3. Na tomto stupni je velikost dávky pro obyvatele rovna jedné desetině ročního limitu. Mezi stupni 3 a 4 se rozhoduje podle velikosti dávky do kritické skupiny obyvatel. Mezi stupni 5 až 7 se rozhoduje podle množství uvolnění aktivity uvažované jako radiologická ekvivalence vyjádřená v TBq ^{131}I. Důvodem tohoto dělení je skutečnost, že při rozsáhlejším úniku bude obdržená dávka silně záviset na přijatých opatřeních. [16]

Návrh úrovní úniků v sobě zahrnuje pravděpodobná protiopatření. Na jejich základě bylo

odhadnuto, že únik pátého stupně způsobí 10x vyšší dávky než je tomu v případě úniku ze stupně čtvrtého. Skutečné množství uvolněné aktivity na hranici pátého stupně je však o více než jeden řád vetší, než je minimální hranice pro stupeň čtvrtý. [16]

Při událostech stupně třetího a nižšího se při jejich hodnocení považuje únik do okolí za bezvýznamný. Na těchto úrovních se proto pro účely klasifikace posuzuje výhradně únik uvnitř zařízení a dopad na hloubkovou ochranu. [16]

Události hodnocené podle kritéria úniku do okolí mohou být dvou typů. První typ nastane, pokud únik zasáhne velkou oblast. Dávky budou malé, ale zasáhnou velký počet obyvatel. Druhý typ se týká úniku na malé oblasti, ale s o to věší intenzitou. Tyto dva typy událostí specificky popisují definice stupně 3 a 4. U stupňů 5 až 7 definice zahrnují oba typy událostí. [16]

2.3.1 Definice stupňů

7. stupeň – velký únik je definován jako *„Únik do okolí odpovídající množství radioaktivity s radiologickou ekvivalencí úniku do atmosféry řádu desítek tisíc nebo více TBq* ^{131}I*.“* [16]

Při této události dochází k velkému úniku radioaktivního inventáře z reaktoru. Jde především o směs radioaktivních štěpných produktů s dlouhými i krátkými poloměry rozpadu. Po takovémto úniku lze očekávat akutní i opožděné zdravotní následky na rozsáhlém území zahrnujícím pravděpodobně více než jednu zemi. Dalším následkem jsou dlouhodobé dopady na životní prostředí. [16]

6. stupeň – významný únik je definován jako *„Únik do okolí odpovídající množství radioaktivity s radiologickou ekvivalencí úniku do atmosféry od řádu tisíců po desítky tisíc TBq* ^{131}I*.“* [16]

U úniku tohoto rozsahu je pravděpodobné, že v zóně havarijního plánování dojde k uplatnění ochranných opatření, jako jsou ukrytí a evakuace obyvatelstva pro omezení případných následků na zdraví. [16]

5. stupeň – omezený únik je definován jako *„Únik do okolí odpovídající množství radioaktivity s radiologickou ekvivalencí úniku do atmosféry od řádu stovek po tisíce TBq* ^{131}I*.“* [16]

Kvůli minimalizaci zdravotních následků vlivem radiace, budou pravděpodobně vyžadována některá ochranná opatření jako je lokální ukrytí či evakuace. [16]

4. stupeň – menší únik je definován jako *„Únik radioaktivity do okolí vedoucí k dávce u kritické skupiny řádu několika milisievertů, nebo při události, jako je ztracený zdroj či událost při přepravě vedoucí k dávce na jednoho obyvatele větší než 5 Gy (tj. k dávce s velkou pravděpodobností časného úmrtí).“* [16]

Tento únik nevyžaduje ochranná opatření vně zařízení. Výjimku může tvořit kontrola potravin a mohou být provedena také další preventivní opatření. Stav samotného zařízení je brán v potaz v oblastech dopad uvnitř zařízení a dopad na hloubkovou ochranu. [16]

3. stupeň – velmi malý únik je definován jako *„Únik radioaktivity do okolí vedoucí k dávce u kritické skupiny řádu desetin milisievertů, nebo při události, jako je ztracený zdroj*

či událost při přepravě vedoucí k takové dávce na jednoho obyvatele, že jsou jejím důsledkem akutní zdravotní následky (jako celotělové ozáření řádu 1 Gy a ozáření povrchu těla v řádu 10 Gy).“ [16]

Takovýto únik nevyžaduje žádná ochranná opatření vně zařízení, ačkoli mohou být provedena některá preventivní opatření s cílem prevence pro případ zhoršení stavu zařízení. Stavem samotného zařízení se zabývá dopad uvnitř zařízení a dopad na hloubkovou ochranu. [16]

2.4 Dopad uvnitř zařízení

Klasifikace události pomocí tohoto kritéria bere v potaz skutečný radiační dopad uvnitř jaderného zařízení bez ohledu na vnější systém zařízení nebo na důsledky pro hloubkovou ochranu. Pracuje s větším rozsahem radiačního poškození. Mezi toto poškození patří rozšíření radioaktivních produktů za projektované meze kontejneru, tavení aktivní zóny nebo úroveň dávek pracovníkům. [16]

Události s následkem kontaminace se hodnotí stupni 2 a 3, události s následkem velkých dávek pracovníkům stupni 2 až 4 a události s následkem radiačního poškození jsou klasifikovány stupni 4 a 5. Rozsah kontaminace je měřen příkonem dávkového ekvivalentu, nebo množstvím rozptýlené radioaktivity. Tato kritéria se vztahují k příkonu dávkového ekvivalentu v pracovních prostorách, ale neznamená to, že v nich musí být přítomen personál. Neměla by se zaměňovat s kritérii dávek pro pracovníky, která se vztahují k dávkám skutečně obdrženým. [16]

Po havárii nemusí být po nějakou dobu známa přesná povaha poškození. Přesto by mělo být možné hrubě odhadnout velikost poškození a prozatímně určit hodnotu stupně 4 nebo 5. V budoucnu je možné toto hodnocení přehodnotit a případně změnit. [16]

Kritérium dopadu uvnitř zařízení je považováno za bezvýznamné pro stupně menší než 2. Pro tyto úrovně se musí brát v potaz pouze dopad na hloubkovou ochranu. [16]

2.4.1 Definice stupňů

5. stupeň – těžké poškození aktivní zóny reaktoru nebo radiačních bariér. Při tomto stupni *„je roztaveno více než několik procent paliva v aktivní zóně, nebo se uvolnilo více než několik procent radioaktivního inventáře aktivní zóny z palivových souborů. Nehoda uvnitř lokality zařízení na jiném jaderném zařízení zahrnující velký únik radioaktivity (srovnatelný s tavením aktivní zóny) uvnitř zařízení s vážnou radiační hrozbou pro okolí.“* [16]

4. stupeň – významné poškození aktivní zóny reaktoru nebo radiačních bariér nebo smrtelné ozáření pracovníka. Při tomto stupni *„nedošlo k žádnému tavení paliva a nebylo uvolněno více než 0,1% radioaktivního inventáře aktivní zóny z palivových souborů. Událost na zařízení bez reaktoru zahrnující únik několika tisíc TBq aktivity z jejího primárního kontejnmentu, která nemůže být vrácena do uspokojivých skladovacích prostor. Externí ozáření jednoho nebo více pracovníků, jehož výsledkem je dávkový úvazek větší než 5 Gy (tj. s vysokou pravděpodobností časného úmrtí).“* [16]

Příkladem havárie zařízení bez reaktoru může být požár nebo výbuch s uvolněním

velkého množství aktivity uvnitř zařízení. Termín primární kontejnment je zde použit pro kontejnment v zařízení, jež neobsahuje reaktor. Neměl by být zaměňován s podobným termínem označujícím kontejnment jaderného reaktoru. [16]

3. stupeň – těžké rozšíření kontaminace a/nebo ozáření pracovníka způsobující akutní zdravotní následky. Tento stupeň je definován jako *„Událost s následkem dávkového příkonu nebo kontaminace takové úrovně, že jejím důsledkem je nebo by mohlo být takové ozáření jednoho nebo více pracovníků, že by vedlo k akutním zdravotním následkům (jako celotělové ozáření řádu 1 Gy a ozáření povrchu těla v řádu 10 Gy). Události s důsledkem úniku několika tisíc TBq aktivity do sekundárního kontejnmentu, kde může být materiál vrácen do vyhovujících skladovacích prostor.“* [16]

2. stupeň – velké rozšíření kontaminace a/nebo ozáření pracovníků překračující povolený limit. Tento stupeň je definován jako *„Událost s následkem dávky u jednoho nebo více pracovníků, překračující povolený roční dávkový limit pro zaměstnance. Událost vedoucí k sumární dávce gama a neutronů větší než 50 mSv/hod v provozních prostorách zařízení (dávka měřena ve vzdálenosti 1 m od zdroje). Událost vedoucí k výskytu významného množství radioaktivity v prostorách zařízení, které k tomu nejsou určeny projektem a která vyžaduje nápravná opatření.“* [16]

V této souvislosti je potřeba termín *významné množství* vykládat jako:

- kontaminaci kapalinami zahrnující celkovou aktivitu odpovídající radiační aktivitě několika stovek GBq ^{106} Ru, [16]
- rozsypání pevného radioaktivního materiálu s radiačním významem odpovídajícím radiační aktivitě několika stovek GBq ^{106} Ru za předpokladu že, úrovně kontaminace povrchů a aerosoly desetkrát převyšují povolené limity pro kontrolované pásmo, [16]
- únik plynných radioaktivních materiálů, obsažených v budově v množstvích ekvivalentní radiačnímu významu desítek GBq ^{131}I. [16]

2.5 Dopad na ochranu do hloubky

Hloubková ochrana má zabránit radiačním haváriím a nehodám. Z toho vyplývá, že bezpečnost jaderného zařízení je založena na dobrém projektu a správném provozu. V hloubkové ochraně je zohledněna možnost výskytu lidské chyby, neplánovaných jevů a možnost selhání zařízení. [16]

Definice hloubkové ochrany, jak ji vytvořila Mezinárodní poradní skupina k jaderné bezpečnosti (INSAG), je následující:

„Ke kompenzaci možných lidských a mechanických selhání je zaveden koncept hloubkové ochrany, soustředěný na několik úrovní ochrany včetně posloupnosti bariér zabraňujících úniku radioaktivního materiálu do životního prostředí. Koncept zahrnuje ochranu bariérami k odvrácení poškození jaderné elektrárny a ochranu samotných bariér. Zahrnuje rovněž další opatření na ochranu obyvatelstva a životního prostředí před nebezpečím v případě, že tyto bariéry nebudou plně účinné.“ [17]

Opatření podobná těm z hloubkové ochrany jsou používány nejen ve všech jaderných zařízeních, ale například i při přepravě radioaktivního materiálu. Zahrnují v sobě ochranu obyvatelstva a pracovníků a opatření zabraňující radioaktivnímu úniku. Hloubková ochrana tudíž představuje kombinaci konzervativního projektu, zajištění jakosti, činností dozoru, zmírňujících opatření a obecné kultury bezpečnosti, která posiluje každou úroveň postupných bezpečnostních ochran. [16]

Bezpečný provoz udržují tři základní bezpečnostní funkce:

- řízení reaktivity nebo podmínek tohoto procesu,
- chlazení radioaktivního materiálu a
- zádržný systém/izolace pro radioaktivní materiál.

Každá z těchto funkcí je zajištěna dobrým projektem, správným řízením provozu, souborem systémů a administrativních kontrol. V jaderných zařízeních se mohou od sebe lišit provozní systémy a bezpečnostní opatření. Pokud selžou provozní systémy tak zapůsobí dodatečná ochrana, aby zajistila bezpečnou funkci zařízení. Tato bezpečnostní opatření mohou být tvořena předpisy, administrativními kontrolami, pasivními nebo aktivními systémy. Ty jsou obvykle zálohové, jelikož jejich funkce je kontrolována provozními limity a podmínkami (LaP). [16]

Četnost spouštění bezpečnostních opatření je zmenšena dobrým projektem, provozem, údržbou, dozorem a podobně. Například frekvence selhání primárního okruhu reaktoru je minimalizována projektovou rezervou, zajištěním jakosti, provozními limitami a podobně. Normální provozní a kontrolní systémy přispívají k minimalizaci četnosti vyvolávání bezpečnostních opatření. [16]

V některých případech se však četnosti vyvolávání bezpečnostních opatření nevyhneme. A to například při pokusu o vstup do kobek potenciálně obsahujících zdroje ionizujícího záření. V těchto případech jsou bezpečnostní funkce zajištěny výhradně bezpečnostními opatřeními s přiměřenou celistvostí. [16]

2.6 Revize stupnice

Britští odborníci tvrdí, že fukušimská událost ukázala jak je stupnice stará a dostatečně neplní svou funkci. Důvodem proč stupnici zpochybňují je fakt, že havárie ve Fukušimě byla hodnocena stejně jako havárie v Černobylu a tím zkresluje bezpečnostní rizika havárie v Japonsku. Během fukušimské havárie nedošlo k usmrcení osob, které by bylo způsobeno radiací. Naproti tomu v Černobylu zemřelo hned po havárii 31 lidí. Pokud budeme srovnávat množství jaderného materiálu, jenž z elektráren unikl, ve Fukušimě uniklo desetkrát méně radiace než v Černobylu. Proto Komise pro vědu a technologii hodlá Mezinárodní agentuře pro atomovou energii navrhnout přepracování stupnice, nebo její nahrazení stupnicí novou. Nová stupnice by měla zahrnovat možné důsledky pro lidskou populaci a životní prostředí. Současná stupnice INES jim přijde pro laickou veřejnost nesrozumitelná, neboť je příliš technicistní. [18]

3 Havárie sedmého stupně

Stupněm nejvyšším z mezinárodní stupnice INES byly do současnosti ohodnoceny jen dvě velké jaderné havárie, a to havárie v Černobylu a ve Fukušimě. Jejich detailnějším popisem se budeme zabývat v následujících podkapitolách.

