Havárie při mírovém využití jaderné energie

Bc. Roman Čada

Diplomová práce
2024

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta logistiky a krizového řízení

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta logistiky a krizového řízení
Ústav ochrany obyvatelstva

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Bc. Roman Čada**
Osobní číslo:	**L22358**
Studijní program:	**N1032A020002 Bezpečnost společnosti**
Specializace:	**Ochrana obyvatelstva**
Forma studia:	**Kombinovaná**
Téma práce:	**Havárie při mírovém využití jaderné energie**

Zásady pro vypracování

1. Na základě studia odborné literatury vymezte terminologii a teoretická východiska související s využitím jaderné energie a jejími haváriemi.
2. Charakterizujte oblast využití jaderné energie na národní i globální úrovni.
3. Sestavte přehled jaderných havárií, a jejich následků.
4. Analyzujte havárie při mírovém využití jaderné energie, vyhodnoťte jejich dopady a navrhněte možná opatření.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. HIGGINBOTHAM, Adam. *Midnight in Chernobyl: The Untold Story of the World's Greatest Nuclear Diaster.* New York: Simon and Schuster, 2020. ISBN 978-1-5011-3463-0.
2. PLOKHY, Serhii. *Černobyl: historie jaderné katastrofy.* Brno: Jota, 2019. ISBN 978-80-7565-462-5.
3. WAGNER, Vladimír. *Fukušima I poté.* Praha: Novela bohemica, 2015. ISBN 978-80-87683-45-3.

Další odborná literatura dle doporučení vedoucího diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jaromír Novák, CSc.**
Ústav krizového řízení

Datum zadání diplomové práce: **1. prosince 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. dubna 2024**

L.S.

doc. Ing. Zuzana Tučková, Ph.D.
děkanka

prof. Ing. Dušan Vičar, CSc.
ředitel ústavu

V Uherském Hradišti dne 4. prosince 2023

PROHLÁŠENÍ AUTORA
DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

V Uherském Hradišti, dne: 26. 4. 2024

Jméno a příjmení studenta: Bc. Roman Čada

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá klíčovými aspekty spojenými s haváriemi při mírovém využití jaderné energie. V první části práce je vymezena terminologie a teoretická východiska související s využitím jaderné energie a jejími haváriemi. Dále je charakterizována oblast využití jaderné energie na národní i globální úrovni. Klíčovou částí práce je sestavení přehledu jaderných havárií, a provedení analýzy jejich příčin a následků.

Výsledkem práce je návrh opatření, které mají za úkol předcházet haváriím, návrh opatření, které snižují dopady již nastalých havárií a návrh opatření proti zatajování havárií.

K dosažení výsledků byly v práci použity výzkumné metody kvantitativní, kvalitativní a PESTLE analýzy, a dále pak metody syntézy a indukce.

Klíčová slova: jaderná energetika, jaderná bezpečnost, jaderná havárie, příčiny havárií, dopady havárií, zatajování havárií

ABSTRACT

The thesis deals with key aspects related to accidents in peaceful uses of nuclear energy. The first part of my thesis defines the terminology and theoretical background related to the use of nuclear energy and its accidents. Then, the field of nuclear energy use is characterized at the national and global level. The key part of my thesis is to compile an overview of nuclear accidents, and to conduct an analysis of their causes and consequences.

As a result, the thesis proposes measures to prevent accidents, measures to reduce the impact of accidents that have already occurred, and measures to prevent the concealment of accidents.

To achieve the results, the thesis used research methods of quantitative, qualitative and PESTLE analysis, as well as methods of synthesis and induction.

Keywords: nuclear energy, nuclear safety, nuclear accidents, causes of accidents, impacts of accidents, concealment of accidents

„Když zatroubil třetí anděl, spadla z nebe veliká hvězda hořící jako pochodeň a padla na třetinu řek a na prameny vod.

Jméno té hvězdy je Pelyněk. Třetina vod se tehdy obrátila v pelyněk a mnoho lidí kvůli těm vodám zemřelo, neboť zhořkly.“

8.10-11, Zjevení Janovo, Bible

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu doc. Ing. Jaromíru Novákovi, CSc., vedoucímu mé diplomové práce, za jeho pomoc, trpělivost a odborné rady, které mi byly velkou pomocí při psaní této práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD **9**
CÍL PRÁCE A POUŽITÉ METODY **10**
I TEORETICKÁ ČÁST **12**
1 VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ **13**
1.1.1 Radioaktivní záření 13
1.1.2 Fyzikální jednotky a převody mezi nimi 13
1.1.3 Účinky ionizujícího záření 14
1.1.4 Poločas rozpadu 14
1.2 JADERNÁ ENERGETIKA 15
1.2.1 Jaderná elektrárna 15
1.2.2 Generace reaktorů 17
1.3 JADERNÁ ENERGETIKA VE SVĚTĚ 18
1.4 JADERNÁ ENERGETIKA V ČESKÉ REPUBLICE 21
1.5 HAVÁRIE 22
1.5.1 Radiační mimořádná událost 22
1.5.2 Radiační nehoda 23
1.5.3 Radiační havárie 23
1.5.4 Projektová nehoda 23
1.5.5 Nadprojektová nehoda 23
1.5.6 Těžká havárie 23
1.5.7 Poškození aktivní zóny 23
1.5.8 Předcházení haváriím 24
1.5.10 Dopady jaderných havárií 24
1.6 INES 26
2 LITERÁRNÍ REŠERŠE **28**
3 DÍLČÍ ZÁVĚR **34**
II PRAKTICKÁ ČÁST **35**
4 KVANTITATIVNÍ ANALÝZA UDÁLOSTÍ V DATABÁZI INES **36**
4.1 ZHODNOCENÍ 40
5 KVALITATIVNÍ ANALÝZA VYBRANÝCH ZÁVAŽNÝCH HAVÁRIÍ **41**
5.1 VYBRANÉ ZÁVAŽNÉ HAVÁRIE 41
5.1.1 Chalk River Laboratories 41
5.1.2 Komplex Maják Kyštym 42
5.1.3 Chalk River Laboratories 45
5.1.4 Institutu Borise Kidrica Vinča 46
5.1.5 Brown Ferry 47
5.1.6 Jaslovské Bohunice 48
5.1.7 Jaslovské Bohunice 50
5.1.8 Brunsbüttel 51
5.1.9 Three Mile Island 52

5.1.10 Rancho Seco 58
5.1.11 Tsugura 59
5.1.12 Černobyl 59
5.1.13 Tomsk (Seversk) 76
5.1.14 Tokaimura 78
5.1.15 Paks 79
5.1.16 Paks 80
5.1.17 Fukušima 80
5.2 ANALÝZA PŘÍČIN HAVÁRIÍ 92
5.2.1 Lidská chyba 92
5.2.2 Konstrukční vada 93
5.2.3 Technická závada 93
5.2.4 Neznámé příčiny 93
5.2.5 Zatajování a zamlčování 93
5.3 ANALÝZA DOPADŮ HAVÁRIÍ 94
5.3.1 Politické dopady 94
5.3.2 Ekonomické dopady 94
5.3.3 Sociálně-kulturní dopady 95
5.3.4 Technologické dopady 95
5.3.5 Právní dopady 95
5.3.6 Ekologické dopady 95
5.4 ZHODNOCENÍ 96
6 NÁVRHY NA OPATŘENÍ 98
6.1 LIDSKÁ CHYBA 98
6.1.1 Opatření proti lidským chybám 98
6.2 KONSTRUKČNÍ VADA 99
6.2.1 Opatření proti konstrukčním vadám pro provozovaná jaderná zařízení 100
6.2.2 Opatření proti konstrukčním vadám pro připravovaná jaderná zařízení 101
6.3 TECHNICKÁ ZÁVADA 102
6.3.1 Opatření proti technickým závadám 102
6.4 ZATAJOVÁNÍ A ZAMLČOVÁNÍ 103
6.4.1 Opatření proti zatajování a zamlčování 103
ZÁVĚR 105
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 109
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 114
SEZNAM OBRÁZKŮ 115
SEZNAM PŘÍLOH 116

ÚVOD

Jaderná energetika je jedním z nejspornějších a nejdiskutovanějších témat v oblasti energetiky a životního prostředí. Zatímco přináší jisté výhody v podobě výkonného způsobu výroby elektřiny, nese s sebou i značné riziko pro lidskou bezpečnost a životní prostředí. Toto riziko bylo dostatečně demonstrováno řadou havárií, které se odehrály v historii jaderné energetiky. Nejhorší, a zároveň nejznámější byly havárie v Černobylu v roce 1986 a ve Fukušimě v roce 2011.

Možnost havárie v jaderném zařízení je stále sporným tématem, které vyžaduje pečlivou analýzu a důkladné zvážení různých hledisek. Je zde nutné hledat rovnováhu mezi potřebou elektrické energie a bezpečností. Tato práce se pokusí přispět k pochopení této problematiky a poskytnout náhled na to, jak můžeme lépe zvládat rizika spojená s jadernou energetikou a zajistit, aby byla využívána s maximální bezpečností pro společnost i životní prostředí.

Problematika havárií při mírovém využití jaderné energie není nová, dá se říci, že je stejně stará jako jaderná energetika sama, přesto je stále velice aktuální. V této oblasti publikovala již celá řada českých i zahraničních autorů. V této práci jsem nejčastěji čerpal z monografií Jaderné právo: právní rámec pro mírové využívání jaderné energie a ionizujícího záření, Jakub Handrlica, 2012; Černobyl + 30: ve správný čas na špatném místě, Jaroslav Štrait, 2016; Fukušima I poté, Vladimír Wagner, 2015; a Černobyl: Historie jedné katastrofy, Serhii Plokhy, 2019.

V průběhu této práce bude zkoumáno několik klíčových aspektů spojených s haváriemi při mírovém využití jaderné energie. Nejprve bude vymezena terminologie a teoretická východiska související s využitím jaderné energie a jejími haváriemi. Dále bude charakterizována oblast využití jaderné energie na národní i globální úrovni. V další části bude sestaven přehled jaderných havárií, a provedena analýza jejich příčin a následků. V poslední části budou navržena opatření a technologie, které byly vyvinuty ke zvýšení bezpečnosti jaderných zařízení a prevenci jejich havárií.

Toto téma diplomové práce jsem si vybral proto, že problematika havárií při mírovém využití jaderné energie je mi velice blízká. Celý profesní život pracuji u HZS, v současné době jako operační důstojník na jaderné elektrárně. Příprava na možnou havárii a nácvik jejího zvládnutí patří nedílně k činnostem, se kterými se ve službě běžně setkávám.

CÍL PRÁCE A POUŽITÉ METODY

Cíl práce spolu s použitými metodami určuje hlavní směr, kterým se bude má diplomová práce ubírat.

Cíl práce

Tato práce se zaměřuje na problematiku havárií při mírovém využití jaderné energie.

Hlavním cílem této diplomové práce je navrhnout vhodná opatření, která by mohla být přijata k minimalizaci rizika budoucích incidentů. Jaderná energetika má nezastupitelnou roli při výrobě elektřiny v mnoha částech světa, a proto je zásadní chápat a řešit tyto otázky s cílem zlepšit bezpečnost jaderných zařízení a minimalizovat negativní dopady na životní prostředí a společnost.

Dílčí cíle.

Prvním dílčím cílem práce je sestavit přehled havárií při mírovém využití jaderné energie a provést jejich analýzu.

Druhým dílčím cílem práce je vyhodnotit příčiny a dopady havárií při mírovém využití jaderné energie.

Použité metody

V diplomové práci budou provedeny dvě analýzy. První analýza bude kvantitativní a budou v ní analyzovány událostí v databázi INES. Druhá analýza bude kvalitativní a budou v ní analyzovány vybrané závažné havárie. V této analýze budou analyzovány jak příčiny, tak dopady havárií. K rozdělení dopadů havárií jaderných zařízení bude použita metoda PESTLE. Další použitou metodou bude syntéza, která bude použita k seskládání a spojení jednotlivých poznatků z analýz. V závěru práce bude použita indukce k vytvoření návrhu opatření ke zlepšení současného stavu.

Analýza

Analýza je proces, který rozkládá zkoumaný subjekt nebo situaci na jednotlivé části a zkoumá jejich vlastnosti, vztahy a fakta. Je založena na předpokladu, že každý jev obsahuje určitý systém a funguje podle určitých zákonitostí. Cílem analýzy je odhalit vlastnosti jevů a procesů a oddělit podstatné informace od nepodstatných. Analýza, která společně se syntézou patří mezi základní a nejrozšířenější vědecké metody, je klíčová pro poznávání podstaty jevů. (STROHMANDL, 2023)

PESTLE

Název PESTLE je zkratka slov Political, Economical, Social, Technological, Legal a Ecological. Je to tedy analýza politických, ekonomických, sociálně-kulturních, technologických, právních a ekologických faktorů, které ovlivňovaly, ovlivňují nebo budou ovlivňovat organizaci. (Managementmania, 2015)

Ačkoliv byla analýza PESTLE primárně vyvinuta ke zkoumání podnikového prostředí, dnes se využívá k širokému spektru účelů a oborů. Lze použít pro strategické, organizační a marketingové plánování, ale i k retrospektivním analýzám trhů, zákazníků, výsledů a v neposlední řadě dopadů.