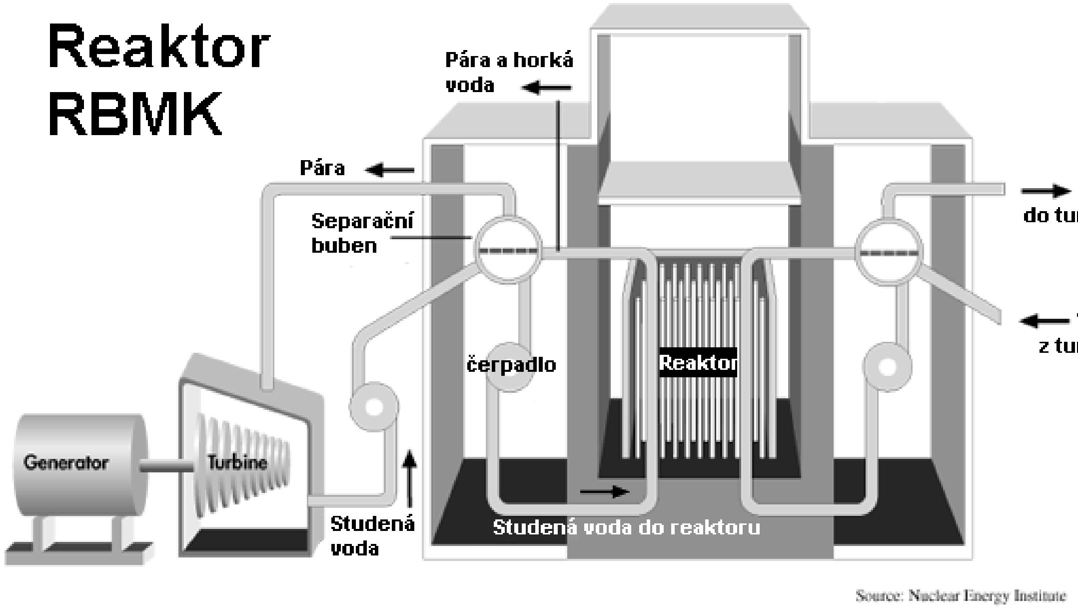
3.1 Černobyl

Černobylská elektrárna se nachází na území dnešní Ukrajiny. V roce 1986 byla Ukrajina součástí Svazu sovětských socialistických republik (SSSR). Elektrárna leží v blízkosti asi 2 km od města Pripjať, 18 km severně od města Černobyl, 16 km od hranic s Běloruskem a 110 km od hlavního města Ukrajiny, města Kyjev. [19]

Výstavba Černobylské elektrárny byla zahájena v 70. letech 20. století. Reaktor číslo 1 byl dokončen v roce 1977, číslo 2 v roce 1978, reaktory číslo 3 a 4 v letech 1981 a 1983. V době havárie byly ve výstavbě ještě další dva reaktory číslo 5 a 6. Všechny reaktory byly typu RBMK-1000. Tento typ byl vyvinut v 60. letech ve výzkumném ústavu V. I. Kučatova. Jeho označení představuje zkratku ruského výrazu „Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanálnyj“, což znamená „kanálový reaktor vysokého výkonu“. Jeho charakteristickým znakem jsou palivové články, z nichž každý je umístěn v samostatném kanále. Do kanálu se ze spodu čerpá studená voda a cestou nahoru se ohřívá do varu. V horní části odchází parovodní směs do separačního bubnu, kde se odděluje voda páry. Pára putuje do turbíny a dále voda se vrací přes čerpadla do reaktoru. Schéma reaktoru je vidět na Obr. 1. Parametry rektoru jsou dále uvedeny v Tab. 3. [20], [23]

Tab. 3: Parametry reaktoru RBMK 1000 [24]

Výkon reaktoru	
-tepelný	3 200 MW
-lektrický	1 000 MW
Aktivní zóna	
Ekvivalentní průměr aktivní zóny	11 800 mm
Výška aktivní zóny	7 000 mm
Rozestup palivových kanálů	250 mm
Počet palivových kanálů	1693
Maximální výkon palivového kanálu	3 000 KW
Produkce páry	5 800 t/hodinu
Teplota vody na vstupu do kanálu	270 °C
Teplota vody na výstupu kanálu	284 °C



Obr. 1: Reaktor RBMK [24]

3.1.1 Příčiny havárie

Stavba čtvrtého bloku jaderné elektrárny byla dokončena v prosinci 1983. Jeho provoz byl zahájen již 20. prosince. To bylo velmi nečekané, neboť po dokončení stavby se zhruba půl roku provádějí testy jednotlivých částí, a teprve poté je elektrárna spuštěna. Plán byl však takový, že elektrárna musí být do konce roku spuštěna. Proto 31. prosince ředitel elektrárny Brjuchanov pod politickým nátlakem podepsal dokument o provedení všech nezbytných testů, ačkoli tyto testy provedeny nebyly. Jeden z těchto opomenutých testů se stal elektrárně osudným. [20], [24]

Na 25. dubna 1986 bylo naplánováno odstavení rektoru číslo 4 pro pravidelnou údržbu. Při této příležitosti bylo rozhodnuto provést celkem běžný experiment. Jednalo se ověření schopnosti turbínového reaktoru vyrábět díky setrvačnosti dostatek elektřiny po dobu alespoň 45 sekund, než se spustí nouzové generátory. Tato elektřina je nezbytná pro napájení bezpečnostních systémů reaktoru. Pohání chladící čerpadla, regulační a havarijní tyče, osvětluje velín a řídící pult. [19], [20], [24]

Plán experimentu zněl: Snížení výkonu na 25-30% (700-1000 MW tepelných), což je nejnižší výkon, při kterém je povolen provoz toho typu reaktoru. Dále odstavení první ze dvou turbín, následné odpojení havarijního chlazení (aby nezačalo působit během testu) a nakonec přerušení přívodu páry. [19], [21],

Havárii jaderné elektrárny by bylo možné zabránit, pokud by se obsluha reaktoru řídila všemi tehdy platnými předpisy. Můžeme tedy říci, že havárie byla způsobena výhradně lidským faktorem. Nicméně jistou měrou přispěl samotný typ reaktoru svou potenciální tendencí k nestabilitám. Podle odborníků bylo možné havárii zabránit i pouhých několik minut předem, a to zastavením experimentu a manuálním snížením výkonu reaktoru. [22]

3.1.2 Průběh havárie

V pátek 25. dubna se již od ranních hodin začalo s přípravami na plánovaný experiment. Výkon reaktoru byl postupně snižován, dokud nebyl odpojen jeden z turbogenerátorů. Dále byl odpojen systém havarijního chlazení. [21]

V odpoledních hodinách byl vydán požadavek o odklad testu Ukrajinskými energetickými závody, které potřebovaly dostatek energie pro továrny, jež musely splnit své plány před svátkem 1. května. Proto byl obnoven původní výkon 4. reaktoru, avšak nebyl zapojen systém havarijního chlazení, což bylo v rozporu s předpisy. [24]

O půlnoci dochází k výměně směny. Původní odpolední směna, která měla experiment provádět a byla s jeho průběhem podrobně seznámena, je nahrazena noční směnou s méně zkušenými operátory. [20]

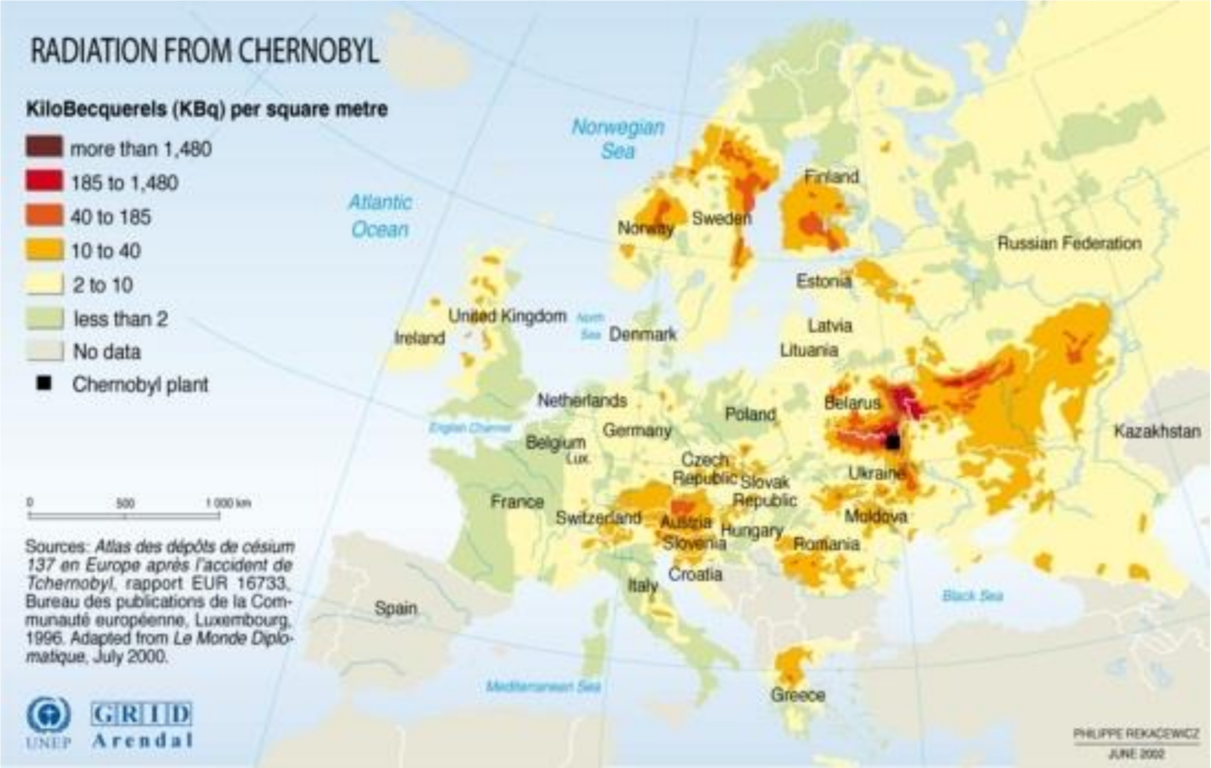
Inženýr Leonid Toptunov začne se snižováním výkonu reaktoru tím, že do něj spustí regulační tyče. Avšak výkon reaktoru klesá příliš rychle a to i pod zakázanou hranici 700 MW. Proto jsou tyče opět postupně vytahovány. Přesto, že se výkon ustálil na 200 MW, je rozhodnuto zahájit experiment. Proto Boris Stoljarčuk omezil přísun vody do reaktoru. Tím simuloval výpadek proudu, který pohání čerpadla. Další součástí experimentu bylo zapnutí záložních čerpadel, které však dodávaly do reaktoru příliš mnoho chladné vody a tím se zase snížil jeho výkon. Ten klesl až na 30 MW. Proto se Leonid rozhodl zvýšit výkon reaktoru vytažením většiny regulačních tyčí z reaktoru. V reaktoru jich zůstalo pouze 6, přičemž jich dle předpisů musí zůstat minimálně 30. Výkon se začal zvyšovat a experiment pokračoval. V tom si Stoljarčuk uvědomil, že do reaktoru pumpuje příliš mnoho vody a její tok omezil. Absence tyčí i vody měla za následek zvýšení tlaku páry uvnitř reaktoru. Pár sekund před výbuchem byla zapnuta havarijní ochrana, přičemž se do reaktoru měly spustit všechny havarijní tyče, které do té doby byly v prostoru nad reaktorem. Avšak zvýšená teplota zdeformovala vedení regulačních tyči a ty se v jedné třetině zasekly. Navíc jejich reakční doba byla příliš pomalá, tedy okolo 20 sekund. [19], [27]

Výkon reaktoru stoupl na 30 GW, což je desetkrát více než normální provozní stav. Palivové tyče se začaly tavit a prudce zvýšený tlak páry způsobil velkou parní expanzi, která odhodila víko reaktoru o hmotnosti 1000 tun. Výbuch, který nastal 26. dubna v 1:24, zničil chladící potrubí a zdemoloval střechu budovy. Do ovzduší se dostalo 8 tun vysoce radioaktivního materiálu. Grafit z reaktoru začal hořet. Zničená budova elektrárny můžeme vidět na Obr. 2.[21]

Obr. 2: Elektrárna Černobyl [29]

Čtyři minuty po výbuchu přijíždí na místo první hasiči. Nikdo jim neřekl, že budou hasit na místě jaderné havárie a oni tedy neměli žádnou protiradiační ochranu. Po čtyřech hodinách dostávají za cenu vlastních životů požár pod kontrolu. Radioaktivní tavenina měla teplotu více než 2000°C, při jejím hašení vodou, se voda rozkládala na vodík a kyslík. Tím docházelo k dalším výbuchům. [19], [27]

Při explozi se do ovzduší dostalo asi 300 sievertů radiace. Tato radiace vytvořila mrak, který vítr unášel první den nad Skandinávii. Tu přeletěl a druhý den se vracel do místa svého vzniku. Avšak vítr se změnil a radiaci zanesl přes tehdejší Československo do Rakouska, kde se zastavil o Alpy a rozprostřel se do okolních států. Jiný mrak byl z Černobylu unášen na východ a na jih k Bulharsku. Situaci ukazuje mapa na Obr. 3. [21]



Obr. 3: Radiace z Černobylu [29]

Dochází k obavám, že se palivo protavilo pod reaktor a tím by se mohlo dostat do spodních vod, což by mělo nesmírné následky pro obyvatelstvo. Proto je vyslán pracovník, aby zkontroloval prostor pod jádrem. K protavení nedošlo, ale preventivně je zbudována pod reaktorem betonová deska.

Dále je rozhodnuto vybudovat kolem reaktoru sarkofág. To však nejde, dokud se kolem elektrárny nachází velké množství radioaktivního paliva. Proto jsou povoláni vojáci, kterým se začne říkat likvidátoři. Ti mají za úkol naházet zbytky paliva zpátky do reaktoru. Tuto práci vykonají maximálně tři minuty. Přesto spousta z nich dostane celoživotní dávku radiace a mnoho z nich zemře. [27]

Sarkofág byl dokončen do konce listopadu. Byl tvořen železobetonovým obalem, který reaktor utěsnil tak, že ustaly všechny úniky radiace do okolí. Na jeho stavbu bylo spotřebováno 410 000 metrů krychlových betonu a 7 000 tun ocele. [20]

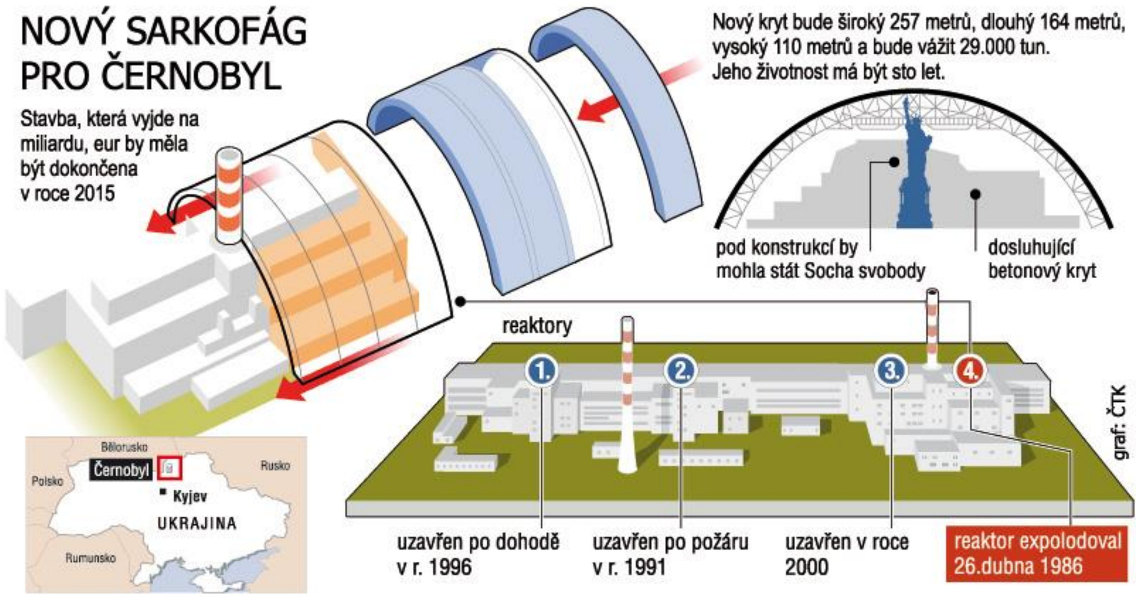
Předpokládá se, že z reaktoru mohlo uniknout celkově až 50 miliónu Curie radioaktivních látek. To by odpovídalo 5% celkové radioaktivity, která byla v době havárie v reaktoru. [20]