Mezi základní výhody PESTLE analýzy patří:

- analýza je jednoduchá a snadno pochopitelná a použitelná,
- pomáhá lépe porozumět zkoumanému problému,
- podporuje rozvoj strategického myšlení,
- pomáhá snižovat dopad budoucích hrozeb,
- umožňuje zavčas detekovat nové příležitosti ale i hrozby. (Journalmural, 2023)

Analýza PESTLE má samozřejmě i omezení, a to, že skenuje pouze vnější prostředí a zcela ignoruje vnitřní prostředí a konkurenční scénář. Dále také to, že jednotlivé faktory se mohou v krátké době měnit, takže je těžké předpovědět, proč a jak mohou tyto faktory ovlivnit budoucnost projektu. (Mobbybusiness, 2023)

Syntéza

Syntéza představuje proces kombinování poznatků získaných analytickými metodami do jednotného celku a slouží jako základ pro porozumění vzájemných souvislostí mezi jevy. Syntéza se zaměřuje na sumarizaci existujících poznatků, což nám umožňuje získat nové poznatky a vztahy na vyšší úrovni, a objasnit nové nebo předtím neuchopitelné vztahy a zákonitosti. (STROHMANDL, 2023)

Indukce

Indukce představuje proces vyvozování obecných závěru na základě poznatků získaných z jednotlivých jevů. Tím umožňuje stanovit podstaty jevů a jejich zákonitosti. Závěry induktivního myšlení však mají omezenou platnost, protože jsou ovlivněny subjektivními postoji. (STROHMANDL, 2023)

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ

Vymezení základních pojmů, které budou v práci použity. Ujasnění a pochopení těchto pojmů umožní snadnější orientaci v popisované problematice.

1.1.1 Radioaktivní záření

Při rozpadu atomových jader dochází k uvolňování radioaktivního záření, které se podle svých charakteristických vlastností dělí na záření alfa, beta a gama.

Alfa záření je radioaktivní záření s největšími ionizující účinky, zároveň má alfa záření nejmenší schopnost pronikání. Tvoří ho částice, je to proud jader hélia. K úplnému odstínění tohoto záření postačuje i tenký list papíru.

Beta záření je proud elektronů a má větší pronikavost než alfa záření. Může pronikat materiály s nízkou měrnou hmotností, nebo o malé tloušťce. K jeho odstínění postačuje vrstva 1 metru vzduchu nebo hliníkový plech.

Záření gama je nejpronikavější, jedná se o elektromagnetické záření. Procházejí hmotou i lidským tělem. K jeho odstínění je potřeba silná vrstva olova, několik metrů betonu, půdy, nebo jiného těžkého materiálu. (ŠTRAIT, 2016 str. 99)

Mezi další druhy ionizujícího záření se řadí neutronové záření a rentgenové záření. Neutronové záření je tvořeno proudem volných neutronu, rentgenové záření, dříve nazývané paprsky X, je elektromagnetické záření.

1.1.2 Fyzikální jednotky a převody mezi nimi

Becquerel

Jednotka intenzity záření zdroje radioaktivního záření, značka Becquerelu je Bq. Aktivita radioaktivního zářiče 1 Bq odpovídá jedné radioaktivní přeměně za sekundu. Jednotka se používá i jako hmotnostní Bq/kg, plošná Bq/m^2 a objemová Bq/m^3.

Curie

Starší jednotka intenzity záření zdroje radioaktivního záření, značka Curie je Ci. Aktivita 1 Ci odpovídá 37 miliardám radioaktivních přeměn za sekundu. $1\ Ci = 3{,}7 \cdot 10^{10}\ Bq$.

Rentgen

Starší jednotka, která vyjadřuje expozici ionizujícího záření, značka Rentgenu je R. $1\ R = 258\ \mu C/kg$.

Sievert

Jednotka pro ekvivalentní dávku ionizujícího záření, značka Sievertu je Sv. Dávka 1 Sv jakéhokoli záření má stejné biologické účinky jako dávka 1 Gy rentgenového nebo gama záření. (ŠTRAIT, 2016 str. 99)

Rem

Starší jednotka pro ekvivalentní dávku ionizujícího záření, značka Remu je rem. Zkratka vychází z anglického roentgen equivalent in man, česky biologický ekvivalent rentgenu. 100 rem = 1 Sv.

Grey

Jednotka absorbované dávky záření, značka Greye je Gy. 1 Gy odpovídá energii záření 1 J absorbované 1 kg látky.

Rad

Starší jednotka absorbované dávky záření, značka Radu je rad. 1 rad = 0,01 Gy.

1.1.3 Účinky ionizujícího záření

Účinky ionizujícího záření na lidský organismus při jednorázové dávce. Při rozložení dávky bývají účinky nižší.

Dávka 0,1 Sv – žádné účinky na zdraví ani v dlouhodobém měřítku.

Dávka 0,2 Sv – žádné účinky u dospělých ani opožděné, ale některé účinky na plod.

Dávka 0,3 Sv – menší hematologické abnormality – snížení počtu bílých krvinek.

Dávka 1 Sv – první příznaky – nevolnost, zvracení.

Dávka 2 Sv – nutnost hospitalizace – postižení kostní dřeně, anemie, infekce, krvácení.

Dávka 3 Sv – první kožní příznaky – rudnutí kůže, ztráta vlasů.

Dávka 4,5 Sv – 50% letální dávka – 50% úmrtnost při neléčení.

Dávka 8 Sv – střevní a respirační účinky – průjem.

Dávka 10 Sv – neurologické účinky – amnézie, kóma. (COMBY, 2007 str. 256)

1.1.4 Poločas rozpadu

Poločas rozpadu stanovuje, za jak dlouhou dobu se počet jader daného radioaktivního prvku sníží na polovinu. Rozpadlá jádra se mění na jiné prvky. Rychlost rozpadu závisí na stabilitě

jader daného prvku. Stabilní jádra se rozpadají pomalu, i tisíce let, nestabilní velice rychle, v rámci sekundy. Při rozpadech jader vzniká radioaktivní záření. (ŠTOREK, 2009)

Za jeden poločas rozpadu libovolné radioaktivní látky se její původní radioaktivita zmenší na polovinu, po dvou poločasech rozpadu na čtvrtinu (2 x 2), po třech poločasech rozpadu na osminu (2 x 2 x 2) a po 10 poločasech rozpadu se sníží 1024krát.

Poločas rozpadu některých prvků:

Radon (Rn_{222}) – 3,8 dne,

Jód (I_{131}) – 8 dnů,

Cesium (Cs_{131}) – 9,7 dne,

Kobalt (Co_{60}) – 5,3 roku,

Cesium (Cs_{137}) - 30 let,

Radium (Ra_{226}) - 1602 let,

Uhlík (C_{14}) - 5730 let,

Plutonium (Pu_{244}) – $8 \cdot 10^7$ let,

Uran (U_{235}) – $7{,}04 \cdot 10^8$ let.

Uran (U_{238}) - $4{,}5 \cdot 10^9$ let.

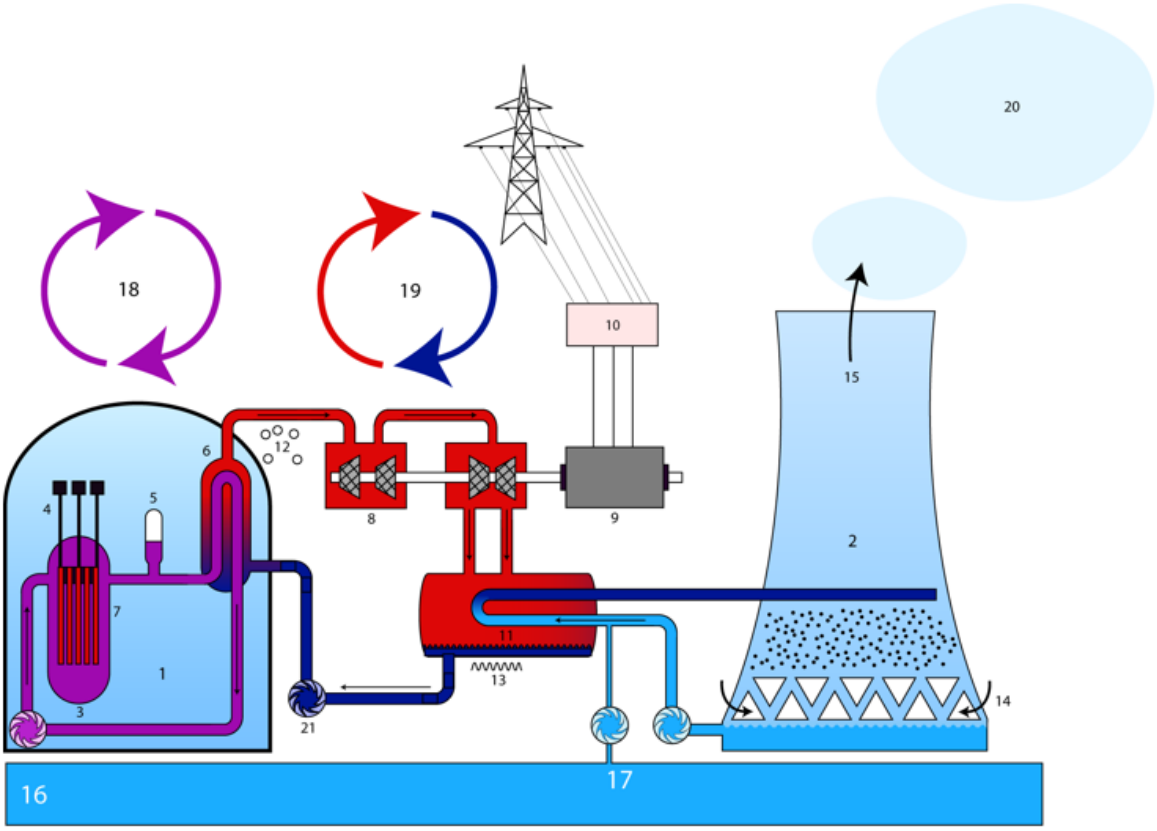
Thorium (Th_{232}) – $1{,}41 \cdot 10^{10}$ let. (COMBY, 2007 str. 285)

1.2 Jaderná energetika

Jaderná energetika je jedno z odvětví energetiky a průmyslu, které se zabývá především výrobou elektrické energie v jaderných elektrárnách.

1.2.1 Jaderná elektrárna

Jaderná elektrárna je typ elektrárny, která k produkci elektrické energie využívá jadernou štěpnou reakci. Hlavním zdrojem energie v jaderné elektrárně je jaderné palivo, obvykle uran obsahující vyšší podíl izotopu U_{235}. V aktivní zóně dochází v palivu k jadernému štěpení, což uvolňuje velké množství energie ve formě tepla. Toto teplo se pak používá k ohřevu vody, která se mění na páru.



1) reaktorovna uzavřená v tlakové obálce kontejnmentu,
2) chladicí věž,
3) reaktor,
4) řídící tyče reaktoru,
5) kompenzátor objemu,
6) parogenerátor – v něm horká voda primárního okruhu pod vysokým tlakem vyrábí páru v sekundárním okruhu,
7) aktivní zóna reaktoru,
8) dvoustupňová turbína
9) generátor elektrického proudu,
10) transformátor,
11) kondenzátor,
12) pára,
13) kondenzát,
14) přívod vzduchu do chladicí věže,
15) odvod teplého vzduchu a páry komínovým efektem,
16) zásobník chladící vody,
17) chladicí okruh,
18) primární okruh – voda pouze kapalná pod vysokým tlakem,
19) sekundární okruh – červeně značena pára, modře voda,
20) oblaka vzniklá kondenzací vypařené chladicí vody,
21) cirkulační čerpadlo sekundárního okruhu.

Obrázek 1 Schéma jaderné elektrárny

Zdroj: hellfirez.de, úprava vlastní

Pára pohání turbíny, které pohánějí generátory elektrické energie. Jaderná elektrárna se skládá z jaderného reaktoru, primárního okruhu, parogenerátoru, sekundárního okruhu, parní turbíny s generátorem, a mnoha dalších důležitých zařízení.

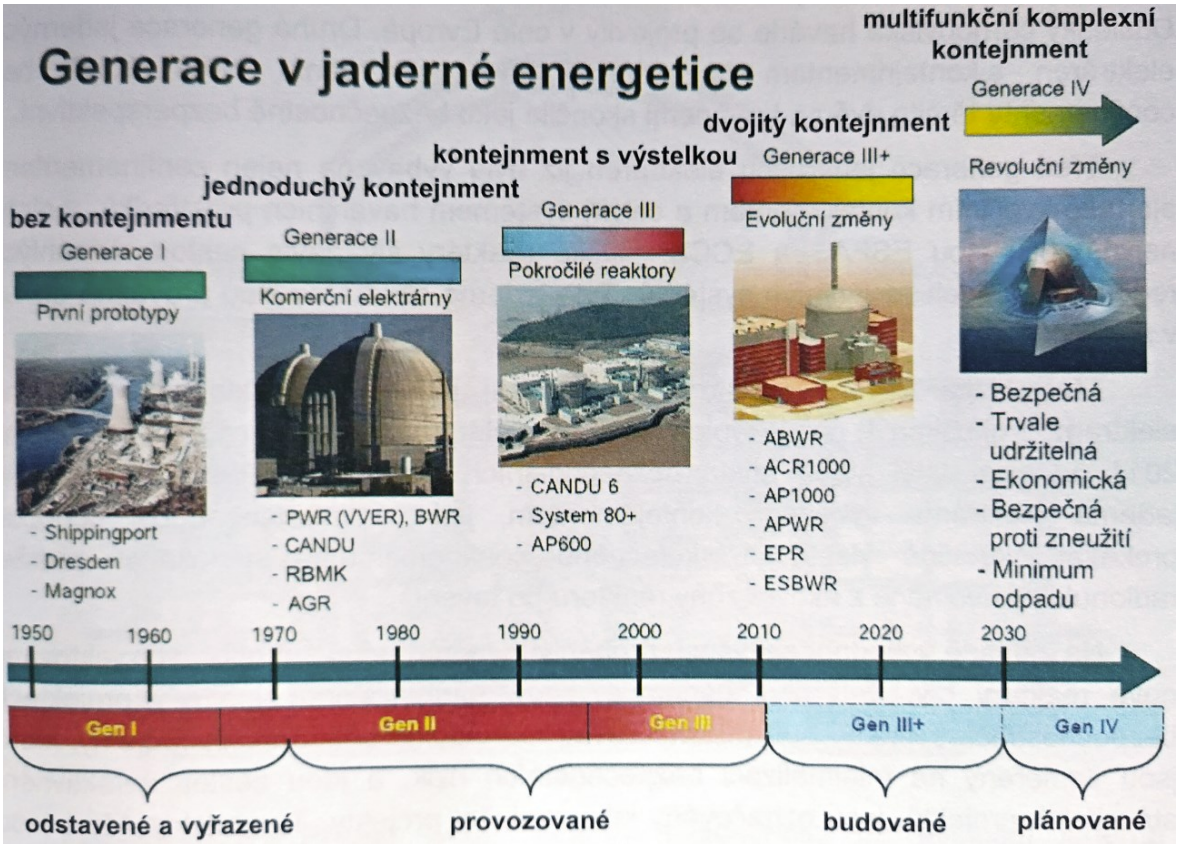
Jaderná elektrárna je schopna vyrábět velké množství elektrické energie v režimu základního zatížení, což znamená, že by měla vyrábět energii nepřetržitě, pokud je to možné. I když je regulace výkonu teoreticky možná, není v praxi příliš efektivní.

Ke štěpné reakci dochází v aktivní zóně, což je strukturovaná část reaktoru. (VIČAR, a další, 2020 stránky 142-143)

Obrázek 1 zobrazuje schéma běžného typu jaderné elektrárny, například JE Temelín.

1.2.2 Generace reaktorů

Za historii jaderné energetiky lze reaktory rozdělit do několika generací, které se postupně vyvíjely, viz obrázek 2.



Obrázek 2 Generace reaktorů v jaderné energetice

Zdroj: Jaderná bezpečnost: na půdorysu atomového zákona

I. generace – reaktory z 50. a 60. let. Většinou se jednalo o prototypy, které měly ukázat možnosti výroby elektřiny z jádra. V současné době již žádné reaktory I. generace nejsou v provozu.

II. generace – většina dnes funkčních reaktorů na celém světě. Stavěly se v sériích, čímž se dala zlepšovat jejich bezpečnost. Reaktory v Dukovanech i v Temelíně jsou II. generace.

III. generace – vyznačují se výrazně vylepšenými bezpečnostními parametry, se sníženým rizikem nehod, především sníženým rizikem roztavení jádra. Zvláštní důraz se klade především na prvky pasivní bezpečnostní. Tyto prvky zvládají krizové situace samočinně na základě přírodních zákonitostí, jako je přirozené proudění, gravitace a další, a to bez potřeby zásahu obslužným personálem a napájení elektřinou. Mezi nejdůležitější komponenty reaktorů III. generace patří kontejnment, který je navržen tak, aby odolával vlivům jako je pád letadla, zemětřesení, hurikán a dalším.

III+ generace – jedná se v podstatě o reaktory III. generace, které jsou vybaveny ještě pokrokovějšími bezpečnostními prvky, které jsou zaměřeny na intenzivní využití principů pasivní bezpečnosti.

IV. generace – nová generace reaktorů představuje zcela novou koncepci, která se výrazně liší od předchozích generací. Jejím hlavním cílem je zajištění dlouhodobého, efektivního, a především bezpečnějšího provozu jaderné energetiky. Tyto reaktory by měly významně snížit množství vznikajícího jaderného odpadu. (WAGNER, 2015 stránky 106-107)

1.3 Jaderná energetika ve světě

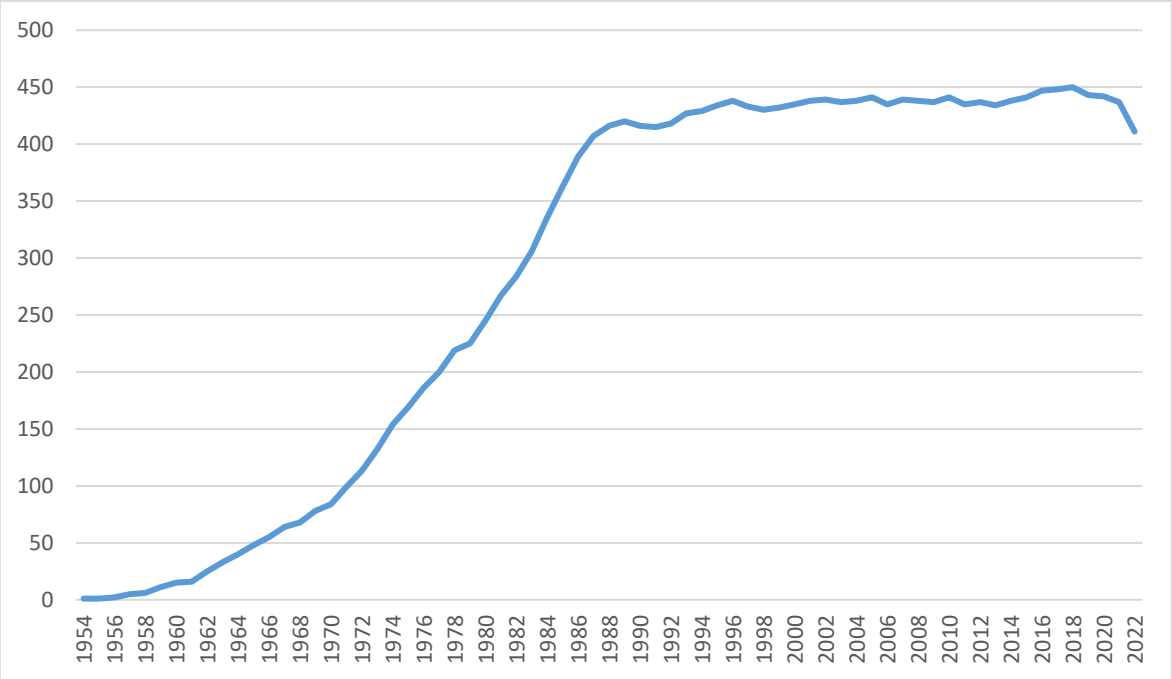
V roce 1939 došlo k objevu jaderného štěpení.

První jaderný reaktor na světě se rozběhl v prosinci 1942 v Chicagu.

První elektrický proud dodala do sítě jaderná elektrárna o výkony 5 MW v Obninsku v Sovětském svazu v červnu 1954. (ČEZ, 2009 str. 2)

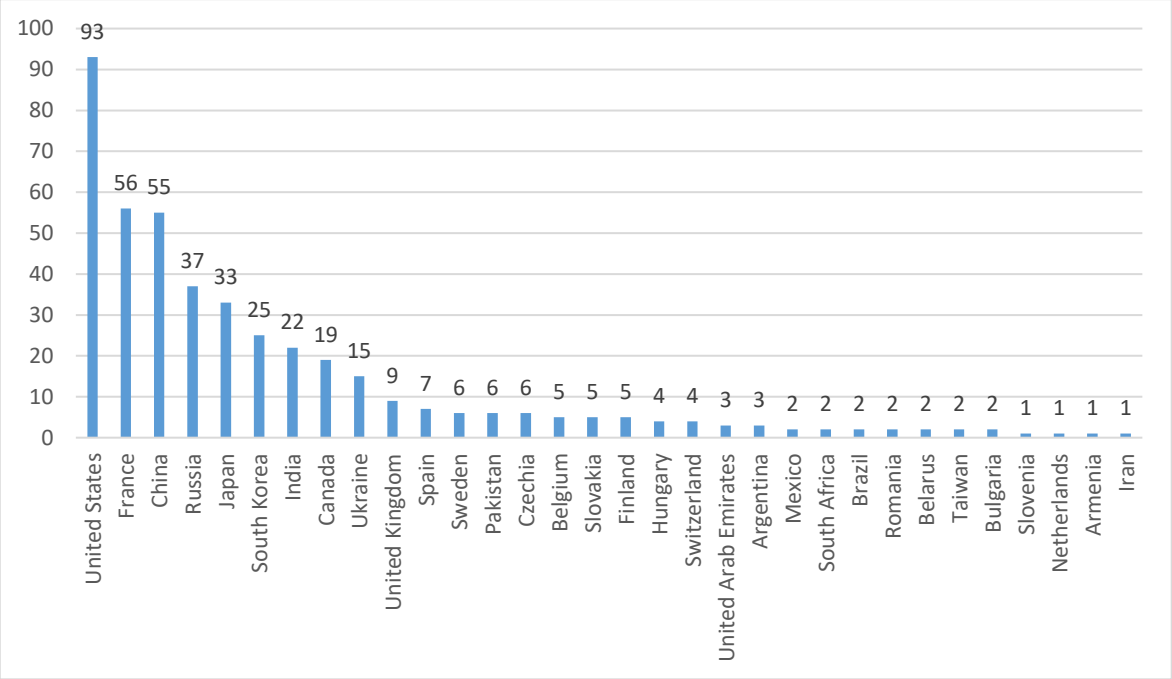
V současné době funguje na celém světě 442 jaderných reaktorů, které pokrývá se svými 370 GW elektrického výkonu zhruba 14 % světové výroby elektřiny a současně se podílí na zajišťování 2,5 % světových energetických potřeb. (SEQUENS, 2010 str. 3)

Graf na obrázku 3 zobrazuje počet provozovaných reaktorů ve světě v letech 1954 až 2022. V letech 1954 až 1986 je vidět dynamický nárůst, poté stagnace a v posledních letech začíná pokles.