3.1.3 Následky havárie

Zdravotní důsledky. Část personálu obsluhy havarované bloku 26. dubna obdržela dávku gama záření v mezích 2-20 Gy. Dávky pracovníků provádějících nápravné operace dosahovaly průměru 100 mSv a maximem 500 mSv. Průměrná dávka evakuovaných ukrajinských obyvatel byla 17 mSv s maximem u jednotlivců 380 mSv. U Bělorusů to bylo 31 mSv průměrných a 300 mSv maximálních. Široké veřejnosti se tvrdilo, že následkem

černobylské havárie zemřely desítky až stovky tisíc lidí, avšak tato tvrzení jsou přehnaná. Celkový počet lidí, kteří mohli nebo mohou zemřít v důsledku havárie, se odhaduje na 4000. Toto číslo zahrnuje 28 havarijních pracovníků, kteří zemřeli na syndrom akutního ozáření (ARS) v roce 1986 a 19 jich zemřelo v letech 1987-2004 z jiných příčin. Dále je v těchto letech doloženo 9 úmrtí dětí na rakovinu štítné žlázy. Zbylých 3940 lidí mohlo zemřít na rakovinu způsobenou ozářením. Toto číslo se vztahuje na 200 000 pracovníků likvidujících následky havárie v letech 1986-1987 dále pak 116 000 evakuovaných lidí a 270 000 obyvatel z nejvíce kontaminovaných oblastí. Široká veřejnost byla zasažena pouze malou dávkou radiace a nedocházelo u ní k projevům ARS. Počet úmrtí během posledních dvaceti let, která jsou přisuzována havárii, je určován pouze odhadem. Lidé ozáření malou dávkou radiace umírají ze stejných příčin jako lidé neozáření. Ve skutečnosti nebudeme nikdy schopni přesně určit počet úmrtí způsobených havárií. Čím si však můžeme být jisti, je rozšíření nejrůznějších chorob v důsledku radiace. Mezi ně patří především rakovina štítné žlázy, leukémie, nádorová onemocnění, choroby oběhového systému a oční zákaly. Rakovina štítné žlázy se nejvíce rozšířila u dětí. Příčinou byl ^{131}I akumulující se z krevního řečiště. Tam se dostal vdechováním a požíváním především kontaminovaného mléka. V letech 1992-2000 bylo diagnostikováno celkem 4000 případů u lidí, kteří v době havárie měli 0-18 let. Z dětí ošetřených v letech 1986-2002 přežilo 98,8%. [25]

Ekologické důsledky. Po explozi z 26. dubna docházelo během následujících 10 dnů k velkým únikům radionuklidů. Více než 200 000 čtverečných kilometrů v Evropě bylo kontaminováno ^{137}Cs nad úroveň 37 EBq. Více jak 70% této plochy bylo v Bělorusku, Rusku a na Ukrajině. Těsně po havárii byly největší obavy z úniku radioaktivního jódu. V současnosti je důležitější kontaminace ^{137}Cs. Ve městech se radioaktivní látky usadily především na otevřených plochách, jako jsou trávníky, cesty, střechy a zdi budov. V současné době byla tato povrchová kontaminace značně snížena sekundárním přesunem do odpadních vod a kanalizací. Sarkofág, jenž zabránil dalšímu šíření radionuklidů mimo elektrárnu, byl vybudován v krátké době. Pracovníci při jeho výstavbě byli vystaveni vysokým dávkám radiace. Po dvaceti letech od výstavby je sarkofág již poškozen korozí. Nyní mu hrozí zhroucení a zvyšuje se riziko úniku radioaktivního prachu do okolí. Proto bylo rozhodnuto o výstavbě sarkofágu nového, který překryje ten starý. Na projektu se podílí 28 evropských zemí s tím, že větší část nákladů uhradí ukrajinská vláda. Sarkofág má být kopule o výšce 110m, délce 164m a šířce 257m a celý projekt má stát na 1,55 miliard euro. Pod tímto sarkofágem by mělo být možné demontovat ten starý a vyjmout vysoce radioaktivní hmoty z vyřazeného 4. bloku. Schéma nového sarkofágu na Obr. 4. [19], [25]



Obr. 4: Nový sarkofág Černobylu [26]

Uzavřená černobylská zóna se plánuje zpřístupnit v méně zasažených oblastech veřejnosti. To předpokládá výstavbu a provoz nové bezpečné obálky 4. reaktoru. Dále pak vyvezení paliva a demontáž zbylých tří reaktorů, výstavbu zpracovny radioaktivního odpadu, založení oblastí uzavřených před osídlením a zachování monitorování životního prostředí. [25]

3.2 Fukušima

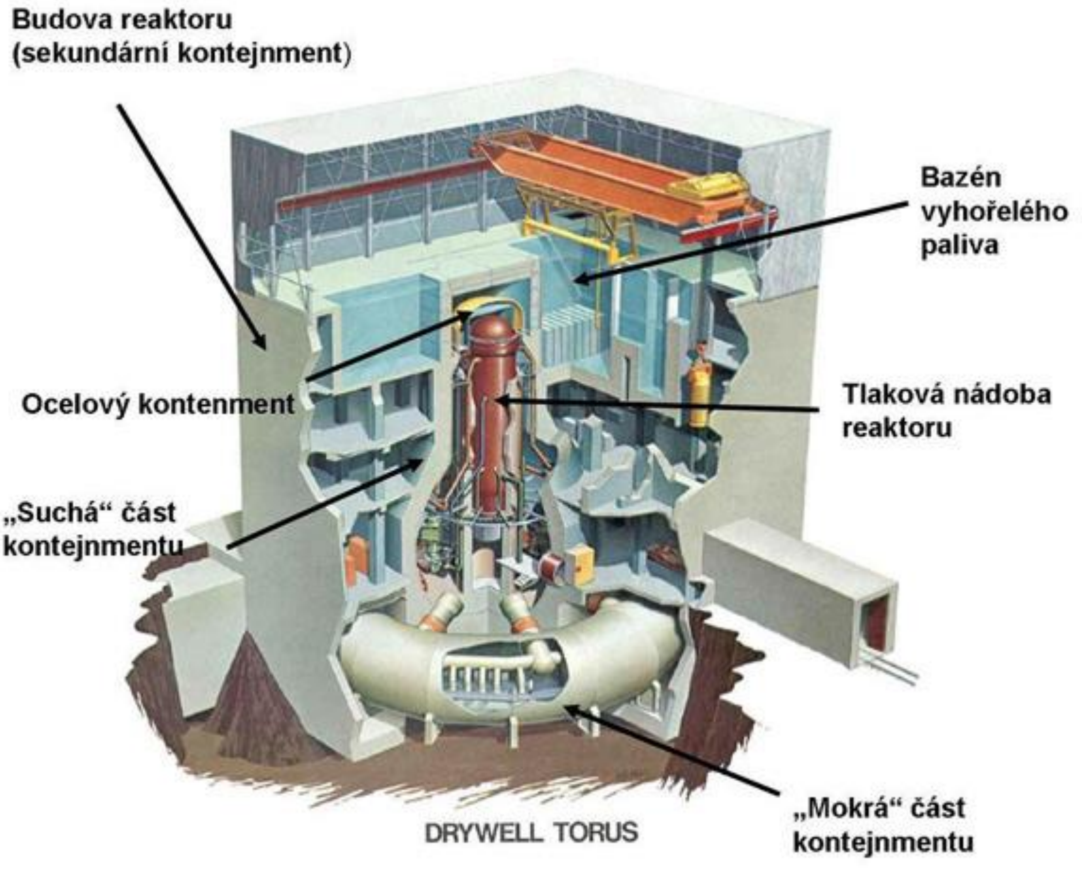
3.2.1 Popis elektrárny

Japonská jaderná elektrárna Fukušima I/Dai-ichi se nachází na pobřeží Tichého oceánu v prefektuře Fukušima. Výstavba elektrárny byla zahájena v roce 1966. Je tvořena šesti varnými reaktory o celkovém výkonu 4 696MW. Podrobný popis reaktorů je v Tab. 4. Byla plánovaná výstavba dalších dvou reaktorů ABWR s výkonem 1 380MW, ale po havárii byl tento projekt zrušen. [30]

Tab. 4: Reaktory ve Fukušimě [30]

Blok	Typ reaktoru	Uvedení do provozu	Elektrický výkon
Fukušima I - 1	BWR-3	26. květen 1971	460MW
Fukušima I – 2	BWR-4	18. červenec 1974	784MW
Fukušima I - 3	BWR-4	27. květen 1976	784MW
Fukušima I - 4	BWR-4	12. říjen 1978	784MW
Fukušima I – 5	BWR-4	18. duben 1978	784MW
Fukušima I – 6	BWR-5	24. říjen 1979	1 100MW

Aktivní zóna reaktoru je umístěna v tlakové nádobě. Tato nádoba je pak dále uložena v kontejnmentu zhotoveném z oceli a betonu. Schéma reaktoru popisuje Obr. 5. Tento kontejnment se označuje Mark I a je vestavěn do reaktorové budovy, která pak tvoří sekundární kontejnment. Primární kontejnment Mark I je navržen tak, aby zabránil úniku radioaktivity, a navíc obsahuje systém pasivního havarijního chlazení. Nad primárním kontejnmentem jsou ještě bazény pro skladování paliva. [33]



Obr. 5: Fukušimský reaktor [33]

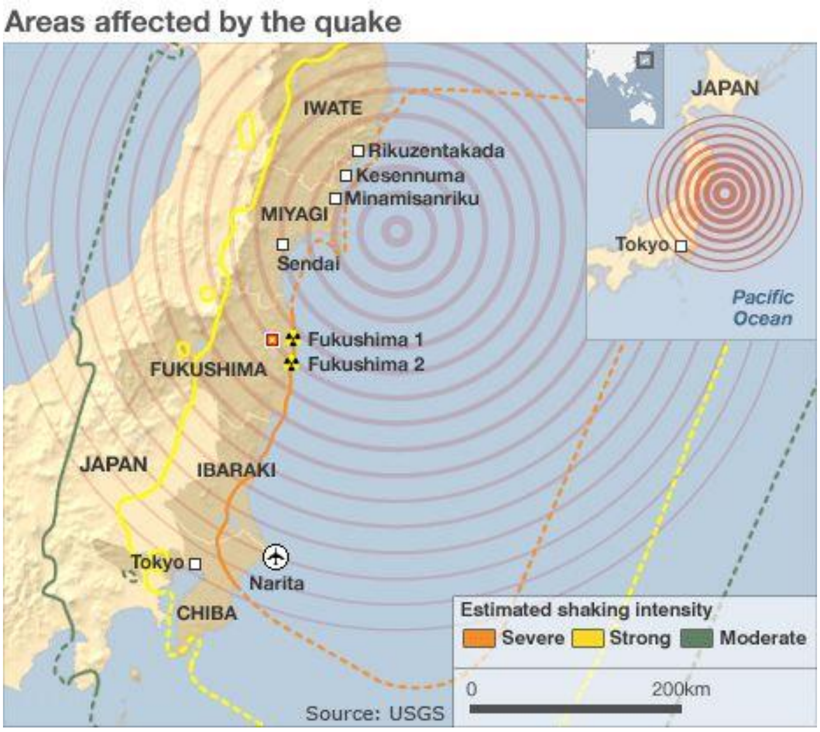
Reaktor musí za všech situací zajistit tři základní činnosti. První je zasunutí havarijních tyčí pro zastavení štěpné reakce. Tyto tyče jsou v případě reaktoru BWR umístěny ve spodní části. Další důležitým úkolem je zajistit dochlazení aktivní zóny, jelikož i po zastavení štěpné reakce dochází k rozpadu radioaktivních prvků, které vznikly během činnosti reaktoru. To se zajišťuje systémem havarijního chlazení. V případě poruchy je první reaktor chlazen vodou z malého zásobníku, ze kterého vodu čerpají pumpy poháněné vznikající parou. V případě druhého a třetího reaktoru je chlazení zajištěno toroidními komorami potlačení, což je mokrá část kontejnmentu. Tyto komory pracují do okamžiku, než voda dosáhne varu. Pokud dojde k jejich selhání a nenaběhnou havarijní čerpadla, je potřeba dochlazovat pomocí vodních stříkaček. Posledním úkolem je zabránit úniku radioaktivních látek. Pokud by teplota v reaktoru dosáhla 800°C, došlo by k poškození zirkonových obalů palivových článků. Ty

slouží jako ochrana před únikem těkavých radionuklidů. Při těchto teplotách zirkonium reaguje s vodou a vzniká vodík. Z 1 kg zoxidovaného zirkonia se uvolňuje asi 44,2 g vodíku. Vodík může dále vzniknout tepelným rozkladem vodní páry při vysokých teplotách. Vodík je v kombinaci s kyslíkem velice výbušný. Výbuchu vodíku může v případě kontejnmentu Mark I zabránit vypuštění dusíku. Při velkých tlacích v reaktoru je však někdy nutné kontejnment ventilovat a vypustit z reaktoru páru. Tento únik je hnán přes filtry, které mají zabránit úniku radiace. Pokud teplota stoupne na 1450°C začne se tavit ocel, ze které je reaktor vyroben. Pokud teplota dosáhne 2850°C začne se tavit samotné palivo.