Obrázek 3 Graf počtu provozovaných reaktorů

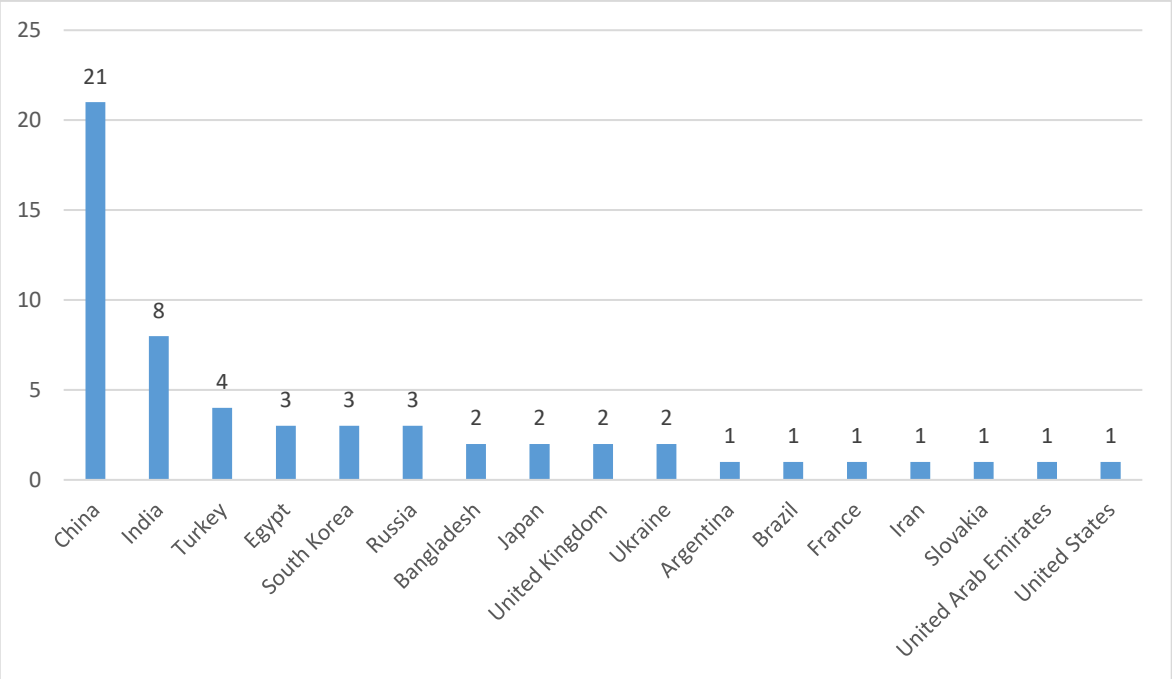
Zdroj: vlastní, podle statista.com



Obrázek 4 Graf počtu reaktorů v jednotlivých zemích

Zdroj: vlastní, podle statista.com

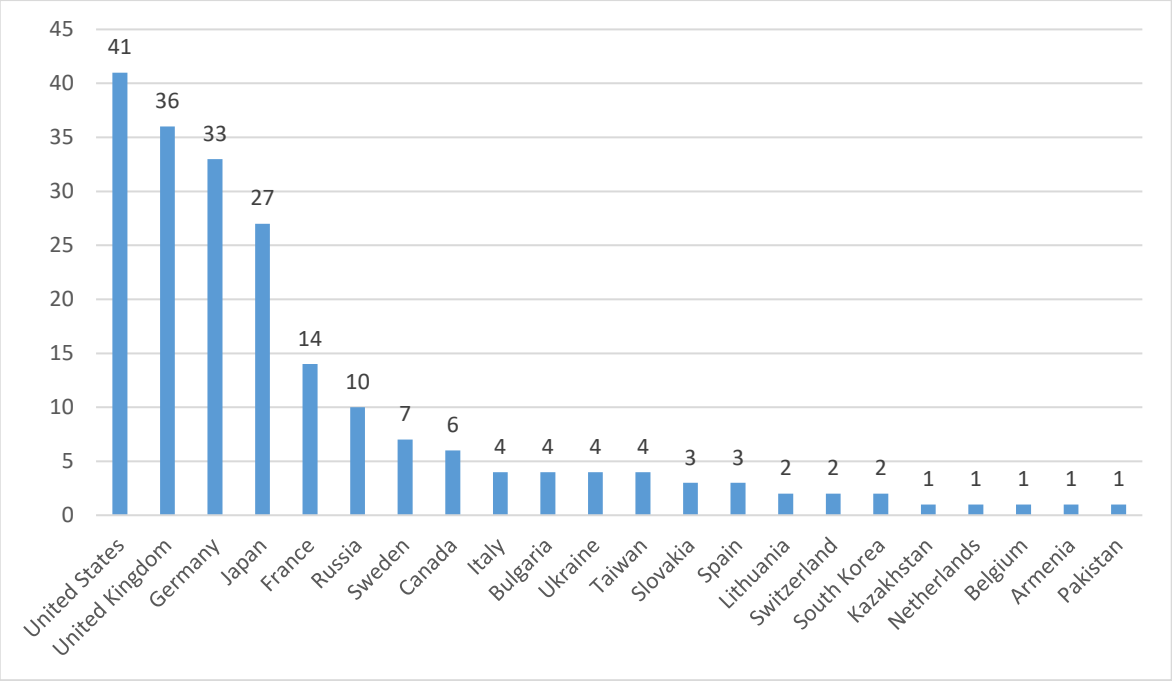
Graf na obrázku 4 zobrazuje počet provozovaných reaktorů v roce 2023 v jednotlivých zemích. Nejvyšší počet mají Spojené státy, dále Francie, Čína, Rusko a Japonsko.



Obrázek 5 Graf počtu reaktorů ve výstavbě

Zdroj: vlastní, podle statista.com

Graf na obrázku 5 zobrazuje počet jaderných reaktorů ve výstavbě v roce 2023 v jednotlivých zemích. Z grafu vyplývá, že se jaderná energetika přesouvá z rozvinutých zemí do zemí rozvojových. Ve výstavbě je v současnosti celkem 57 reaktorů, z toho 21 v Číně a 8 v Indii. V Evropské unii jsou to pouze 2 reaktory, ve Francii a na Slovensku.



Obrázek 6 Graf počtu trvale vyřazených reaktorů

Zdroj: vlastní, podle statista.com

Graf na obrázku 6 zobrazuje počet trvale vyřazených jaderných reaktorů v roce 2023 v jednotlivých zemích. I z tohoto grafu vyplývá odklon vyspělého západu od rizik spojených s jadernou energetikou. Na celém světě je v současnosti trvale odstaveno 207 reaktorů, z toho ve Spojených státech 41, ve Spojeném království 36 a v Německu všech dříve provozovaných 33 reaktorů.

Průměrné stáří reaktorů však přesahuje 25 let a v dohledné době tedy budou odstavované výkony vyšší než případně nově budované. (SEQUENS, 2010 str. 3)

1.4 Jaderná energetika v České republice

V současné době máme v České republice dvě jaderné elektrárny, které dohromady disponují šesti reaktory.

Nejstarší provozovanou jadernou elektrárnou v České republice je Jaderná elektrárna Dukovany. Elektrárna má čtyři bloky s tlakovodními reaktory typu VVER 440, které byly uvedeny do provozu mezi roky 1985 až 1987. Celkový instalovaný elektrický výkon této elektrárny byl 1760 MW. (ČEZ, 2023)

Druhou jadernou elektrárnou v České republice je Jaderná elektrárna Temelín, která vyrábí elektrickou energii ve dvou výrobních blocích s tlakovodními reaktory typu VVER 1000, konkrétně V 320. První blok této elektrárny byl uveden do provozu v roce 2000. Celkový instalovaný elektrický výkon této elektrárny dosahuje 2000 MW. (ČEZ, 2023)

Obě české jaderné elektrárny jsou vybaveny tlakovodními reaktory typu VVER, které jsou v současnosti nejrozšířenějším typem jaderných reaktoru. Jejich důležité parametry jsou uvedeny na obrázku 7. (LIBRA, a další, 2012 stránky 68-70)

parametr	JE Dukovany	JE Temelín
počet bloků	4	2
reaktor	tlakovodni VVER 440	tlakovodni VVER 1000
tepelný výkon jednoho bloku	1375 MW	3000 MW
vyváděný elektrický výkon bloku	440 MW	1000 MW
vnější průměr tlakové nádoby	3,56 m	4,5 m
výška tlakové nádoby	11,8 m	10,9 m
výška i s horním blokem	23,96 m	
hmotnost tlakové nádoby	215 t	332 t
vsázka paliva v jednom bloku	42 t	92 t
maximální vyhoření paliva	1008 MWh/kg	1440 MWh/kg
počet chladících smyček jednoho bloku	6	4
objem chladicí vody	209 m³	337 m³
průtok chladiva reaktorem	10,8 m³/s	23,6 m³/s
pracovní tlak	12,25 MPa	15,7 MPa
teplota chladiva na vstupu	267 °C	290 °C
teplota chladiva na výstupu	297 °C	320 °C
výkon jednoho parogenerátoru	452 t/h	1470 t/h
max. tlak páry	4,6 MPa	6,3 MPa
max. teplota páry	259 °C	279 °C
počet turbín na blok	2	1
výkon turbíny	220 MW	1000 MW
otáčky turbíny za minutu	3000	3000
výkon generátoru	220 MW	1000 MW
výstupní napětí generátoru	15,75 kV	24 kV
počet chladicích věží na blok	2	2
výška chladicí věže	125 m	154,8 m
průtok chladicí věží	10,5 m³/s	17,2 m³/s
maximální odpar z chladicí věže	0,15 m³/s	0,4 m³/s

Obrázek 7 Důležité parametry českých JE

Zdroj: Jaderná energie

1.5 Havárie

Zákony České republiky rozdělují radiační události do několika kategorií.

1.5.1 Radiační mimořádná událost

Událost, která vede nebo může vést k překročení limitů ozáření a která vyžaduje opatření, jež by zabránila jejich překročení nebo zhoršování situace z pohledu zajištění radiační ochrany. (ČESKO, 2022 str. § 4)

1.5.2 Radiační nehoda

Radiační mimořádná událost nezvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníků vykonávajících práci v aktuální směně, při jejíž činnosti radiační mimořádná událost vznikla, nebo vzniklá v důsledku nálezu, zneužití nebo ztráty radionuklidového zdroje, která nevyžaduje zavedení neodkladných ochranných opatření pro obyvatelstvo. (ČESKO, 2022 str. § 4)

1.5.3 Radiační havárie

Radiační mimořádná událost nezvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníků vykonávajících práci v aktuální směně, při jejíž činnosti radiační mimořádná událost vznikla, nebo vzniklá v důsledku nálezu, zneužití nebo ztráty radionuklidového zdroje, která vyžaduje zavedení neodkladných ochranných opatření pro obyvatelstvo. (ČESKO, 2022 str. § 4)

1.5.4 Projektová nehoda

Havarijní podmínky uvažované v projektových východiscích, při kterých nedojde k porušení nebo překročeni kritérií projektových nehod. (URBANČÍK, 2014 str. 93)

1.5.5 Nadprojektová nehoda

Havarijní situace, která nastává v případech, kdy dochází k překročení nebo porušení kritérií stanovených pro projektové nehody. Nadprojektové nehody mohou, ale nemusí, být spojené s významným poškozením aktivní zóny. (URBANČÍK, 2014 str. 93)

1.5.6 Těžká havárie

Nehoda, většinou nadprojektová, kdy dochází k závažnému poškození struktury aktivní zóny reaktoru nebo palivových souborů. Tato situace může potenciálně vést až k radiační nehodě. U lehkovodních reaktorů bývá těžká havárie ve většině případů spojována s větším poškozením aktivní zóny tavením. (URBANČÍK, 2014 str. 93)

1.5.7 Poškození aktivní zóny

Poškození aktivní zóny nastává v případě, že jsou překročena kritéria projektu pro poškození palivového systému. Tím se obvykle myslí významný únik radioaktivity spojený s významnou ztrátou geometrie aktivní zóny. (URBANČÍK, 2014 str. 88)

1.5.8 Předcházení haváriím

Povinnost předcházet haváriím definuje Atomový zákon v § 5. Každý, kdo využívá jadernou energii, je povinen přednostně zajišťovat jadernou bezpečnost a radiační ochranu, a to při respektování stávající úrovně vědy a techniky a správné praxe. (ČESKO, 2022 str. § 5)

Havárie v jaderných elektrárnách přinesly zajímavý poznatek týkající se bezpečnosti, a to že i velmi nečekané události mohou nastat a je důležité s nimi počítat, včetně extrémně nepravděpodobných přírodních katastrof. (WAGNER, 2015 str. 313)

1.5.9 Jaderná bezpečnost

Jaderná bezpečnost je stav a schopnost jaderného zařízení a fyzických osob obsluhujících jaderné zařízení zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné řetězové reakce nebo úniku radioaktivních látek anebo ionizujícího záření do životního prostředí a omezit následky nehod. (ČESKO, 2022 str. § 4)

1.5.10 Dopady jaderných havárií

Dopady budou v analýze havárií rozděleny podle faktorů, které byly haváriím ovlivněny a podle nástrojů analytické metody PESTLE.

Dopady jednotlivých havárií budou tedy rozděleny na dopady politické, ekonomické, sociálně-kulturní, technologické, právní a ekologické.

Politické dopady – dopady do politického prostředí země kde k havárii došlo:

- systémové změny,
- pád vlády,
- rezignace a odvolání politiků,
- rezignace a odvolání vedení společnosti.

Ekonomické dopady – dopady do ekonomiky společnosti a státu:

- náklady na likvidaci a obnovu,
- velikost zmařené investice,
- ztráta z nevýroby,
- ztráty navazujících průmyslových odvětví.