Třetí a poslední činnost, která musí být zajištěna, je zabránění v úniku radiace do okolí. Z tohoto důvodu je zde několik zábran. První je zirkonový povlak paliva a dalším je kontejnment. [32], [33]

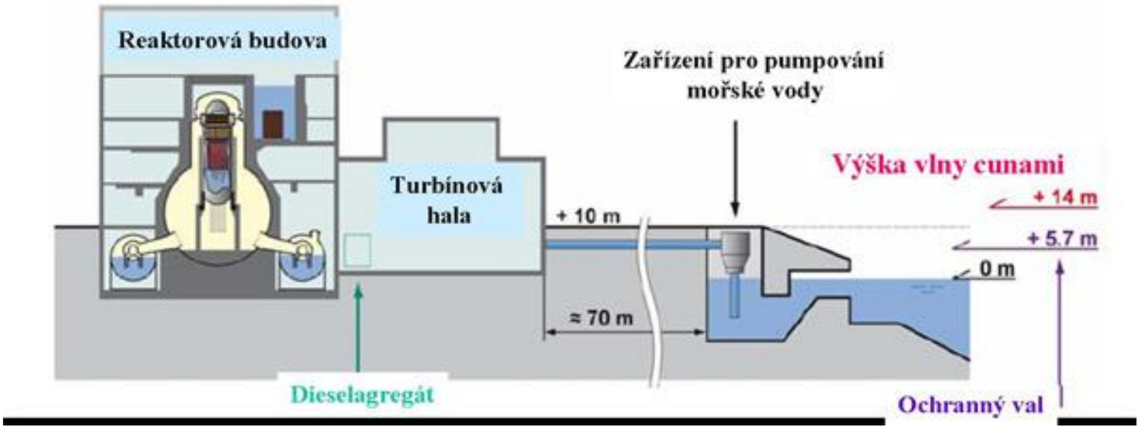
3.2.2 Popis havárie

V pátek 11. března 2011 ve 14:46 místního času udeřilo jedno z nejsilnějších zemětřesení v moderní historii lidstva o síle 9,1 stupně Richterovy stupnice. Jak lze vidět na obrázku Obr. 6, epicentrum se nacházelo přibližně 373 kilometrů severovýchodně od Tokia na ostrově Honšú. V době havárie byly v provozu reaktory 1,2 a 3. Ostatní reaktory byly v plánované odstávce. Na 4. bloku probíhala výměna paliva. Na blocích 5 a 6 údržba. V průběhu silného zemětřesení byly automaticky odstaveny bloky 1 až 3 zasunutím regulačních tyčí a byl zahájen proces dochlazování. Zemětřesení přerušilo veškeré vnější přívody energie do elektrárny, a tak chlazení zajišťovaly obří lodní motory, dieselagregátory. [31], [32]



Obr. 6: Místo zemětřesení v Japonsku [31]

Necelých 41 minut po zemětřesení se na elektrárnu přihnala vlna tsunami. Elektrárna byla vystavěna ve výšce 10 metrů. Ochranná hráz měla výšku 5,7 m. Původní hráz byla v roce 2002 dokonce zvýšena z pouhých 3,1 metru. Tsunami měřila 14 metrů. Schéma ochranného valu před elektrárnou Obr. 7. Vlna zaplavila areál elektrárny a sním i dieselagregátory, které byly navíc uloženy v suterénu turbínové haly, a tím je vyřadila z provozu. Dále byly zaplaveny pumpy mořské vody, elektrické rozvody a zdroje stejnosměrného proudu. Přežil pouze dieselagregát na 6. bloku. Samotná vlna zabila dva pracovníky elektrárny. Bloky 1,2 a 4 byly kompletně bez energie. Blok 3 měl záložní baterie, které však vydržely jen do 13. března. Blok 5 ztratil zdroj elektrické energie. Chlazení reaktorů tak obstarávaly jen pasivní systémy. Zemětřesení i vlna tsunami zdevastovaly prostory elektrárny a tím ztížily dopravu hasičských stříkaček a náhradních zdrojů energie. [32], [33]



Obr. 7: Ochranný val Fukušimy I [33]

Již během prvního dne asi v 18:11 se začalo obnažovat palivo v prvním reaktoru a došlo k jeho následnému poškození. Na druhý den, 12. března, se do reaktoru začala čerpat čerstvá voda. Došlo však k prudkému nárůstu tlaku v primárním kontejnmentu. Tlak byl snížen otevřením příslušných ventilů a kontrolovaným vypuštěním vodní páry do sekundárního kontejnmentu, což je budova reaktorovny. V 15:36 místního času došlo vlivem nahromaděného vodíku k výbuchu. Výbuch poškodil střechu budovy bloku 1 a odhalil bazén na vyhořelé palivo. O pět hodin později se do tohoto reaktoru začala vstřikovat mořská voda. [32], [33]

Ve druhém bloku vydržel systém pasivního chlazení až do 14. března. K jeho selhání došlo v 13:25. Odhaduje se, že v 17:00 se obnažilo palivo, které se následně v 19:20 poškodilo. Aby se zabránilo dalšímu tavení palivových tyčí, začali vstřikovat mořskou vodu, která doplňovala již chybějící zásobu vody v reaktoru. 15. března došlo k překročení maximálního únosného tlaku a poškodila se kondenzační část, tedy komora potlačení. Následkem toho byl nekontrolovaný únik plynů a kontaminované vody. Elektrárna musela být dočasně evakuována. Výsledkem byla vysoká dávka záření, která zkomplikovala další záchranné práce. Tento únik byl hlavní příčinou zamoření kolem Fukušimy I. [33]

Ve třetím reaktoru selhaly systémy pasivního chlazení 13. března asi ve 2:42. Palivové tyče se dle odhadu začaly odhalovat v 9:10 a k jejich poškození došlo v 10:40. Došlo k pumpování užitkové vody do reaktoru a jeho odvětrávání. Propojeným systémem se odtud dostával vodík do čtvrtého bloku. Ve 13:12 se zahájilo pumpování mořské vody. Přes

veškerou snahu došlo 14. března na tomto bloku v 11:01 k explozi vodíku. [33]

Ve čtvrtém bloku dochází k výbuchu vodíku 15. března. Tento výbuch byl paradoxně ku prospěchu, neboť v tomto bloku se v bazénech skladovalo nejvíce vyhořelého paliva. Díky otvoru po výbuchu mohl být bazén chlazen helikoptérami a stříkačkami. Díky tomu se teplota v bazénu drží blízko hladiny 100°C a tím se nad reaktorem vznášel oblak páry jak je vidět na Obr. 8. Tato pára je však radioaktivní. [33]

Na pátém a šestém bloku se 13. března vlivem zbytkového tepla začal zvyšovat tlak, proto muselo být zahájeno jejich havarijní chlazení. Díky tomu, že reaktory byly v době zemětřesení odstaveny a měly k dispozici dieselagregátor šestého bloku, podaří se již 21. března reaktory převést do stavu studeného odstavení. Přehled o explozích v elektrárně poskytuje Obr. 9. [32], [33]

Obr. 8: Elektrárna Fukušima [35]

Obr. 9: Místa explozí v elektrárně [31]

20. března se podařilo obnovit dodávky elektřiny do areálu elektrárny. Důležitým zlomem bylo připlutí tankovací lodi americké armády s technickou vodou. To se stalo 26. března. Od tohoto okamžiku se pro chlazení místo mořské vody začala používat voda technická. [33]

28. března byla v turbínových halách bloku 1 až 4 objevena radioaktivní voda. Aby ji bylo možné z hal odčerpat, musel se nejprve vyčerpat obsah zásobní nádrže kondenzátoru do doplňovací nádrže primárního kontejnmentu.

Dále byla detekována vysoká úroveň radiace v drenážním systému vně turbínové haly poblíž bloku 2. V betonové stěně šachty s přívodními kabely byla později objevena trhlina o délce asi 20 cm. Únik byl zastaven až injektáží polymerního vodního skla 6. dubna. Odhaduje se, že uniklo 4700 TBq radiace.

4. dubna na základě rozhodnutí TEPCO bylo do moře vypuštěno 11,5 t nízce radioaktivní vody o radioaktivitě 0,15 TBq. Tím byly připraveny prostory pro shromáždění vysoce radioaktivní vody z dalších míst elektrárny.

V průběhu června až července se podařilo zprovoznit tepelný výměník a bylo tedy možné začít chladit vodu v bazénech vyhořelého paliva místo prostého doplňování vody. Dále došlo k rekonstrukci zařízení, které vhání do reaktoru dusík, aby zamezili výbuchu vodíku. Díky tomu mohlo dojít k intenzivnějšímu chlazení reaktorů. [33]

16. prosince 2011 všechny reaktory dosáhly stavu *studeného odstavení*. To znamená, že teplota chladiva dosáhla pod 100°C a tlak v reaktoru klesl na úroveň okolí nebo 1 atmosféru. Dále se snížil únik radiace z prvního kontejnmentu na 1 mSv/rok. [32]

3.2.3 Následky

Ihned po zásahu elektrárny vlnou tsunami došlo k preventivnímu opatření, tj. evakuaci asi 150 000 obyvatel v okruhu 20 km. V okruhu 30km bylo lidem doporučeno, ať nevycházejí z domovů. Díky tomu nebyl dopad radiace na obyvatelstvo tak velký. [31], [35]

24. března byli ozářeni 3 pracovníci subdodavatelské firmy, kteří pravděpodobně ignorovali hlášení dozimetrů a během pokládání elektrického kabelu stáli v radioaktivní vodě

po dobu asi tří hodin. Dva z nich obdrželi dávky v okolo 175mSv, čímž nepřekročili stanovenou hranici 250mSv stanovenou japonským jaderným dozorem. [31] [34]

Největší dopad měla havárie na důvěru lidí v jadernou energetiku a to především v Německu. Jako předběžné opatření Němci odstavili osm nejstarších jaderných elektráren a do roku 2022 plánují odstavit i ty zbývající. V Evropě dojde k prověření všech provozovaných jaderných elektráren pomocí tzv. stress testů. [34]

3.3 Nejnovější poznatky

V červenci roku 2012 byla vydána zpráva o analýze havárie v jaderné elektrárně Fukušima. Zprávu vypracovala nezávislá komise sestavená japonským parlamentem. Z této zprávy vyplývá, že havárie nemůže být připisována pouze přírodní katastrofě, ale šlo i o lidmi způsobenou katastrofu, která se měla předvídat, a tudíž se jí mohlo zabránit. Jedním z hlavních problémů, na které komise narazila, byl fakt, že úřad, který měl jadernou energetiku kontrolovat, byl současně zodpovědný i za její propagaci a rozšiřování. Na toto již dříve poukazovala MAAE, avšak narazila na další velký problém, a tím je organizace japonské společnosti. Silné domácí tradice, obavy zpochybňovat autority a bezmezná oddanost zaměstnavateli a komunitě. V roce 2006 byl provozovateli elektrárny TEPCO předložen návrh na zvýšení opatření před možným zemětřesením a vlnou tsunami. Avšak z výše uvedených důvodů nebyly úřady schopny úpravy prosadit. Tato opatření by však elektrárnu před samotnou vlnou nejspíše neuchránily. S tak velkou vlnou, která vznikla, nikdo nepočítal. Mohly se lépe ochránit záložní zdroje energie, a celkově zmírnit rozsahy škod. Dále je zpráva velice kritická ke společnosti TEPCO. Společnost měla údajně nedostatečně proškolené pracovníky pro případ vážné havárie, dále špatně fungoval krizový management a evakuace obyvatelstva byla problematická. Zpráva ještě uvádí, že elektrárna mohla být poškozena i následkem zemětřesení, což ve svých zprávách společnost TEPCO popírá. [35]

Kvůli obavám které vzbudila Fukušimská havárie byly nařízeny zátěžové testy jaderných elektráren v Evropě. 4. října 2012 již byly známy výsledky. Tyto testy odhalily mnoho nedostatků především ve Francii kde z 58 elektráren, nebyla v pořádku ani jedna. Nejlépe dopadly elektrárny v Německu a ve Velké Británii. Žádná elektrárna však neměla natolik závažné nedostatky, aby musela být uzavřena. Opravy nedostatků na 140 evropských elektrárnách budou stát asi 25 miliard euro, přičemž nejvíce peněz spolknou nejstarší francouzské elektrárny, které jsou navíc na pobřeží. Co se českých elektráren týče, nebyly zaznamenány žádné závažné nedostatky. Česká republika dostala jen několik doporučení. Mezi ně patří zlepšení ochrany naftových čerpadel před povodněmi. Dále chybí systém včasného varování před zemětřesením. [36]

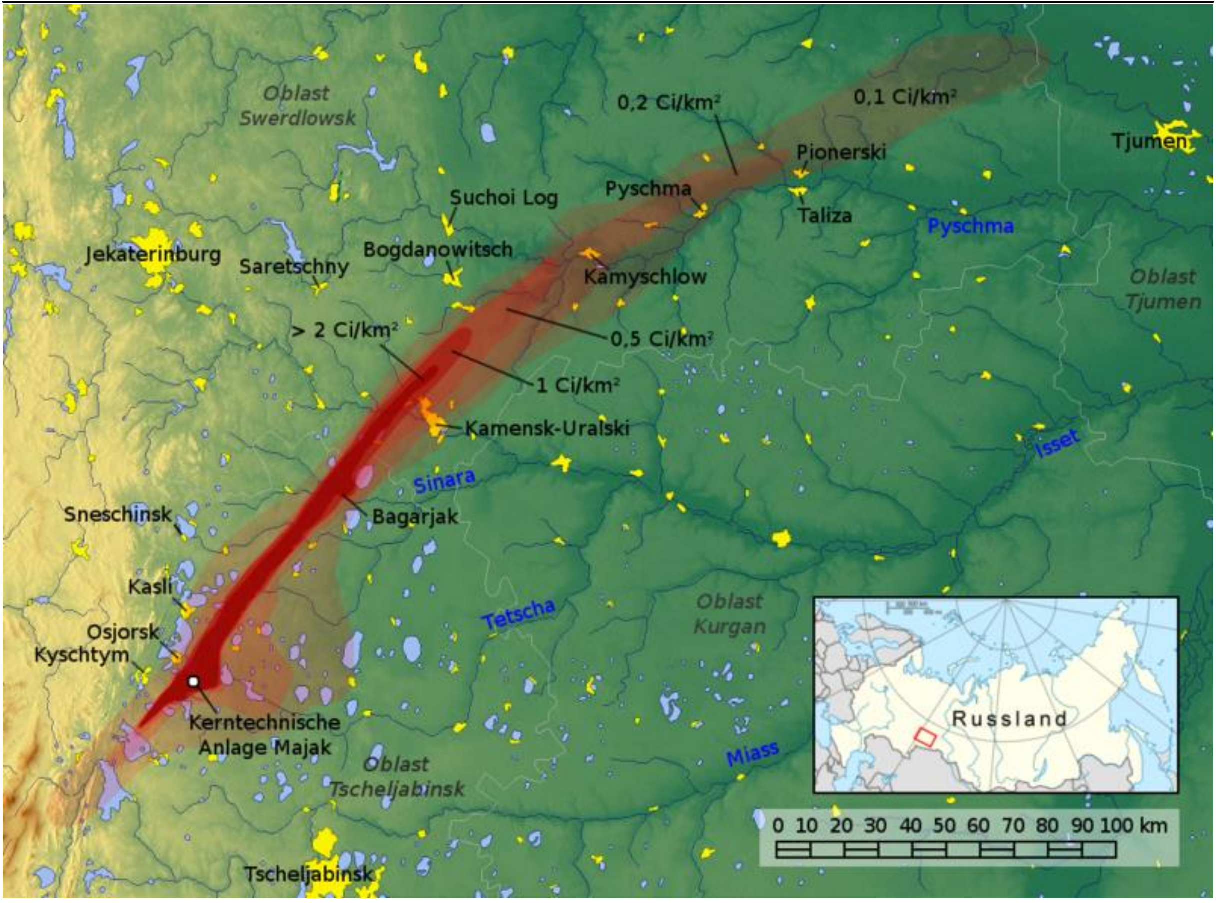
4 Havárie šestého stupně

Havárie tohoto stupně byla pouze jedna a svým rozsahem byla třetí největší v historii.

4.1 Majak

Majak, jinak též Kryštym se nachází poblíž osmdesátitisícového města Ozjorska v Čeljabinské oblasti na úbočí Uralu v Rusku. Tento závod byl postaven mezi lety 1945 až 1948. Majak patří mezi největší jaderná pracoviště na světě. Je to závod, ve kterém je zpracováváno vyhořelé jaderné palivo z Kolské, Novovoroněžské a Bělojarské atomové elektrárny a z reaktorů ruských atomových ponorek. Zde ho proměňují na plutonium, které se používá pro výrobu jaderných bomb. První sovětská atomová bomba byla postavena z plutonia z tohoto závodu v roce 1949. Tento závod dále slouží i jako skladiště radioaktivního opadu. Odhaduje se, že v tomto středisku se skladuje 120 milionů curiů radioaktivního odpadu. Většina tohoto odpadu je skladována v tekuté formě v obrovských cisternách. [37], [38], [41]

Dne 29. září 1957 v tehdejším Sovětském svazu došlo vlivem poruchy chladícího zařízení k rychlému přehřátí obsahu jednoho kontejneru o obsahu 80 tun radioaktivního odpadu. To vedlo k destrukci zásobníku a 160 tun těžký betonový uzávěr kontejneru byl vystřelen do vzduchu. Při výbuchu o síle 100 tun TNT došlo k úniku až 20 milionů curie radioaktivních látek do okolí a především do řeky Teča. Únik kontaminoval plochu o rozloze několika tisíc kilometrů čtverečných především Cesiem-137 a Stociem-90. Tato oblast je označována jako Východouralská radiační stopa na Obr. 10. [38], [39], [40]



Obr. 10: Východouralská radiační stopa [42]

Na následky přímého ozáření zemřelo několik lidí. V následujících desetiletích bylo ozářeno více než 272 000 obyvatel. Z 29 873 sledovaných osob narozených před rokem 1950 a mezi léty 1950-1960 pobývajících na březích řeky Teča zemřelo 1842 lidí na nádorová onemocnění a 61 lidí na leukémii. [37]

Událost byla dlouho utajována. Moskva ji oficiálně nahlásila Mezinárodní agentuře pro atomovou energii (MAAE) až v roce 1989. [39]

5 Havárie pátého stupně

Tyto havárie byly celkem tři. Přičemž dvě se odehrály v jaderných elektrárnách a jedna vznikla špatnou manipulací s radiologickým zářičem. Jaderná havárie v Three Mile Island byla největší havárií, která se kdy odehrála na území amerického kontinentu. Havárie v Sellafield je zase největší havárie na území Evropy.

5.1 Three Mile Island

Elektrárna je pojmenována podle ostrova, na kterém se nachází. Tento ostrov leží uprostřed řeky Susquehanna přibližně 16 km od Harrisbugru, hlavního města státu Pensylvánie v USA. Letecký pohled na elektrárnu je vidět na Obr. 11. Jaderná elektrárna má dva tlakovodní reaktory o výkonu 1000 MW označené TMI-1 a TMI-2. Reaktor TMI-1 byl uveden do provozu 2. září 1974 a funguje doposud. Plánovaný provoz má až do roku 2034. Druhý reaktor TMI-2 byl do provozu uveden 30. prosince 1978. [44]

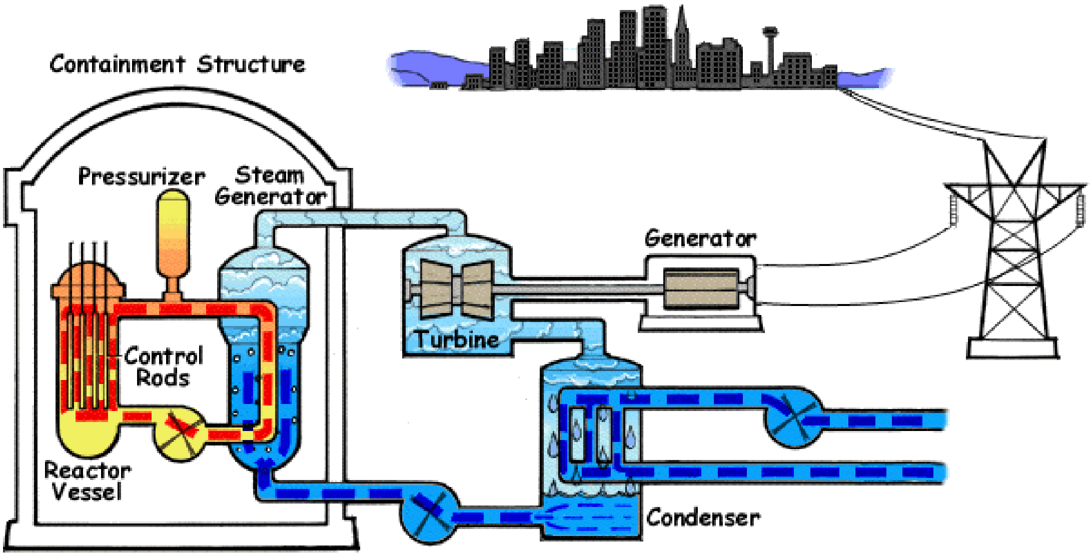
Obr. 11: Three Mile Island [45]

Pro ilustraci postupu havárie slouží obrázek Obr. 12. 28. března 1979 ve 4 hodiny ráno došlo k poruše na sekundárním okruhu. Hlavní napájecí čerpadla vody se zastavila z důvodu

buď mechanické, nebo elektronické poruchy. Turbína připojená na toto potrubí se automaticky odpojila. Přestože již nevyráběla elektřinu, reaktor dále pracoval na plný výkon. Tím, že se zastavila cirkulace vody, přestal se chladit primární okruh a to vedlo k růstu tlaku a teploty, dále se tím automaticky zpustily další kontrolní systémy. Nejprve se otevřel přetlakový pojistný ventil, aby snížil vzrůstající tlak v potrubí. To nestačilo, a tak se plně spustily regulační tyče a reaktor se zastavil. Tyto události nebyly nijak neobvyklé a stávaly se docela často. [43], [47]

Nicméně pojistný ventil se zablokoval v otevřené poloze a tlak neustále klesal. Navíc se přeplnila nádrž, do níž ústil ventil, a radioaktivní voda zaplavila prostor kolem reaktoru. Současně selhala náhradní čerpadla pro chlazení reaktoru. Byla totiž odstavena kvůli probíhající údržbě. Obsluha věděla, že je problém, ale neznala jeho příčinu. Signalizační světla hlásila, že ventil je uzavřen. Odstavený reaktor vlivem setrvačnosti stále produkoval 6% svého tepelného výkonu, a byla potřeba jej chladit. Automaticky se tedy zapojil havarijní systém chlazení, aby kompenzoval úniky vody z primárního okruhu. Vlivem varu vody se voda dostala až k pojistnému ventilu, operátoři si tento stav interpretovali tak, že vody je v reaktoru až příliš, proto ručně zastavili havarijní čerpadlo. Během několika minut se situace vrátila do kritického stavu. Teplota stoupala, horní části reaktoru byly pouze v páře. Začaly praskat a tavit se palivové tyče. Od této chvíle unikaly radioaktivní plyny pod tlakem přímo nad oblohu elektrárny. Filtry, které byly umístěny na větracích komínech a měly zabránit úniku radiace, se ucpaly a přestaly fungovat. [43], [47]

Po více než dvou hodinách od havárie se podařilo lokalizovat únik páry z ventilu a zavřít jej. Po další hodině se podařilo plně zprovoznit systém havarijního chlazení. Bylo registrováno několik explozí v kontejneru způsobených vodíkem, který se tam dostal při vypuštění páry. Dvanáct hodin po havárii byl reaktor plně pod kontrolou.



Obr. 12: Schéma tlakovodního reaktoru [46]

Kvůli obavám z následků havárie guvernér rozhodl o evakuaci 3500 dětí a těhotných žen. Dalších asi 200 000 lidí se v panice rozhodlo oblast opustit ve svých autech. Aby vláda zabránila hromadnému útěku obyvatel, přijel 1. dubna 1979 na návštěvu elektrárny prezident James Carter a guvernér Pensylvánie Richard Thorburgh. Vyšetřovací komise jako příčinu

havárie určila závadu na bezpečnostním ventilu. Zároveň však upozornila na pochybení personálu a jeho nedostatečný výcvik. [47]

Předpokládá se, že do atmosféry uniklo 2,5 miliónu curie radioaktivního plynu. Během týdne po havárii pociťovalo mnoho lidí příznaky ozáření – jako kovová příchuť v ústech, záněty pokožky, pálení a slzení očí, průjmy, nevolnost a zvracení. Navzdory všem skutečnostem existují studie, které popírají jakýkoliv vliv havárie na okolní prostředí, stejně tak existují studie, jež škody potvrzují. Zejména je to zvýšení výskytu poškození štítné žlázy u dětí a zvýšený výskyt rakoviny. [47]

5.2 Sellafield

Sellafield původně zvaný Windscale je hlavní jaderné středisko ve Velké Británii. Je zde několik továren na zpracovávání jaderného paliva, již odstavená jaderná elektrárna a několik reaktorů pro civilní i vojenské účely. Pohled na závod je na Obr. 13. [48]

Obr. 13: Sellafield [48]

7. října 1957 došlo kvůli chybě obsluhy k závažné havárii. Reaktor se zahříval, aby se za pomocí záření obnovila porušená struktura grafitu, avšak porouchal se teplotní snímač. Teplota se zvedla příliš a palivové články se přehřály. Obsluha pro ochlazení paliva zapnula přívody čerstvého vzduchu. To byla chyba, neboť čerstvý vzduch způsobil vznícení a následné hoření grafitu a jeho povlaku. Teplota dosáhla na úroveň 1000°C. Požár se

podařilo uhasit až po čtyřech dnech zaplavením reaktoru pěti miliony litry vody. [49]

Během požáru však shořelo asi 8% paliva. Přes odvětrávací komín se do ovzduší nad Anglii, Wales a severní Evropu dostaly radioaktivní látky. Byly to především jód, cesium a polonium. V okruhu 520 kilometrů čtverečných byl na dobu 44 dnů vydán zákaz konzumace mléka. Podle oficiálních odhadů uniklá radiace způsobila předčasnou smrt u několika lidí. Nyní je reaktor zalit do betonu. Pod jeho silnou vrstvou se stále nachází okolo 22 tun uranu. Přes veškerý dopad na obyvatelstvo, který byl větší než u havárie Three Mile Island, tato havárie v té době nevyvolala téměř žádnou pozornost. [49], [50]

5.3 Goiania

V roce 1985 se přestěhovala radioterapeutická klinika z budovy ve městě Goania. Toto město se nachází v Brazílii asi 180 kilometrů jihozápadně od hlavního města Brasilia. V této budově však zanechali radioterapeutický zářič, jenž obsahoval práškový chlorid cesia Cs-137 radioaktivitě 51 TBq. [51], [52], [53]

V roce 1987 13. září opuštěnou budovu navštívili dva metaři Roberto Santos Alves a Wagner Mota Pereirai, kteří přístroj našli a odvezli si jej domů. Chtěli jej prodat do sběru a tak začali z demontáží zařízení. Oba silně onemocněli, ale lékaři jim diagnostikovali alergickou reakci na jídlo. Později se Alvesovi podařilo protrhnout kapsli s caesim. To vydávalo modré světlo, avšak v té době nebyl přesný mechanismus generace tohoto světla znám. Schránku prodali majiteli šrotiště Ferreirovi. Ten si sezval rodinu a přátele, aby schránku prozkoumávali. Lidé si brali kousky ze schránky domů. Někteří si mysleli, že modré světlo je léčivé. Tím se radiace rychle šířila po městě. Lidé, kteří onemocněli, se dostali do nemocnice, kde jim lékaři chybně diagnostikovali různé alergie. 29. září jistý fyzik zjistil přítomnost radiace a objevil velké zamoření města. [52], [53], [54]

Na následky ozáření zemřeli čtyři lidé. Manželka a dcera majitele šrotiště Ferreira. A dále pak jeho dva zaměstnanci, kteří se ze schránky snažili dostat olověné těleso. Tito lidé obdrželi dávky v rozmezí 4 až 6 Gy. Dalších 249 osob bylo kontaminováno a 112 000 jich bylo monitorováno. Na výskyt radiace bylo proměřeno 67 kilometrů čtverečných a 159 domů. Některé domy musely být i zbourány. Zlikvidováno muselo být 35 000 kubických metrů materiálu. Likvidace následků stála desítky miliónů dolarů. Při řešení následků havárie panoval mezi lidmi obrovský strach, mnozí si mysleli, že je to následkem havárie v Černobylu. Těla zemřelých byla pohřbena do olověných rakví ze strachu šíření radiace. [52], [53], [54]

6 Havárie čtvrtého stupně

Těchto havárií bylo několik. Mezi tyto havárie patří také havárie v tehdejší československé jaderné elektrárně Jaslovské Bohunice.