Sociálně-kulturní dopady – dopady do demografických struktur:

- ztráty na životech,
- počty raněných a nemocných,
- počty evakuovaných a přesídlených,
- zániky sociálně-kulturních struktur,
- změny veřejného mínění.

Technologické dopady – dopady do změn technologických zařízení:

- technologické změny,
- ukončení provozu havarovaného zařízení,
- ukončení provozu dalších jaderných zařízení,
- ukončení výstavby jaderných zařízení,
- ukončení vývoje a celkový odklon od jaderné energetiky.

Právní dopady – dopady do legislativy země kde k havárii došlo i legislativy mezinárodní:

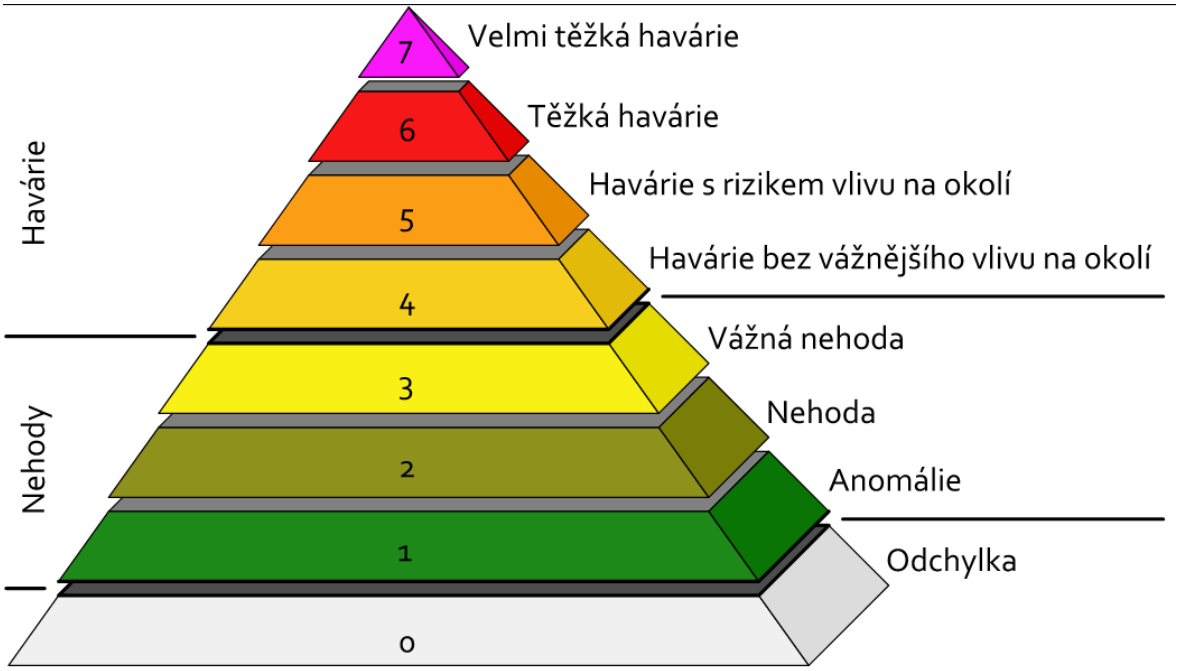
- změny legislativy,
- vznik mezinárodních dozorujících organizací,
- stanovení nových standardů.

Ekologické dopady – dopady do životního prostředí:

- množství uniklých radionuklidů uvnitř elektrárny,
- množství uniklých radionuklidů mimo elektrárnu,
- množství kontaminované vody uvnitř elektrárny,
- množství kontaminované vody mimo elektrárnu,
- vznik vysoce radioaktivního odpadu,
- vznik radioaktivního odpadu,
- velikost zamořené zóny,
- velikost nepřístupné zóny. (Mobbybusiness, 2023)

1.6 INES

INES – The International Nuclear Event Scale (Mezinárodní stupnice jaderných událostí) je stupnice pro posuzování nehod a havárií v jaderných zařízení o osmi stupních, viz obrázek 8, která byla zavedená MAAE (anglicky IAEA) a Agenturou pro jadernou energii OECD (OECD/NEA) v roce 1990. (SUJB, 2023)



Obrázek 8 Stupnice INES událostí

Zdroj: mons.wikimedia.org

0 – Odchylka – situace, kdy nejsou překročeny provozní limity a podmínky a na které systém a obsluha zareaguje v souladu s provozními postupy.

1 – Anomálie – situace, mimo schválený provozní režim, důležité hloubkové ochranné mechanismy jsou však stále zajištěny.

2 – Nehoda – nehoda, při které dojde k závažnému selháním některého z bezpečnostních opatření, ale zařízení má stále vyhovující ochranu do hloubky pro reakci na případné další poruchy.

3 – Vážná nehoda – nehoda, při niž již dochází k úniku radioaktivních látek do okolí zařízení s následkem dávky v řádu desetin mSv, může se jednat i o nehodu, kdy již některé z bezpečnostních systémů nemají schopnost reagovat na další iniciační události, a proto nejsou schopné bránit dalšímu rozvoji havárie.

4 – Havárie bez vážnějšího vlivu na okolí – havárie, při niž již dochází k úniku radioaktivních látek do okolí zařízení s následkem dávky v řádu několika mSv, nebo také událost při které dojde k rozsáhlému poškození jaderného zařízení.

5 – Havárie s rizikem vlivu na okolí – havárie, při níž dojde k úniku radioaktivních materiálů do okolí zařízení, které mají aktivitu v řádech stovek až tisíců TBq, dále také těžké poškození jaderného zařízení, které bude vyžadovat dílčí aktivaci havarijních plánů s cílem redukovat rizika možných zdravotních dopadů.

6 – Těžká havárie – havárie, při níž dojde k úniku radioaktivních materiálů s aktivitou v řádech tisíců až desetitisíců TBq do okolí zařízení a který bude vyžadovat úplnou aktivaci havarijních plánů s cílem redukovat rizika možných zdravotních dopadů.

7 – Velmi těžká havárie – havárie, při níž dojde k úniku značného množství radioaktivních materiálů do okolí zařízení, například aktivní zóny reaktoru, jejichž aktivita dosahuje desetitisíce TBq, takový únik by měl dlouhodobé dopady na životní prostředí, a může se dotknou i více než jedné země. (SUJB, 2008 str. 11)

Databáze poskytuje základní představu o rozšíření, rozmanitosti a četnosti nehod a havárií v jaderných zařízeních. Nejedná se však o úplný seznam, protože dozorové orgány jednotlivých států mají různá pravidla, které události musí MAAE hlásit a které nikoli.

2 LITERÁRNÍ REŠERŠE

IAEA, 2004. 50 Years of Nuclear Energy. *IAEA.* [Online]. https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc48inf-4-att3_en.pdf.

Publikace Mezinárodní agentury pro atomovou energii, která byla vydána v roce 2004 k připomenutí 50. výročí uvedení prvního jaderného reaktoru do provozu a zároveň k diskuzi o budoucnosti jaderné energetiky. Publikace vzešla z konference, která se konala v Moskvě a Obninsku. Cílem konference bylo zdůraznit úspěchy půlstoletí mírového využívání jaderné energie, poskytnout historický pohled na technické otázky a přínosy, které vyplývají z používání jaderné energie, a zvážit budoucí aplikace jaderné energie v následujících padesáti letech. Publikace obsahuje shrnutí konference, shrnutí jednotlivých sekcí a všechny dostupné dokumenty.

IAEA, 2006. *Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience.* Vienna: IAEA. ISBN 92–0–114705–8.

Publikace vydaná Mezinárodní agenturou pro atomovou energii v roce 2006. Tato zpráva se zaměřuje na hodnocení a analýzu environmentálních důsledků havárie v jaderné elektrárně Černobyl, která se stala v roce 1986. Zpráva se zabývá rozsahem a intenzitou ekologického poškození způsobeného havárií, a to jak v blízkém okolí elektrárny, tak i v širším regionu. Hodnotí se například kontaminace půdy, vody a vzduchu, a také dopady na rostlinstvo, zvířectvo a lidské zdraví. Cílem této zprávy je poskytnout přehled o dlouhodobých environmentálních důsledcích havárie v Černobylu a zkušenosti a poznatky, které byly získány během dvaceti let od této tragédie. Tím chce přispět k lepšímu pochopení a řízení rizik spojených s jadernou energií a zlepšení reakce na podobné události v budoucnosti.

IAEA, 1992. *INSAG-7 The Chernobyl accident: updating of INSAG-1.* Vienna: International Nuclear Safety Advisory Group. ISBN 92-0-104692-8.

Zpeáva INSAG-7, vydaná Mezinárodní agenturou pro atomovou energii v roce 1992, je zpráva, která aktualizuje předchozí zprávu INSAG-1 z roku 1986. Zabývá se analýzou technických a provozních aspektů, které vedly k havárii, včetně chyb v projektu, nedostatků v provozních postupech a porušení bezpečnostních pravidel. Cílem INSAG-7 je poskytnout komplexní a aktualizovaný pohled na havárii v Černobylu, který by sloužil jako základ pro další zlepšování bezpečnosti jaderného průmyslu a prevenci podobných nehod v budoucnosti. Tato zpráva je součástí širšího úsilí IAEA o zvyšování povědomí

o bezpečnostních aspektech jaderné energie a sdílení osvědčených postupů mezi členskými zeměmi.

SUJB, 2021. 35 let od havárie v Černobylu (SÚJB). *SUJB.* [Online]. https://www.sujb.cz/radiacni-ochrana/dnes-si-pripominame-35-let-od-havarie-na-cernobylske-jaderne-elektrarne.

Publikace byla vydána v roce 2021 Státním úřadem pro jadernou bezpečnost, která připomíná události spojené s černobylskou havárií před 35 lety. Publikace se zaměřuje na dlouhodobé dopady na obyvatele v okolních oblastech. Zahrnuje také opatření, která byla přijata po havárii, aby se minimalizovalo riziko podobných událostí v budoucnosti. Dále se také zabývá změnami, které ovlivnily život v těchto oblastech, a opatřeními, která byla v průběhu let podniknuta na postižených územích.

SUJB, 2021. Uplynulo 10 let od jaderné havárie na elektrárně Fukušima I. *SUJB.* [Online]. https://www.sujb.cz/aktualne/detail/dnes-si-pripominame-10-let-od-jaderne-havarie-na-elektrarne-fukusima-i.

Publikace byla vydána Státním úřadem pro jadernou bezpečnost v roce 2021. Shrnuje uplynulých 10 let od havárie, připomíná všechny důležité milníky likvidace havárie a zabývá se opatřeními, která byla přijata a jsou prováděna s cílem zlepšit bezpečnost v zasažené oblasti.

HIGGINBOTHAM, Adam, 2020. *Midnight in Chernobyl: The Untold Story of the World's Greatest Nuclear Disaster.* New York: Simon and Schuster. ISBN 978-1-5011-3463-0.

Kniha se zaměřuje na události spojené s havárií v jaderné elektrárně Černobyl v roce 1986. Autor se zabývá podrobným popisem havárie a jejích příčin, stejně jako důsledky pro lidi, kteří byli postiženi touto katastrofou. Kniha také poskytuje vyprávění o hrdinství a obětavosti lidí zapojených do záchranných operací, jakož i o obrovském úsilí při likvidaci havárie.

HANDRLICA, Jakub, 2012. *Jaderné právo: právní rámec pro mírové využívání jaderné energie a ionizujícího záření.* Praha: Auditorium. ISBN 978-80-87284-33-9.

Kniha se zaměřuje na právní aspekty související s využíváním jaderné energie a ionizujícího záření pro mírové účely. Kniha poskytuje přehled národních i mezinárodních právních předpisů a dohod, které tuto problematiku upravují. Dále obsahuje analýzu právního rámce,

který má za cíl ochranu lidského zdraví, životního prostředí a bezpečnosti při provozování jaderných zařízení a manipulaci s ionizujícím zářením.

PLOKHY, Serhii, 2019. *Černobyl: historie jaderné katastrofy.* Brno: Jota. ISBN 978-80-7565-462-5.

Kniha poskytuje komplexní historický přehled tragédie černobylské havárie a všech jejích společensko-politických důsledků. V roce 1986 došlo k explozi čtvrtého bloku reaktoru v jaderné elektrárně Černobyl. Následně bylo evakuováno město Pripjať. Kniha se zaměřuje na příčiny havárie, průběh událostí a následky pro obyvatele a životní prostředí. Autor knihy, Serhii Plokhy, se snaží přiblížit čtenářům celou tragédii a ukázat, jaký dopad měla na tehdejší Sovětský svaz a celý svět.

ŠTRAIT, Jaroslav, 2016. *Černobyl + 30: ve správný čas na špatném místě.* Modřišice: Presstar. ISBN 978-80-87141-40-3.