6.1 Saint Laurent

Jaderná elektrárna Sraint-Laurent na Obr. 14 se nachází v obci Saint-Louren-Nouan na řece Loiře. Což je 28 km po proudu od hlavního města Blous v oblasti Loir-et-Cher a 30 km proti proudu od města Orléans. Výstavba elektrárny byla zahájena v roce 1963. V roce 1969 a 1971 byly dostavěny 2 bloky jaderné elektrárny. Ty obsahovaly plynem chlazený typ reaktoru (GCR) a to konkrétně francouzský typ UNGG s čistým elektrickým výkonem 390 MW a 450 MW. Tyto reaktory jsou kanálového typu s grafitovým blokem v tlustostěnné betonové nádobě z předpjatého betonu. Každý reaktor obsahuje 3200 palivových kanálů, z nichž každý je dálkově ovládaným manipulátorem plněn a vyměňován. Tyto reaktory byly vyřazeny v dubnu 1990 a v červnu 1992. V roce 1983 byly instalovány tlakovodní reaktory PWR, z nichž každý má čistý elektrický výkon 956 MW. Reaktory PWR pracují dodnes. Elektrárna zaměstnává zhruba 670 pracovníků. [43], [55]

Obr. 14: Elektrárna Saint-Laurent [55]

17. října 1969 chtěl operátor automatickým programem pro řízení manipulátoru vyměnit několik palivových článků. Manipulátor se však po chvíli zastavil a signalizoval, že box s čerstvými články je prázdný. Operátor v rozporu s předpisy automatický systém vyřadil a manipulátor se ujal řídit ručně. Místo k boxu s palivovými články však manipulátor navedl k boxu s grafitovými tyčemi. Ty po zasunutí do kanálu reaktoru zastavily průtok vody a zbývající palivové články s hmotností 50 kg se roztavily. Jakmile uvolněné štěpné produkty kontaminovaly vodu v primárním okruhu, automatická ochrana reaktor odstavila. Ze závěrů vyšetřovací komise vyplynulo, že se v programu sice vyskytla chyba, ale operátor hrubě porušil předpisy a byl odsouzen ke třem letům vězení. [43], [55]

Podobná nehoda se opakovala o 11 let později v roce 1980 na druhém reaktoru. V případě obou nehod došlo ke značným škodám a zařízení bylo po déle než jeden rok mimo provoz, mimo jiné z důvodu náročného odstraňování taveniny z reaktoru. Během havárie naštěstí nebyl nikdo zraněn a z reaktorů neunikla radioaktivita. [43], [55]

6.2 Jaslovské Bohunice

Jaderná elektrárna Jaslovské Bohunice Obr. 15 se nachází v okrese Trnava v blízkosti stejnojmenné obce na Slovensku. Poloha elektrárny je zobrazena na Obr. 16. Elektrárna se skládá ze tří částí. A-1, která obsahuje jeden reaktor a částí V1 a V2 z nichž každý obsahuje 2 reaktory. První reaktor A-1 byl typu KS-150. Jeho výstavba začala v roce 1958 a do provozu byl uveden v prosinci 1972. Reaktor byl navrhnut tak, aby bylo možné používat jako palivo neobohacený (přírodní) uran. Palivo bylo umístěno ve148 kanálech. Konstrukce dále umožňovala výměnu paliva za provozu reaktoru. Jako moderátor sloužila těžká voda, které v reaktoru bylo 57,2 tun. Chlazení reaktoru obstarával oxid uhličitý. Tepelný výkon elektrárny byl 560 MW a čistý elektrický 110 MW. Kvůli náročné koncepci elektrárenské části A-1 docházelo během jejího spuštění i provozu k častým poruchám. Po druhé havárii nebyl reaktor obnoven. Část elektrárny V1 byla vystavěna během let 1972 a 1981. Další část V2 byla vybudována v letech 1976 až 1985. V současnosti je v provozu pouze část elektrárny V2 s plánovanou životností 40 let. Reaktory v části elektrárny V1 byly odstaveny v roce 2006 a 2008 jako podmínky vstupu Slovenské republiky do Evropské unie. [56]

Obr. 15: Elektrárna Jaslovské Bohunice [57]

Obr. 16: Poloha Jaslovských Bohunic [56]

První vážná havárie se stala 5. ledna 1976. Při výměně palivového souboru nedošlo ke správnému uzamčení těsnící zátky palivové kazety. Tato závada byla způsobena chybnou montáží, nikoli samotnou konstrukcí reaktoru, kdy byl nesprávně namontován pojistný šroub. Po odstykování zavážecího stroje od reaktoru došlo vlivem tlaku chladiva k vymrštění palivového souboru. Do haly reaktoru unikl oxid uhličitý a proto, že je těžší než vzduch

zatopil spodní prostory reaktorovny. Tam se udusili dva pracovníci, kteří sice doběhli k nouzovému východu, ale ten byl uzamčen. Pracovníci elektrárny Viliam Pačes a Milan Antalík se vrátili do prostoru reaktoru vybaveni dýchacími přístroji a ochrannými obleky, ve kterém uzavřeli otevřený palivový kanál zpětným zajetím zavážecího stroje. Za tuto hrdinskou akci obdrželi v roce 1987 státní vyznamenání od Lubomíra Štrougala a 1. ledna 2008 obdrželi od prezidenta Ivana Gasparoviče vysoké státní vyznamenání. [58], [59]

Druhá havárie se stala 22. února 1977. Obsluha měnila bez přerušení provozu reaktoru palivové články. Při přípravě čerstvého článku si pracovníci všimli, že sáček se silikagelem, který se do článků vkládal jako absorbér vlhkosti při uskladňování, je roztržen a jeho obsah vysypán. Bohužel se jim nepodařilo všechen silikagel odstranit, a článek zůstal ucpán. Po zasunutí tohoto článku nemohlo chladící médium volně proudit a došlo k tavení tohoto článku. Dále se protavila stěna kanálku, ve kterém byl článek zasunut. Tím došlo k úniku těžké vody do primárního okruhu, který byl silně kontaminován. Nedostatek vody způsobil tavení dalších palivových článků. Důsledků netěsností parogenerátorů byl kontaminován i sekundární okruh. Právě tato havárie je na stupnici INES hodnocena stupněm 4. V roce 1990 kontrola zjistila, že v okolí elektrárny dosahuje radiace 20 násobku přirozené úrovně. Ve vrtech byla ve spodní vodě nalezena velká kontaminace radioaktivního tritia, až 11 000 000 Bq/l. Norma je pro pitnou vodu 700 Bq/l. [60]

V té době neměla většina obyvatel Československa tušení o existenci jaderné elektrárny Jaslovské Bohunice A-1. Většina se ani nedozvěděla o vzniklých nehodách. Skutečný rozsah nehody nebyl zveřejněn a ani v současné době nejsou známy detailní informace o jejím rozsahu.

6.3 Sellafield

V roce 2005 došlo k velkému úniku radioaktivního materiálu v tomto britském závodě. 19. dubna konkrétně v závodě společnosti Thorp prasklo potrubí s radioaktivním odpadem. Všech 83 000 litrů odpadu však vyteklo do nerezové ocelí lemované jímky a nedošlo tedy k úniku mimo elektrárnu. [61]

6.4 Tokaimura

V Japonském městě Tokaimura je závod na zpracování jaderného paliva (Obr. 17). V tomto závodě obohacují zhruba 3 tuny uranu na hodnotu 20% ^{235}U. Dne 30. září 1999 došlo k vážné havárii, která byla na stupnici INES hodnocena stupněm 4. Havárii způsobili tři pracovníci, kteří byli nedostatečně kvalifikováni pro tuto práci. Obvykle pracovali s 5% ^{235}U, ale tentokrát měli 18,8% ^{235}U. Do reaktoru s obsahem 40 litrů doplnili 16 kg tohoto paliva. Tím se odstartovala nekontrolovatelná řetězová reakce. Přestože nedošlo k výbuchu, z reaktoru se začalo šířit gama a neutronové záření. Tento proces trval 20 hodin, než se jej podařilo zastavit. [62]

Obr. 17: Závod Tokaimura [62]

Všichni tři pracovníci, kteří zapříčinili havárii, byli hospitalizováni, avšak dva zemřeli. Obdrželi dávky v rozmezí 1-20 mSv. Z důvodu havárie byli evakuováni lidé v okruhu 350 m od budovy elektrárny. V okruhu 10 km byli lidé nuceni zůstat ve svých domovech. Dále bylo ozářeno asi 436 lidí. U nikoho však dávka nepřesáhla 50 mSv. Asi 56 pracovníků dostalo dávku 23 mSv. Provoz elektrárny byl obnoven na začátku roku 2000. [62]

6.5 Fleurus

Belgie 2006. Zaměstnanec komerčního závodu pro ozařování byl vystaven vysokým radiačním dávkám a jeho zdraví bylo těžce poškozeno. [51]

7 Nehody třetího stupně

Zde se jedná o vážné havárie s velkým účinkem uvnitř zařízení, avšak s malým účinkem mimo něj. Nejznámější nehody, které do této kategorie spadají, jsou nehody ve španělském Vandellos a maďarském Paks.

7.1 Paks

V současnosti má tato maďarská jaderná elektrárna čtyři reaktory typu VVER-440/V-213. Jejich celkový výkon je 1 880 MW elektrických. První reaktor byl postaven v roce 1982. Poslední pak v roce 1987. Maďarsko získává z jaderné energie asi 43% elektřiny.

V této elektrárně se v roce 2001 poprvé testovalo použití chemicky vyčištěného paliva. V dubnu 2003 však došlo k nehodě, kdy na druhém reaktoru bylo použito toto palivo, které však bylo těžce poškozeno v čistící nádobě kvůli nedostatečnému chlazení. Došlo k uvolnění radioaktivních par do prostoru elektrárny. Reaktor byl zpět do provozu uveden po osmnácti měsících. Po této nehodě bylo omezeno čištění částečně použitého paliva. [64]

7.2 Vandellos

Dne 19. října 1989 došlo ve španělské jaderné elektrárně Vandellos k mechanické poruše v generátoru. Tato porucha zapříčinila zaplavení reaktoru mořskou vodou, požár a vyřazení některých bezpečnostních systémů. Provoz elektrárny byl obnoven 24. listopadu téhož roku. [65]

7.3 Ostatní nehody

Následkem zemětřesení a vlně tsunami došlo v japonské Fukušimě II z roku 2011 na 1., 2. a 4. bloku jaderné elektrárny k tomuto stupni nehody.

V roce 1999 dále došlo k popálení osoby z důvodu ozáření u radiografického zdroje. Toto se stalo v peruánském Yanangu.

Ve Spojených Státech Amerických došlo k nehodě v jaderné elektrárně Davis Besse-1, a to konkrétně v roce 2002.

V roce 1999 se ztratil vysoce radioaktivní zdroj ^{60}Co v tureckém Ikitelli. [51]

8 Nehody druhého stupně

Těchto nehod bylo několik. Mezi ty nejvýznamnější patří nehody v jaderných elektrárnách Forsmark, Wylfa, Mihama a českých Dukovanech.

8.1 Dukovany

Za dobu provozu této jaderné elektrárny byla pouze jedna událost, která musela být hodnocena druhým stupněm na stupnici INES. Do této kategorie však byla zařazena pouze díky pomocným kritériím hodnocení. Bohužel se mi nepodařilo k této události nalézt podrobnější informace. [66]

8.2 Forsmark

Dne 25. července 2006 došlo ve švédské jaderné elektrárně Forsmark ke zkratu vysokého napětí na vnějším vedení z elektrárny. Jelikož byl blok odpojen od sítě, automaticky se odstavil reaktor. Pokud je reaktor odstaven, je nutné jej chladit ze záložních zdrojů. Pro tuto situaci jsou připraveny čtyři dieselgenerátory. Přesto, že dva z nich nenajely, jsou zbylé dva schopny reaktor s velkou rezervou uchladit. Zbylé dva byly najety ručně o chvíli později. Kdyby nenaskočil jen jeden generátor, byla by nehoda hodnocena na stupnici INES stupněm 1. Podstatný je však způsob, jakým tuto nehodu projednávaly protijaderné organizace. Některé tvrdí, že elektrárna byla naprosto mimo kontrolu a hrozila havárie rozměrů Černobylu. [51], [67], [68]

8.3 Wylfa

V jaderné elektrárně Wylfa v Severním Walesu došlo 31. července roku 1999 při výměně palivových tyčí ke zlomení jeřábu, jenž tuto činnost obstarával. Část jeřábu spadla přímo do reaktoru, kde částečně ucpala chladící kanály. Tím se v reaktoru začal zvyšovat tlak. Přestože k nehodě došlo v 9 hodin večer, reaktor byl odstaven až ve 4 hodiny ráno. Společnost provozující elektrárnu tím hrubě porušila předpisy a podle oborníků jen těsně nedošlo k roztavení reaktoru. Původní hodnocení havárie bylo stupněm 0. Jaderná elektrárna má největší reaktor typu Magnox. Tento typ reaktoru je chlazený oxidem uhličitým a jeho konstrukce umožňuje výměnu paliva za provozu rektoru. Jako palivo je použit přírodní kovový uran. [69], [70]

8.4 Mihama

Mihama je japonská jaderná elektrárna, jejíž reaktor je tlakovodní. Dne 9. února 1991 praskla trubka v parním generátoru. Kvůli poklesu tlaku v reaktoru, byl reaktor automaticky odstaven a spustila se havarijní čerpadla. Trhlina měla velikost 2 cm^2 a uniklo jí zhruba 20 tun

radioaktivní, chladicí kapaliny. Tato kapalina protekla do sekundární části parního generátoru a kontaminovala čistou vodu v celém sekundárním okruhu. Havarijní systémy se zachovaly správně, operátoři neudělali žádnou chybu a po celou dobu byla nehoda plně pod kontrolu.[51], [63]

8.5 Ostatní nehody

V argentinské elektrárně Atucha v roce 2005 obdržel zaměstnanec dávku radiace, jejíž hodnota překročila povolenou roční dávku. [51]

V roce 1993 došlo k rozšíření radiace do míst, se kterými nepočítal původní projekt. Tato nehoda se stala ve francouzské elektrárně Cadarache. [51]

Ve Spojených Státech Amerických byl v roce 2005 ozářen pracovník radiografie. Množství radiace přesáhlo povolený roční limit pro pracovníky s radiací. [51]

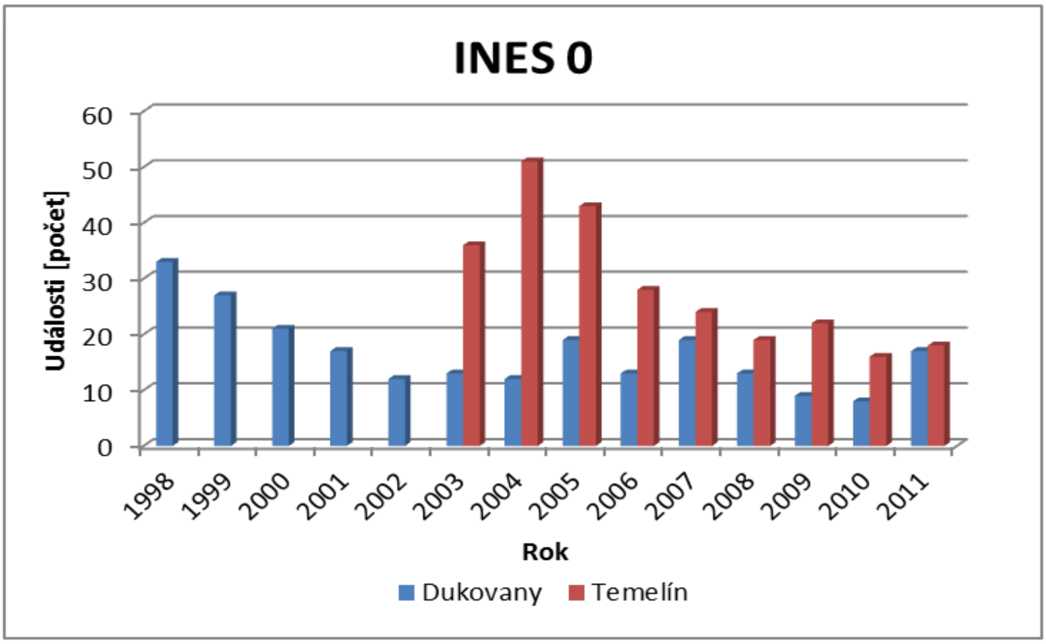
Ve Francii roku 1995 došlo k poruše systémů pro řízení na urychlovači částic. [51]

K nehodě došlo i v kanadské jaderné elektrárně Pickering A-B v roce 2003.