Kniha pojednává o událostech, které se odehrály v dubnu 1986 v jaderné elektrárně Černobyl. Autor knihy Jaroslav Štrait byl v té době na stáži v této elektrárně a popisuje své zážitky a zkušenosti s touto katastrofou. Kniha se dále zaměřuje na to, jak se tato katastrofa odráží na současnosti, tedy 30 let po havárii.

WAGNER, Vladimír, 2015. *Fukušima I poté.* Praha: Novela bohemica. ISBN 978-80-87683-45-3.

Kniha se zabývá událostí po havárii jaderné elektrárny Fukušima v Japonsku v roce 2011. Autor se zaměřuje na důsledky této katastrofy a její vliv na region, jeho obyvatele a životní prostředí. Kniha se věnuje nejen bezprostředně zasažené oblasti, ale také dlouhodobým dopadům na zdraví lidí, zemědělství, rybolov a obnovu oblasti. Autor zkoumá také reakci japonské vlády a energetického sektoru na tuto tragédii a zabývá se budoucnosti jaderné energetiky a obnovitelných zdrojů energie v Japonsku. Kniha poskytuje komplexní pohled na události po havárii Fukušimy a jejich dlouhodobé důsledky.

VIČAR, Dušan, a další, 2020. *Jaderné, radiologické a chemické zbraně, radiační a chemické havárie.* Zlín: Univerzita Tomáše Bati. ISBN 978-80-7454-947-2.

Monografie se zabývá problematikou jaderných, radiologických a chemických zbraní, stejně jako haváriemi spojenými s radiací a chemickými látkami. Kniha poskytuje detailní informace o těchto druzích zbraní a jejich vlivu na lidskou společnost a životní prostředí. Obsahuje i historický přehled vývoje těchto zbraní, jejich funkcí a vlastností. Dále kniha

analyzuje nejrozsáhlejší jaderné havárie, jako Three Mile Island, Černobyl a Fukušima, ale také scénáře teroristických útoků s použitím zbraní CBRN.

SEQUENS, Edvard, 2010. *Jaderná energetika: jen problémy a žádné řešení: pravda o jaderné energetice.* České Budějovice: Calla - sdružení pro záchranu prostředí. ISBN 978-80-87267-11-0.

Kniha se zabývá jadernou energetikou velice kritickým pohledem. Autor se snaží ukázat, že jaderná energetika není řešením energetických potřeb světa, jak se často tvrdí. Kniha se zaměřuje na různé problémy spojené s jadernou energetikou, jako jsou například bezpečnostní rizika, vysoké náklady, nebezpečný odpad a další. Autor také poukazuje na to, že jaderná energetika není ekonomicky výhodná a že existují mnohem lepší alternativy pro zajištění energetických potřeb světa. Těmi autor myslí především obnovitelné zdroje energie, ale také využívání u nás enormního potenciálu úspor a zvýšení energetické efektivity. Dále autor uvádí, že tyto scénáře jsou již v řadě zemí prakticky naplňovány.

LEATHERBARROW, Andrew, 2020. *Černobyl 01:23:40: neuvěřitelný příběh nejhorší jaderné katastrofy.* Brno: CPress. ISBN 978-80-264-3032-2.

Kniha se zaměřuje na události kolem havárie jaderné elektrárny Černobyl v roce 1986. Autor podrobně popisuje průběh havárie, včetně chyb ve výkonu a nedostatků v bezpečnostních opatřeních, které vedly ke katastrofě. Kniha se také zabývá okamžitými důsledky havárie, jako je evakuace obyvatelstva, příprava a průběh likvidace požáru a radioaktivního zamoření, a také tragickými následky pro lidi, kteří byli vystaveni vysokému záření. Autor se také snaží porozumět dlouhodobým důsledkům katastrofy, včetně zdravotních a ekologických dopadů na postiženou oblast. Kniha přináší autentické příběhy svědků a hrdinů, kteří se podíleli na zvládání této tragédie. Je to silný a dojemný příběh o nejhorší jaderné katastrofě, která změnila svět a zanechala trvalý otisk v lidské historii.

KUNZ, Emil, a další, 1987. *Zpráva o radiační situaci po havárii v Černobylu* . Praha: Institut hygieny a epidemiologie Centrum hygieny záření.

Zpráva se zabývá dopady černobylské jaderné havárie v Československu. Tato zpráva podává detailní informace o množství uvolněné radioaktivity, rozsahu zamoření, postižených oblastech a opatřeních přijatých k minimalizaci škodlivých účinků na lidské zdraví a životní prostředí.

HEZOUČKÝ, František, a další, 2008. Dve vážne havárie na jadrovej elektrarni A-1. *Bezpečnost jaderné energie.* 2008, 9/10.

Článek pojednává o dvou vážných haváriích, které se staly na jaderné elektrárně A-1. Text detailně popisuje příčiny a důsledky těchto havárií.

LIBRA, Martin, MLYNÁŘ, Jan a POULEK, Vladislav, 2012. *Jaderná energie.* Praha: Ilsa. ISBN 978-80-904311-6-4.

Kniha se zabývá problematikou využití jaderné energie. Autor se zaměřuje na klíčové prvky jaderné energie, jako je fúze, štěpení atomů, radioaktivita a uranový cyklus. Knihu lze chápat jako komplexního průvodce problematikou jaderné energie, kde jsou rozebrány její výhody, nevýhody a současný stav využívání této formy energie. Martin Libra se ve své knize také zabývá otázkou jaderné bezpečnosti, skladováním radioaktivního odpadu a perspektivou jaderné energie v budoucnosti.

SHCHERBAK, Iurii, 1989. *Chernobyl: A Documentary Story.* London: Palgrave Macmillan. ISBN-13: 9780333496671.

Kniha popisuje události související s jadernou havárií v elektrárně Černobyl v roce 1986. Autor se zabývá historií události, příčinami havárie, postupem evakuace obyvatel, lidmi, kteří se podíleli na likaci následků havárie, účinky ionizujícího záření na lidský organismus, a v neposlední řadě také ekologickými a ekonomickými důsledky katastrofy. Kniha obsahuje také skutečné fotografie a dokumenty, které přibližují události související s havái, a přináší tak čtenářům komplexní přehled o událostech kolem jedné z největších jaderných havárií v historii.

GOULD, Peter, 1990. *Fire in the rain: The democratic consequences of Chernobyl.* Oxford: Polity Press in association with Basil Blackwell. ISBN-10: 074560787X.

Kniha se zabývá především politickými důsledky havárie v jaderné elektrárně Černobyl. Autor se zaměřuje na to, jakým způsobem tato událost ovlivnila demokratický vývoj v postsovětských zemích, především v Rusku a Ukrajině. Kniha se zabývá otázkou transparentnosti, zodpovědnosti a přístupu k informacím ohledně havárie. Zaměřuje se také na dopady na politické režimy a instituce v těchto zemích. Autor zkoumá, jaká opatření byla nebo nebyla přijata kvůli havárii, a jak to ovlivnilo otázku demokratizace v regionu.

HULTMAN, Nathan a KOOMEY, Jonathan, 2013. Three Mile Island: The driver of US nuclear power's decline? *Bulletin of the Atomic Scientists.* 2013, 69:3.

Článek pojednává o událostech okolo havárie v jaderné elektrárně Three Mile Island v roce 1979 a jejím vlivu na pokles jaderné energetiky ve Spojených státech. Článek se také zaměřuje na veřejnou reakci na havárii a na změnu nálady vůči jaderné energii. Tato havárie vedla k ztrátě důvěry veřejnosti v jadernou energetiku a způsobila obavy o bezpečnost jaderných zařízení. Toto obrovské negativní veřejné vnímání mělo za následek významné omezení financování a výstavby nových jaderných elektráren.

MEDVEDEV, Zhores, 1992. *The Legacy of Chernobyl.* New York: W. W. Norton & Company. ISBN-13: 978-0393308143.

Kniha se zabývá událostí a následky havárie, která se stala v roce 1986 v jaderné elektrárně v Černobylu. Autor se zaměřuje na studium životů lidí, kteří byli postiženi touto katastrofou. Kniha obsahuje mnoho příběhů a vzpomínek přeživších, včetně záchranářů, hasičů, evakuovaných obyvatel a pracovníků elektrárny.

3 DÍLČÍ ZÁVĚR

Problematika havárií při mírovém využití jaderné energie je velmi komplexní a zabývalo se jí již mnoho autorů. Mezi nejvýznamnější patří agentury IAEA a SUJB, ale i jednotlivci jako například Adam Higginbotham, Jakub Handrlica, Serhii Plokhy, Jaroslav Štrait, Vladimír Wagner a mnoho dalších.

I když existuje mnoho děl, která se zaměřují na jednotlivé havárie a detailně analyzují jejich příčiny, průběh a následky, zatím nebylo provedeno komplexní porovnání a analýza všech nejzávažnějších havárií v jaderném průmyslu.

Z toho důvodu je potřebné provést detailní analýzu, která by zahrnovala příčiny a faktory, které vedly k haváriím, a důsledky, které tyto havárie měly na životní prostředí, lidské zdraví a ekonomiku.

Smyslem a cílem této práce je právě porovnání a analýza příčin a následků havárií při mírovém využití jaderné energie, a především návrh opatření, který u předchozích prací chybí a který by mohl být přijat k minimalizaci rizika budoucích incidentů.

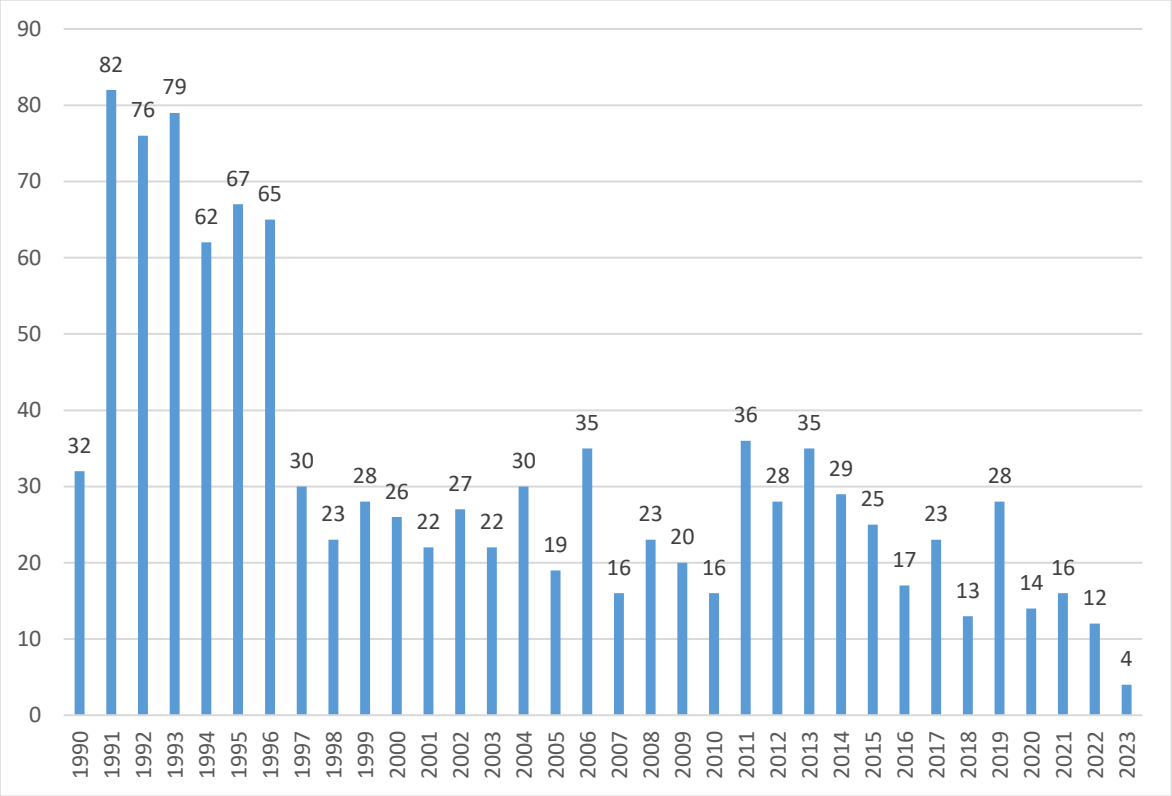
Je tedy jasně vidět, že toto je oblast, která si zaslouží další studium a výzkum, aby se získaly hlubší poznatky o příčinách a následcích havárií při mírovém využití jaderné energie. Tento výzkum přispěje k vytvoření komplexního obrazu této problematiky a poskytne základ pro zlepšení bezpečnosti jaderného průmyslu v budoucnosti.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 KVANTITATIVNÍ ANALÝZA UDÁLOSTÍ V DATABÁZI INES

Databáze INES byla stažena ze stránek Laka Foundation, https://www.laka.org/docu/ines/, což je nizozemské dokumentační a výzkumné centrum pro jadernou energii. Na stránkách MAAE, SUJB, ani na stránkách dalších oficiálních institucí není databáze dostupná, a to ani po registraci nebo písemné žádosti.

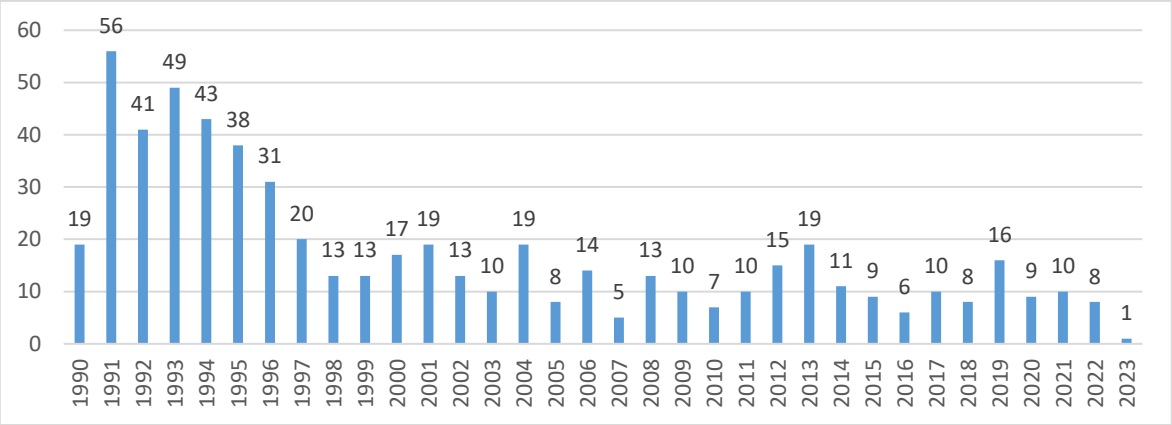
V databázi INES bylo za období od 1.1.1990 do 1.8.2023 zaznamenáno celkem 1080 událostí.



Obrázek 9 Graf událostí INES ve světě

Zdroj: vlastní, podle databáze INES

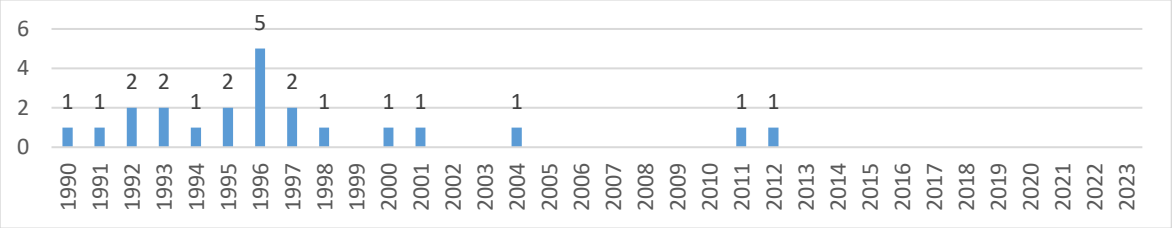
Na grafu na obrázku 9 je přehledně vidět že v 90. letech byl průměrný roční počet všech událostí 66, s mediánovou hodnotou 67. Po roce 1996 klesá celosvětový počet událostí na průměrných 25 za rok, s mediánovou hodnotou taktéž 25 za rok. V posledních letech, po roce 2019, se zdá že by mohlo dojít k dalšímu poklesu počtu události, kdy se průměrný počet snižuje na 11 událostí za rok, s mediánovou hodnotou 13. Na vyhodnocení tohoto trendu je však ještě brzo. Průměrnou hodnotou celého sledovaného období je 32 událostí za rok, s mediánem 26.



Obrázek 10 Graf událostí INES v Evropě

Zdroj: vlastní, podle databáze INES

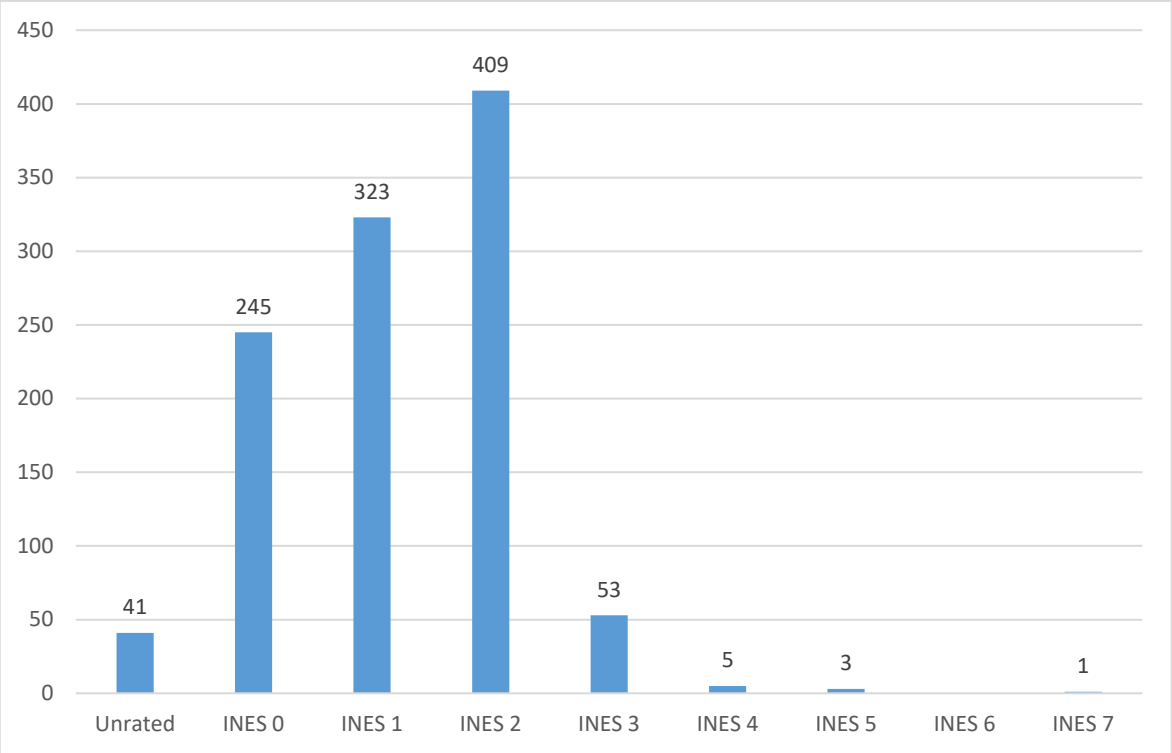
V grafu na obrázku 10 jsou všechny události INES, které se udály na území Evropy. Graf v podstatě kopíruje celosvětový trend, kdy v 90. letech bylo v Evropě v průměru 39 událostí ročně s mediánem 41, po roce 1996 klesá na průměrných 12 událostí ročně s mediánovou hodnotou 13. Po roce 2019 je průměrný počet událostí 7 za rok s mediánem 8. Průměrnou hodnotou celého sledovaného období je 17 událostí za rok, s mediánem 13.



Obrázek 11 Graf událostí INES v České republice

Zdroj: vlastní, podle databáze INES

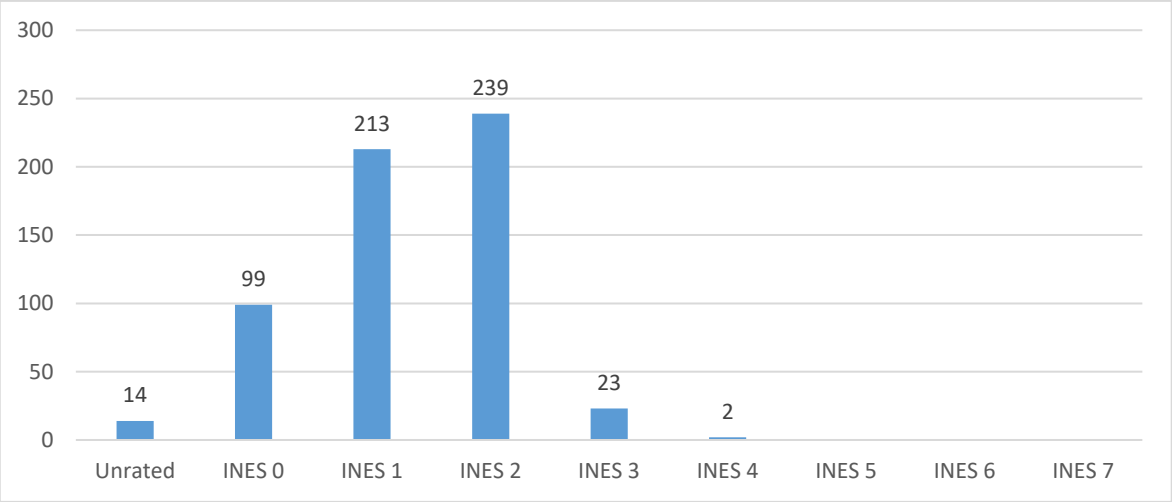
V grafu na obrázku 11 jsou všechny události INES, které se udály na území České republiky. Opět je vidět celosvětový trend. V 90. letech se udály v průměru 2 události ročně s mediánem 2, od roku 1997 do roku 2012 je průměrný počet události 0,5 za rok s mediánem 0, a po roce 2013 jsme v České republice událost INES neměli. Průměrnou hodnotou celého sledovaného období je 0,6 událostí za rok, s mediánem 0.



Obrázek 12 Graf stupňů INES ve světě

Zdroj: vlastní, podle databáze INES

Na grafu na obrázku 12 je vidět porovnání jednotlivých stupňů celosvětových události INES, za celé sledované období. Počet anomálií INES 0 bylo 245, což činí 23 % všech událostí. Počet nehod INES 1-3 bylo v řádech stovek, INES 1 bylo 323, což činí 30 % všech událostí, INES 2 bylo 409, což činí 38 % všech událostí, a INES 3 bylo 53, což činí 5 % všech událostí, Počet havárií INES 4-7 bylo celkově 9. Z toho bylo 5 událostí INES 4 (havárie bez rizika vně zařízení), což činí 0,5 % všech událostí. Dále 3 události INES 5 (havárie s rizikem vně zařízení), což činí 0,3 % všech událostí. Jednalo se o postupné havarování bloků 3, 2 a 1 fukušimské elektrárny. A jedna událost INES 7 (velmi těžká havárie), což činí 0,1 % všech událostí, kde se jednalo o přehodnocení ratingu INES u fukušimské havárie.



Obrázek 13 Graf stupňů INES v Evropě

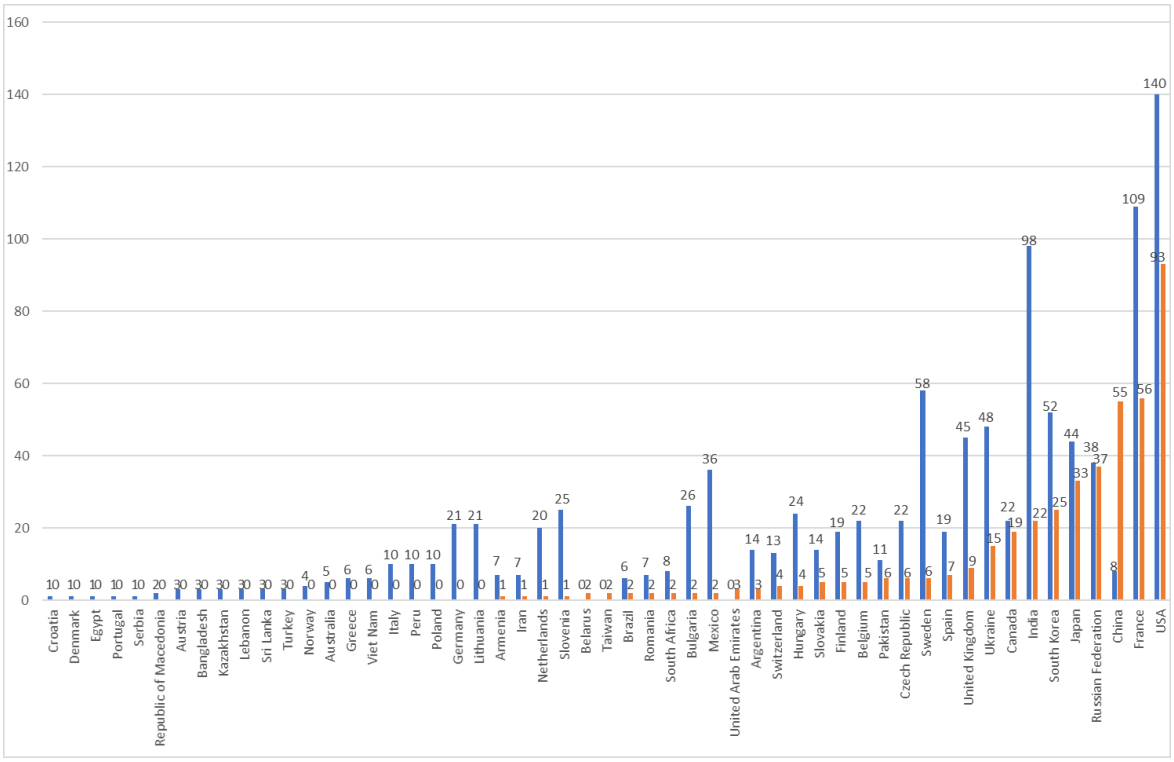
Zdroj: vlastní, podle databáze INES

Graf na obrázku 13 porovnává jednotlivé stupně události INES v Evropě, za celé sledované období. Počet anomálií INES 0 bylo 99, což činí 17 % všech událostí. Počet nehod INES 1-3 bylo v řádech stovek, INES 1 bylo 213, což činí 36 % všech událostí, INES 2 bylo 239, což činí 40 % všech událostí, a INES 3 bylo 23, což činí 4 % všech událostí. Počet havárií INES 4-7 bylo celkově 2, což činí 0,3 % všech událostí. V obou případech se jednalo o událost INES 4 (havárie bez rizika vně zařízení). První se stala v roce 2006 v Belgii a druhá v roce 2011 v Bulharsku. V obou případech se jednalo o nadměrnou expozici zaměstnanců.