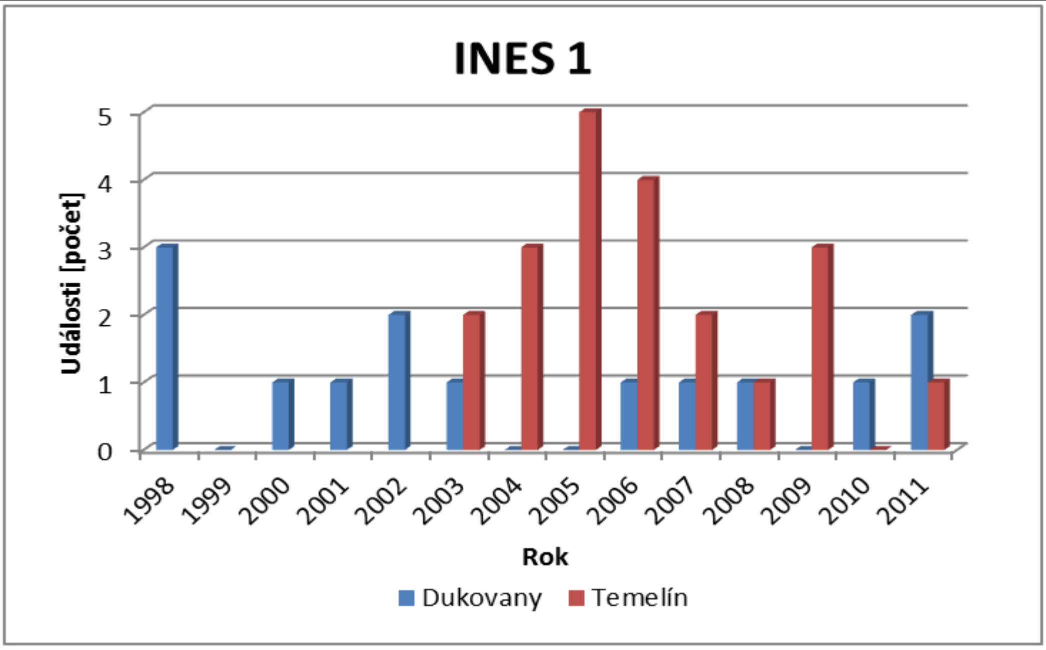
9 Nehody stupně nula a jedna

Těchto nehod, zvláště pak stupně 0 je velmi velký počet, jelikož na nich není nic neobvyklého. Celosvětově bude jejich počet obrovský, pravděpodobně v řádech tisíců. Z tohoto důvodu se zaměříme pouze na české elektrárny Temelín a Dukovany.

Počet významných událostí INES > 0 a událostí pod stupnicí INES = 0 je k dispozici v následujících grafech Graf 1 a Graf 2. V grafu jsou hodnoty od roku 1998 po rok 2011, a to jak pro jadernou elektrárnu Dukovany, tak od roku 2003, i pro Temelín. Od roku 2003 se změnil systém hlášení událostí Státnímu úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) a hlásí se i události, které nedosahují ani úrovně 0 na stupnici INES. Do těchto událostí jsou zahrnuty i události stupně 0 a 1. Jejich počet zhruba odpovídá čtyřnásobku ostatních událostí. Do grafu však nebyly zahrnuty. V těchto statistikách však musíme brát v potaz, že od dob hlášení událostí byla jaderná elektrárna Dukovany již více než deset let v provozu. Kdežto elektrárna Temelín je ve svém zkušebním provozu. [73]



Graf 1: Počet nehod INES 0 [73]



Graf 2: Počet nehod INES 1 [73]

9.1 Dukovany

Výstavba nejstarší české jaderné elektrárny Dukovany započala v roce 1978. První reaktorový blok byl spuštěn v roce 1985. Druhý a třetí blok byly spuštěny ve stejném roce 1986. Čtvrtý blok pak v roce 1987. Během let 2005-2012 proběhla modernizace, a díky tomu má dnes elektrárna 4 reaktory typu VVER 440 o celkovém výkonu 4 x 510 MW, místo původních 440 MW. Od spuštění prvního bloku v roce 1985 do jara roku 2012 elektrárna vyrobila celkově 350 miliard kWh energie. Svou produkcí Dukovany pokrývají asi 20% spotřeby elektřiny v České republice. [71]

V roce 2011 byl stupněm 1 v INES hodnocen pokles hladiny vody v hydroakumulátoru na dobu 8 hodin. Dále pak nefunkčnost čerpadla způsobená jeho zavzdušněním. V roce 2010 byl jednou automaticky odstaven reaktor, kvůli chybě lidského faktoru. V roce 2008 došlo k zavření hlavní uzavírací armatury na bloku číslo 2 kvůli chybě obsluhy. V roce 2007 Při odstavování třetího reaktorového bloku došlo ke krátkodobému zvýšení záporné reaktivity. V roce 2006 došlo kvůli zkratu k výpadku několika linek 400 kV. V roce 2003 byl neplánovaně rychle odstaven jeden reaktor. [73]

9.2 Temelín

Druhá jaderná elektrárna v České republice, Temelín, leží 24 km od Českých Budějovic a 5 km od Týna nad Vltavou. Stavba elektrárny byla zahájena v únoru 1987. V plánu byla výstavba 4 reaktorů VVER 1000 typu V 320. Avšak polické změny na počátku devadesátých let zapříčinily zrušení výstavby dvou bloků. 10. června 2002 byl zahájen provoz prvního bloku a 18. dubna 2003 i provoz druhého bloku. Současný výkon elektrárny je 2 x 1000 MW.

[71]

V roce 2011 došlo k rychlému neplánovanému odstavení reaktoru. V roce 2009 byl třikrát odstaven první reaktor. Jednou automaticky, když došlo k výpadku turbonapáječek. Dvakrát pak manuálně po neřízeném zasouvání klastrů. V roce 2008 byl odstaven 2. blok při snížení průtoku v turbonapáječce. V roce 2007 byl dvakrát odpojen 1. blok kvůli výpadku hlavního cirkulačního čerpadla. V roce 2006 došlo k rychlému odstavení reaktorů 1 i 2. Dále dvakrát zapůsobila ochrana limitačního systému při najíždění bloků. V roce 2005 při najíždění 2. bloku došlo chybou špatného softwaru k neoprávněnému zapnutí bezpečnostních čerpadel. Na prvním bloku došlo k neplánované odstávce vlivem výměny elektromagnetu na cirkulačním čerpadlu. V roce 2004 došlo ke třem neplánovaným rychlým odstavením reaktoru a to na 2. bloku. V roce 2003 nebyly události komentovány, z důvodu zkušebního provozu reaktorů. [73]

10 Závěr

Jaderná energetika v současné době straší mnoho lidí. Obavy z další jaderné havárie se šíří celým světem. Lidé se ptají, která elektrárna zhavaruje příště? Tato panika je velkou měrou způsobena díky médiím. Během poslední havárie ve Fukušimě nám média stále servírovala informace o tom, jak se šíří radiace, kolik lidí kvůli ní muselo být evakuováno a kolik že tato havárie bude vůbec stát. Přitom samotné zemětřesení a vlna tsunami měla za následek desetitisíce mrtvých lidí, tisíce zničených domů. A kolik jich měla na svědomí radiace z Fukušimy? Odpověď je žádné. To jen neviditelný strašák jménem radiace způsobuje hrůzu v lidských srdcích. Neboť čemu nerozumíme, toho se bojíme.

V historii jaderné energetiky bylo několik havárií, a i přes všemožná opatření si jen blázen myslí, že žádná další nebude. Otázkou však zůstává, co s touto informací budeme dělat. Možnosti máme pouze dvě. Buď budeme dále rozvíjet jadernou energetiku a smíříme se s výhodami i nevýhodami, které si tento směr nese. Nebo budeme prosazovat „zelenější“ energii. Jiná možnost v budoucnu není. Zásoby fosilních paliv nejsou neomezené a vystačí na pár desetiletí. Pokud si do té doby nevybereme, skončíme přinejlepším jen po tmě. Druhou cestu si zvolil náš západní soused Německo. Zavřel jaderné elektrárny a svůj zrak ubírá ke slunci a větru. Tím si však zadělává na problému, neboť sluneční a větrná energie je nestálá a závisí na počasí. V ideálních podmínkách budou mít energie velkou nadprodukci, což jednak může shodit jejich již tak dost bídnou energetickou síť, nebo to může přinést ekonomické problémy, neboť se energie bude prodávat za minimální cenu a některé elektrárny mohou být odpojeny. Protikladem je špatné počasí, kdy energie bude nedostatek. Dalším zdrojem energie se mohou stát vodní elektrárny, které mají zastoupení například v Norsku. Ale i tyto elektrárny mají nevýhody. Není možné je postavit kdekoliv, velkým nebezpečím je možnost protržení hrází. Tyto nehody již mají za následek snad více obětí než radiace po jaderných haváriích.

Některé země si však mezi zdroji energie nemohou příliš vybírat. Příkladem je Japonsko, které si nemůže dovolit zastavit velké plochy solárními panely. Navíc již v současnosti nedisponuje velkým množstvím fosilních paliv. A proto, ač se to mnohým Japoncům nelíbí, bude muset jejich země v jaderné energetice pokračovat.

V současnosti má Česká republika vyčerpány kapacity pro výstavbu velkých vodních elektráren. Pro větrné elektrárny nemáme tak výborné podmínky jaké jsou například na severu Německa. Obdobně to platí i pro sluneční elektrárny. Tepelné elektrárny pravděpodobně zaznamenají menší boom, díky přebytkům uhlí z USA, avšak její negativní vliv na životní prostředí je nepopiratelný. Z těchto důvodů jaderná energetika nezbytnou součástí naší budoucnosti. Po prostudování jaderných nehod a havárií musíme dojít k závěru, že za nimi stojí především chyba člověka. Někdy jde o chybu pouhého pracovníka, ale mnohdy k haváriím dochází kvůli porušování předpisů ze strany velkých korporací, kterým jde především o zisk a bezpečnost je pro ně druhořadá. Naštěstí se tato situace zlepšuje díky přísnějším pravidlům. Jaderné elektrárny se stále vyvíjí a jsou neustále bezpečnější. Všechny dostupné zdroje energie mají své výhody a nevýhody a nejlepší možností je jejich kombinace.

Literatura

[1] ČEZ. Jaderná bezpečnost. In: *ČEZ* [online]. © 2013 ČEZ, a.s. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: http://www.cez.cz/cs/odpovedna-firma/bezpecnost/jaderna-bezpecnost.html

[2] ADMIN. Dozimetrické jednotky a jejich použití. In: *Atominfo.cz* [online]. © 2012. Vloženo 8. 5. 2012 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z:http://atominfo.cz/2012/05/sievert-becquerel-rentgen-jak-merime-radioaktivitu/

[3] SLABÁ, Jana. Radioaktivní látky a jejich působení. [prezentace]. Vytvořeno 9.11.2006 [cit. 2013-05-17]

[4] Historie objevu jaderné energie. In: *history.webgarden.cz* [online]. [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: http://history.webgarden.cz/rubriky/historie-objevu-jaderne-energie

[5] MATAL, Oldřich. *Jaderná zařízení a jejich bezpečnost*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 174 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 978-80-214-4349-5.

[6] SÚJB. *SÚJB Dnes*. [online].[cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.sujb.cz/o-sujb/15-let-sujb/sujb-dnes/

[7] Vyhláška č. 144/1997 Sb. Ze dne 19. Června 1997, o fyzické ochraně jaderných materiálů a jaderných zařízení a o jejich zařazování do jednotlivých kategorií. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/144_97.pdf

[8] Vyhláška č. 214/1997 Sb. Ze dne 15. srpna 1997, o zabezpečení jakosti při činnostech souvisejících s využíváním jaderné energie a činnostech vedoucích k ozáření a o stanovení kritérií pro zařazení a rozdělení vybraných zařízení do bezpečnostních tříd. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/214_97.pdf

[9] Vyhláška č. 215/1997 Sb. Ze dne 15. srpna 1997, o kritériích pro umisťování jaderných zařízení a velmi významných zdrojů ionizujícího záření. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/215_97.pdf

[10] Vyhláška č. 195/1999 Sb. Ze dne 21. října 1999, o požadavcích na jaderná zařízení k zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany a havarijní připravenosti. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/195_99.pdf

[11] Vyhláška č. 106/1998 Sb. Ze dne 20. dubna 1998, o zajištění jaderné bezpečnosti a radiační ochrany jaderných zařízení při jejich uvádění do provozu a při jejich provozu. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/106_98.pdf

[12] Vyhláška č. 185/2003 Sb. Ze dne 3. června 2003, o vyřazování jaderného zařízení nebo pracoviště III. nebo IV. kategorie z provozu. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/v185_03.pdf

[13] Vyhláška č. 317/2002 Sb. Ze dne 13. června 2002, o typovém schvalování obalových souborů pro přepravu, skladování a ukládání jaderných materiálů a radioaktivních látek, o typovém schvalování zdrojů ionizujícího záření a o přepravě jaderných materiálů a určených radioaktivních látek (o typovém schvalování a přepravě). [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/v317_02.pdf

[14] Nařízení vlády č. 11/1999 Sb. Ze dne 9. prosince 1998, o zóně havarijního plánování. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/ NV11_1999Sb.pdf

[15] Nařízení vlády č. 416/2002 Sb. Ze dne 28. srpna 2002, o výši odvodu a způsobu jeho placení původci radioaktivních odpadů na jaderný účet a roční výše příspěvku obcím a pravidla jeho poskytování. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/ ostatni-predpisy-a-arizeni/NV_416_2002_20120103.pdf

[16] IAEA, OECD/NEA, 2001. *INES.* Mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí Uživatelská příručka. Přeložil SÚJB. 85 s. Dostupné z: http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/INES.pdf
[17] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants, No. 75-INSAG-12, (Rev. 1), IAEA, Vienna (1999). Dostupné z: http://www.iaea.org/ns/tutorials/regcontrol/refs/7basicsafe.pdf
[18] HANUS, Václav. Britové chtějí změnit stupnici mimořádných jaderných událostí INES. In: *Atominfo.cz* [online]. © 2012. Vloženo 12.8.2012 [cit. 2013-05-04].
Dostupné z: http://atominfo.cz/2012/08/britove-chteji-zmenit-stupnici-mimoradnych-jadernych-udalosti-ines/
[19] *Černobylská havárie.* [online]. Poslední aktualizace 1.5.2013 16:14 [cit. 2013-05-04], Wikipedie. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cernobylsk%C3%A1_hav%C3%A1rie
[20] *Černobyl vznik a průběh havárie.* In: *Ecn.cz* [online].[cit. 2013-05-04].
Dostupné z: http://www.ecn.cz/ #ENV/Temelin/c11/PRUBEH.HTM
[21] KOSTKA, Tomáš. Černobylský experiment a průběh havárie. In: *ChernobylZone.cz* [online]. © 2012–2013. Vloženo 21. 11. 2012 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://chernobylzone.cz/cernobylsky-experiment-a-prubeh-havarie/
[22] *Byla havárie jaderné elektrárny nevyhnutelná.* In: *Černobyl Havárie* [online]. © 2006. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.cernobyl-havarie.cz/havarie-jaderne-elektrarny.html
[23] Atomová elektrárna Černobyl. In: *Pravda.cz* [online]. Aktualizace 10. 4. 2005 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.pavrda.cz/cernobyl/reaktor.html
[24] BERÁNEK, Jan. Havárie Černobylu. In: *Wise.cz* [online]. © 2004–2005 Wise Brno. Vloženo 22. 4. 2006 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.wisebrno.cz/index.php?p=clanek&id=138
[25] Dědictví Černobylu: zdravotní, ekologické a sociálně ekonomické dopady: a, Doporučení vládám Běloruska, Ruské federace a Ukrajiny. 1. vyd. Praha: Česká nukleární společnost, 2006, 51 s. ISBN 80-020-1806-0.
Dostupné z: http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/cernobyl/Cernobyl_CZ.pdf
[26] ŠVEC, Michael. Radioaktivní černobylský reaktor má pohřbít nový sarkofág. In: *Novinky.z* [online]. © 2012–2013 Borgins, a.s. © 2013 Seznam.cz, a.s. Vloženo 26.4.2012 14:53 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z:http://www.novinky.cz/ekonomika/265976-radioaktivni-cernobylsky-reaktor-ma-pohrbit-novy-sarkofag.html
[27] Vteřiny před katastrofou, Černobyl [Seconds From Disaster, Meltdown in Chernobyl] [dokumentární film]. Režie Luke CAMPBELL. Velká Británie, 2004.
Dostupné z: http://www.youtube.com/watch?v=cmLECGf9fE8
[28] PORKÁT, Václav. 1986 Tragická havárie v jaderné elektrárně Černobyl. In: *Požáry.cz* [online]. Vloženo 25. 4. 2011. Aktualizováno 26.4.2012 13:35 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.pozary.cz/clanek/6299-1986-tragicka-havarie-v-jaderne-elektrarne-cernobyl/
[29] REKACEWICZ, Phillipe. Radiation from Chernobyl. In: *Grid.no* [online]. © 2013 GRID-Arendal [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.grida.no/graphicslib/detail/radiation-from-chernobyl_7925
[30] *Jaderná elektrárna Fukušima I* [online]. Poslední aktualizace 4.4.2013 23:07 [cit. 2013-05-04], Wikipedie. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_elektr%C3%A1rna_Fuku%C5%A1ima_I
[31] NEJEDLÝ, Petr. Zemětřesení v Japonsku a jaderná elektrárna Fukušima. In: *blog.idnes.cz* [online]. © 1999–2013 MAFRA a.s. Vloženo 13.3.2011 10:47 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://nejedly.blog.idnes.cz/c/181735/Zemetreseni-v-Japonsku-a-jaderna-elektrarna-Fukusima.html
[32] SÚJB. *Vznik a vývoj havárie na jaderné elektrárny Fukušima Dai-ichi.* [online].[cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/aktualne/Fukusima/Vznikhavarie.pdf

[33] WAGNER, Vladimír. Rok a půl po havárii v Jaderné elektrárně ve Fukušimě I. In: E*nergetický klub* [online]. © 2012. Vloženo 7. 9. 2012. Aktualizováno 8. 10. 2012 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.energetickyklub.cz/2012/09/rok-a-pul-po-havarii-v-jaderne-elektrarne-ve-fukusime-i/

[34] NEJEDLÝ, Petr. Japonsko Zemětřesení a jaderná elektrárna Fukušima. In: *Neviditelný pes* [online]. Vloženo 27. 3. 2011 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://neviditelnypes.lidovky.cz/japonsko-zemetreseni-a-je-fukusima-2-dbs-/p_zahranici.asp?c=A110328_111618_p_zahranici_wag

[35] STEJSKAL, Jan. Fukušima za jadernou havárii mohou lidé, rozhodla vyšetřovací komise. In: *Ekolist.cz* [online]. Vloženo 11.7.2012 08:26 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/fukusima-za-jadernou-havarii-mohou-lide-rozhodla-vysetrovaci-komise

[36] Testy jaderných elektráren mají být podle expertů šité na míru. In: *EurActiv.cz* [online]. © 2004-2013. EU-Media, s.r.o. Vloženo 4.10.2012 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.euractiv.cz/energetika/clanek/testy-jadernych-elektraren-maji-byt-podle-expertu-site-na-miru-stress-testy-temelin-dukovany-jadro-kuba-eu-010288

[37] *Majak* [online]. Poslední aktualizace 10.3.2013 15:28 [cit. 2013-05-04], Wikipedie. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Majak

[38] ČULÍK, Jan. V Rusku byla odvrácena jaderná havárie. In: *Britské listy* [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.britskelisty.cz/0009/20000918d.html

[39] ADMIN. Sovětská jaderná havárie před 55 lety zamořila na 1000 kilometrů čtverečných. In: *AtomInfo* [online]. © 2012. Vloženo 29. 9. 2012 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://atominfo.cz/ 2012/09/sovetska-jaderna-havarie-pred-55-lety-zamorila-na-1000-kilometru-ctverecnich/

[40] MORAVEC, Zdeněk. V sovětském závodu Majak došlo k explozi a úniku radioaktivního materiálu. In: *Neaktuality.cz* [online]. © Copyright 2009–2012, ATLANET media s.r.o. Vloženo 29.9.2010 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.neaktuality.cz/zahranici/v-sovetskem-zavodu-majak-doslo-k-explozi-a-uniku-radioaktivniho-materialu/

[41] ADMIN. Majak. In: *The Red News* [online]. Vloženo 10. 3. 2012 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.halolevice.cz/archives/38484

[42] RIEKE Jan. Map of the East Urals Radioactive Trace. In: Wikipedie [online].[cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://sk.wikipedia.org/wiki/Súbor:Ostural-Spur.png

[43] *Havárie Jaderných elektráren*. In: *Energyweb.cz* [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=3.7.7

[44] *Jaderná elektrárna Three Mile Isnad* [online]. Poslední aktualizace 5.4.2013 06:05 [cit. 2013-05-04], Wikipedie. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/jadern%C3%A1_elektr%C3%A1rna_Three_Mile_Island

[45] *Elektrárna Three Mile Island musel kvůli závadě odpojit reaktor*. In: *Ekolist.cz* [online]. Vloženo 21.9.2012 10:28 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/elektrarna-three-mile-island-musela-kvuli-zavade-odpojit-reaktor

[46] *Tlakovodní reaktor* [online]. Poslední aktualizace 11.3.2013 12:35 [cit. 2013-05-04], Wikipedie. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Tlakovodní_reaktor

[47] *Three Mile Island 1979 největší jaderná havárie na západě*. In: *Radioaktivita.cz* [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://radioaktivita.cz.sweb.cz/mileisland.htm

[48] *Sellafield*. In: *cs.advisor.travel* [online]. © 2007–2013 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://cs.advisor.travel/ poi/6572

[49] *Katastrofy jaderných elektráren*. In: *Můj svět* [online]. © 2012 eStránky.cz. Vloženo 10. 12. 2008 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.kopejtko.estranky.cz/clanky/r-e-f-e-r-a-t-y/katastrofy-jadernych-elektraren.html

[50] *Havárie v jaderných zařízeních*. In: *Černobyl.euweb.cz* [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://cernobyl.euweb.cz/Havarie.html

[51] ČNS. Jaderná energetika v ČR. In: *ČEZ.cz* [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/file/energie-a-zivotni-prostredi/stupnice-ines.pdf
[52] HUDEĚK, Pavel. Zářič v rozvojové zemi. In: *Osel.cz* [online]. Vloženo 21.7.2012 14:26 [cit. 2013-05-04].
Dostupné z: http://www.osel.cz/index.php?obsah=6&akce=showall&clanek=6377&id_c=118016
[53] PROUZA, Zdeněk. Radiační nehody mimo pracoviště se zdroji ionizujícího záření. In: *BozpProfi.cz* [online]. © 1997–2013. Vloženo 12. 2. 2009 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.bozpprofi.cz/?cid=208109&uid=&e=&cid=208109&uid=&e=&cid=208109&area=284&sekce=5&uroven=0&obsah=0&wa=
[54] *Goiania accident* [online]. Poslední aktualizace 3.4.2013 14:12 [cit. 2013-05-04], Wikipedie. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Goiânia_accident
[55] *Saint-Laurent Nuclear Power Plant* [online]. Poslední aktualizace 1.5.2013 13:45 [cit. 2013-05-04], Wikipedie. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Saint-Laurent_Nuclear_Power_Plant
[56] *Jaderná elektrárna Jaslovské Bohunice* [online]. Poslední aktualizace 16.3.2013 18:50 [cit. 2013-05-04], Wikipedie. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_elektr%C3%A1rna_Jaslovsk%C3%A9_Bohunice
[57] TŘEČEK, Čeněk. Jaderná elektrárna v Jaslovských Bohunicích se začala vypínat. In: *Idnes.cz* [online]. © 1999–2013 MAFRA, a.s. Vloženo 31.12.2008 15:35 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://ekonomika.idnes.cz/jaderna-elektrarna-v-jaslovskych-bohunicich-se-zacala-vypinat-pba-/eko-zahranicni.aspx?c=A081231_153549_eko-zahranicni_cen
[58] HEZOUČKÝ, František. Jaslovským Bohunicím černobylská katastrofa nehrozila. In: *Novinky.cz* [online]. © 2003–2013 Borgins, a.s. © 2013 Seznam.cz, a.s. Vloženo 11.1.2008 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.novinky.cz/zahranicni/evropa/130496-hezoucky-jaslovskym-bohunicim-cernobylska-katastrofa-nehrozila.html
[59] *Havárie elektrárny Jaslovké Bohunice A-1* [online]. Poslední aktualizace 27.4.2013 02:37 [cit. 2013-05-04], Wikipedie.
Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/ Havárie_elektrárny_Jaslovské_Bohunice_A-1
[60] Jaslovské Bohunice 1977 největší jaderná havárie v Československu. In: *Radioaktivita.cz* [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://radioaktivita.cz.sweb.cz/bohunice.htm
[61] *Sellafield* [online]. Poslední aktualizace 24.4.2013 00:26 [cit. 2013-05-04], Wikipedie. Dostupné z:http://en.wikipedia.org/wiki/Sellafield
[62] SHIMBUN, Yomiuri. Tokaimura Criticaly Accident. In: *World Nucelar Association* [online]. © 2013 World Nuclear Association. Vloženo 7.2007 [cit. 2013-05-018].
Dostupné z: http://www.world-nuclear.org/info/Safety-and-Security/Safety-of-Plants/Tokaimura-Criticality-Accident/#.UZfCwD53e84
[63] ČNS. Mezinárodní stupnice pro hodnocení jaderných událostí. In: *ČEZ* [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/stupnice.pdf
[64] WNA. Nuclear Power in Hungary. In: *World Nucelar Association* [online]. © 2013 World Nuclear Association. Upraveno 12.2007 [cit. 2013-05-018]. Dostupné z: http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-G-N/Hungary/#.UZfTzz53e84
[65] *Accident I nuclear power plant.* In: *Nuclear energy* [online]. [cit. 2013-05-04].
Dostupné z: http://ofnuclearenergy.com/ nuclear-accidents/vandellos-i.html
[66] SÚJB. Neuskutečněný Hyde park ČT 24 z 26.4.2011 k výročí černobylské havárie, odpovědi na otázky J. Veselého. In: *sujb.cz* [online]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z:http://www.sujb.cz/styk-s-verejnosti/neuskutecneny-hyde-park-ct-24-z-2642011-k-vyroci-cernobylske-havarie-odpovedi-na-dotazy-na-jveseleho/
[67] BURKET, Daneš. Zbytečná hysterie kolem Forsmarku. In: Č*eská nukleární společnost* [online]. 2006 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.csvts.cz/cns/news06/060817b.htm
[68] *Jaderné havárie*. In: *Greenpeace* [online]. © 2011. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.greenpeace.org/czech/cz/Kampan/klima_a_energetika/jaderna-energetika/jaderne-havarie/

[69] BERÁNEK, V. Jan. Havárie ve Velké Británii málem skončila roztavením reaktoru. In: *ecn.cz* [online]. 1995 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.ecn.cz/ENV/Temelin/noviny/6.cislo/jader.el6.html
[70] MOTYČKA, Vojtěch a ČERMÁK, Martin. GCR, Magnox. In: *Jaderné informace* [online]. Vloženo 10. 11. 2011 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://jaderneinfo.webnode.cz/news/gcr-magnox/
[71] ČEZ. Historie a současnost EDU. In: *ČEZ* [online]. © 2013 ČEZ, a.s. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/edu/historie-a-soucasnost.html
[72] ČEZ. Historie a současnost Elektrárny Temelín. In: *ČEZ* [online]. © 2013 ČEZ, a.s. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete/historie-a-soucasnost.html
[73] SÚJB. Hodnocení provozně-bezpečnostních ukazatelů. In: *sujb.cz* [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/hodnoceni-jaderne-bezpecnosti/

Seznam zkratek

ABWR	Advanced Boiling Water Reactor
ARS	akutní nemoc z ozáření
BWR	Typ reaktoru
ČNS	Česká nukleární společnost
ČR	Česká republika
ČSKAE	Československá komise pro atomovou energii
IAEA	International Atomic Energy Agency
INES	The International Nuclear Event Scale
INSAG	Mezinárodní poradní skupina k jaderné bezpečnosti
KS-150	Typ jaderného reaktoru v Jaslovkých Bohunicích
LaP	limity a podmínky
MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
NEA	Agentura pro jadernou energii
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PWR	Typ reaktoru
RBMK-1000	Typ jaderného reaktoru v Černobylu
SSSR	Svaz sovětských socialistických republik
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
TNT	Trinitrotoluen
USA	United States of America
VVER	Typ reaktoru
WANO	World Association of Nuclear Operators

Seznam veličin

A	[Bq]	radioaktivita
A	[Ci]	radioaktivita
D	[Gy]	absorbovaná dávka
H	[rem]	dávkový ekvivalent
H	[Sv]	dávkový ekvivalent
l	[m]	délka
m	[kg]	hmotnost
P	[W]	výkon
T	[K]	teplota
U	[V]	napětí

Seznam tabulek

Tab. 1: Stupnice INES [16] 7
Tab. 2: Charakteristika stupňů [16] 8
Tab. 3: Parametry reaktoru RBMK 1000 [24] 14
Tab. 4: Reaktory ve Fukušimě [30] 20

Seznam obrázků

Obr. 1: Reaktor RBMK [24] 15
Obr. 2: Elektrárna Černobyl [29] 17
Obr. 3: Radiace z Černobylu [29] 18
Obr. 4: Nový sarkofág Černobylu [26] 20
Obr. 5: Fukušimský reaktor [33] 21
Obr. 6: Místo zemětřesení v Japonsku [31] 22
Obr. 7: Ochranný val Fukušimy I [33] 23
Obr. 8: Elektrárna Fukušima [35] 24
Obr. 9: Místa explozí v elektrárně [31] 25
Obr. 10: Východouralská radiační stopa [42] 28
Obr. 11: Three Mile Island [45] 29
Obr. 12: Schéma tlakovodního reaktoru [46] 30
Obr. 13: Sellafield [48] 31
Obr. 14: Elektrárna Saint-Laurent [55] 33
Obr. 15: Elektrárna Jaslovské Bohunice [57] 35
Obr. 16: Poloha Jaslovských Bohunic [56] 35
Obr. 17: Závod Tokaimura [62] 37

Seznam grafů

Graf 1: Počet nehod INES 0 [73] 41
Graf 2: Počet nehod INES 1 [73] 42