Obrázek 14 Graf stupňů INES v České republice

Zdroj: vlastní, podle databáze INES

Graf na obrázku 14 porovnává jednotlivé stupně události INES v České republice, za celé sledované období. Graf má podobný průběh jako grafy porovnávající jednotlivé stupně události INES ve světě a v Evropě. Počet anomálií INES 0 bylo v České republice 5, což činí 23 % všech událostí, počet nehod INES 1 bylo 9, což činí 41 % všech událostí, počet nehod INES 2 bylo 3, což činí 14 % všech událostí, a havárii INES 4-7 jsme v České republice neměli zaznamenanou.



Obrázek 15 Graf událostí INES v jednotlivých státech

Zdroj: vlastní, podle databáze INES

Graf na obrázku 15 porovnává počet všech INES událostí v jednotlivých státech, za celé sledované období (modré sloupce), vztažených k počtu aktuálně provozovaných reaktorů (oranžové sloupce). Graf je potřeba brát pouze jako informativní, protože nezohledňuje další jaderná zařízení jako jsou výzkumná centra, závody na zpracování jaderných materiálů a také odstavené reaktory. Na druhou stranu tyto další provozy jsou zpravidla podmínkou provozu jaderných reaktorů a v zemích bez jaderné energetiky se vyskytují poměrně zřídka.

4.1 Zhodnocení

Je velká škoda, že do databáze INES byly události zaznamenávány až od roku 1990. Bylo by jistě zajímavé sledovat trend vývoje počtu událostí od počátku jaderné energetiky v 50. letech a od prvních havárií. Počet všech událostí v čase setrvale klesá, což svědčí o zvyšující se kultuře bezpečnosti. Tyto trendy lze jednoznačně vysledovat u událostí nižších stupňů kde je dostatek statistických dat. U závažných havárií, které ve sledovaném období i za celou dobu používání jaderné energie tvořili pouze zlomek procenta všech událostí, bohužel dostatek statistických dat nemáme, a proto se o nějakém trendu vývoje nedá hovořit. Ve sledovaném období se staly dvě velmi závažné havárie, v Tomsku v roce 1993 a ve Fukušimě v roce 2011. Ani jedna z těchto havárií se na grafech výrazněji neprojevila.

5 KVALITATIVNÍ ANALÝZA VYBRANÝCH ZÁVAŽNÝCH HAVÁRIÍ

Oficiálně bylo zaznamenáno asi 70 radiačních a jaderných nehod a havárií, při nichž někdo přišel o život. Ve většině měly havárie méně jak 10 obětí. Jistě se však staly i havárie, které se stále tají. (LEATHERBARROW, 2020 str. 23)

V různých publikacích i na internetu existuje celá řada seznamů havárií a nehod v jaderných zařízeních. Bohužel se dost často liší a obsahují různý počet událostí. Do kvalitativní analýzy jsem vybral 17 havárií, které splňují kritéria:

- havárie byla klasifikována minimálně INES 4,
- nebo došlo k závažnému poškození zdraví, nebo úmrtí,
- nebo došlo k rozsáhlému poškození nebo kontaminaci,
- nebo byla havárie před veřejností zatajována,
- havárie musí přímo souviset s jadernými materiály (havárie jiného typu v jaderných elektrárnách nejsou zahrnuty),
- jedná se o zařízení využívající jadernou energii primárně pro nevojenské účely.

5.1 Vybrané závažné havárie

Havárie jsou uvedeny v chronologickém pořadí.

5.1.1 Chalk River Laboratories

Země – Ontario, Kanada

Datum události – 12. prosinec 1952

Hodnocení INES – 5

Typ havárie – poškození reaktoru

Popis havárie – laboratoře v Chalk River nesložily k výrobě elektrické energie, ale k produkci radionuklidů pro lékařské potřeby. Reaktor NRX selhal při odstavování. Toto selhání spolu s několika špatnými rozhodnutími operátorů způsobilo neřízenou řetězovou reakci, která více než zdvojnásobila výkon jaderného reaktoru.

Obsluha otevřela čtyři tlakové uzavírací ventily v chladicím systému, což způsobilo výbuch, který zničil jádro reaktoru a způsobil únik radioaktivity. Regulační tyče reaktoru se proto

nemohly zcela zasunout do aktivní zóny reaktoru. Dále došlo k sérii výbuchů a do atmosféry bylo uvolněno tisíce radioaktivních částic, celkem asi 30 kg uranu.

4000 m^3 radioaktivní vody z chladícího systému bylo odčerpány ze suterénu a bylo vypuštěny do záchytných nádrží poblíž řeky Ottawy, kde bylo postupně likvidováno. Havarovaný reaktor nemohl být opraven a byl proto rozebrán a uložen jako vysoce radioaktivní odpad. Na jeho místo byl instalován nový, ještě výkonnější, jaderný reaktor. Do asi dvouletého úklidu po havárii se zapojilo přibližně 1200 lidí. V důsledku havárie nedošlo k žádnému přímému úmrtí nebo zranění. (PLANAS, 2010)

Příčiny havárie:

1) lidská chyba, špatné rozhodnutí operátorů,
2) technická závada, selhání reaktoru.

Politické dopady – nejsou známy.

Ekonomické dopady – náklady na dekontaminaci, náklady na likvidaci zhavarovaného zařízení, náklady na instalaci nového reaktoru, náklady na částečnou změnu technologie, ztráta z nevýroby.

Sociálně-kulturní dopady – nejsou známy.

Technologické dopady – ukončení provozu havarovaného zařízení, ale současně instalace nového výkonnějšího reaktoru a částečná změna technologie.

Právní dopady – nejsou známy.

Ekologické dopady – únik asi 30 kg radioaktivních částic uranu do atmosféry, vypuštění 4000 m3 radioaktivní vody do záchytných nádrží poblíž řeky Ottawy, vznik velkého množství vysoce radioaktivního odpadu.

5.1.2 Komplex Maják Kyštym

Země – Sovětský svaz, dnes Ruská federace

Datum události – 29. září 1957

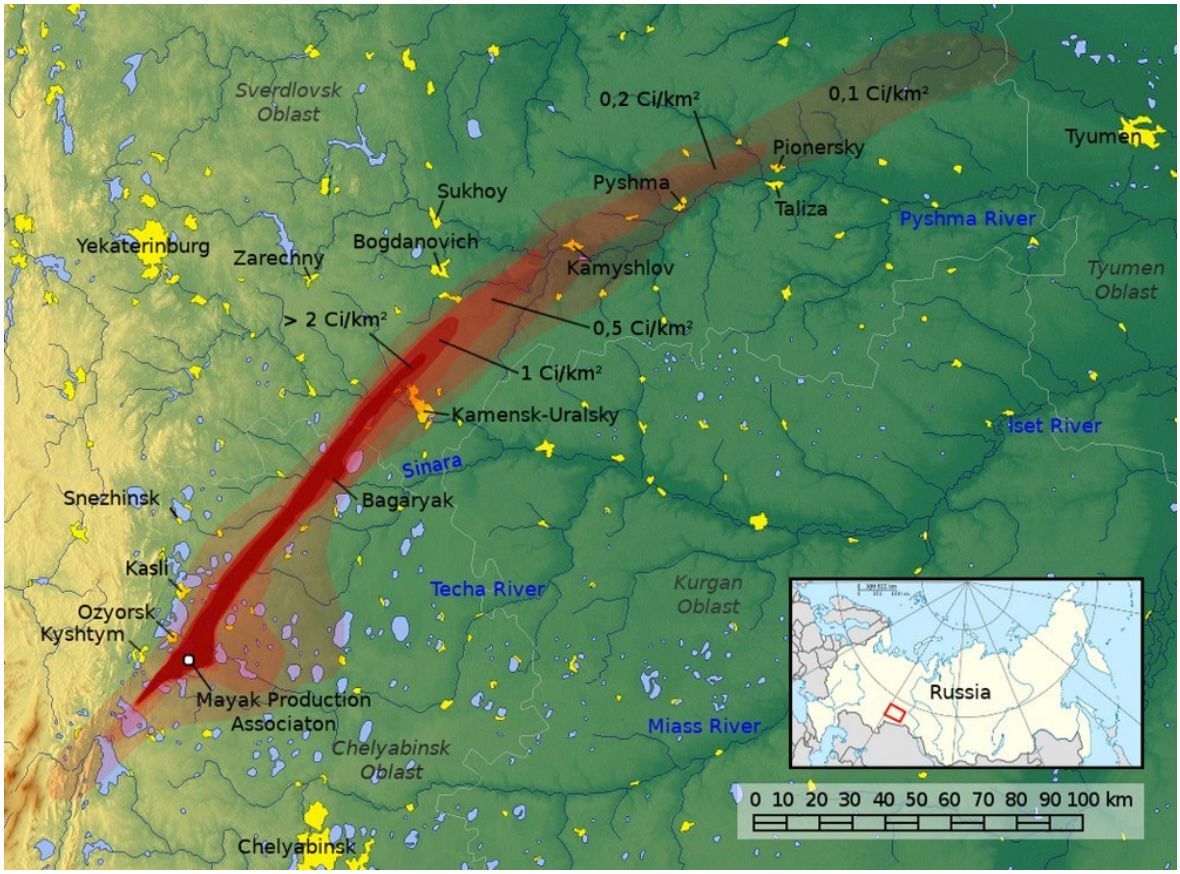
Hodnocení INES – 6

Třetí nejzávažnější jaderná havárie v historii.

Typ havárie – únik radioaktivity

Popis havárie – havárie na zařízení Maják, známému také jako Čeljabinsk-40 a Čeljabinsk-45 u města Ozersk, nelze zcela jednoznačně zařadit jako havárii při mírovém využití jaderné energie, protože sovětská vláda přes 30 let tajila informace o této havárii. Maják je v současnosti závod na přepracování jaderného paliva a jaderné testovací centrum, dříve se zde však vyrábělo i plutonium pro jaderné zbraně. (HANDRLICA, 2012 str. 54)

Havárie v Čeljabinsku-40, jak byl Maják původně nazýván, byla způsobena poruchou chladicího systému nádrže obsahující radioaktivní odpad. To způsobilo přehřátí nádrže, vedoucí k sérii reakcí, které způsobily chemický (nikoli jaderný) výbuch. Velká síla tohoto výbuchu roztrhla betonovou bariéru a asi polovina radioaktivního odpadu obsaženého v nádrži byla rozptýlena do okolí. Přestože žádný pracovník nebyl přímo při výbuchu zabit, následky havárie byly velmi závažné. (PLANAS, 2014)



Obrázek 16 Východouralská radioaktivní stopa

Zdroj: amusingplanet.com

Radioaktivita, která unikla jako důsledek havárie se odhaduje na asi 20 MCi (740 PBq). Největší množství uniklých radioaktivních látek spadlo v okolí místa havárie a způsobilo významné radioaktivní znečištění řeky Teča. Oblak uniklých radionuklidů obsahující zhruba 2 MCi (74 PBq) se rozšířil stovky kilometrů severovýchodním směrem do Sovětského svazu.

Za 12 hodin dosáhl tento oblak vzdálenosti 300-350 km od města Čeljabinsk, viz. obrázek 16. Spad z oblaku radionuklidů způsobil dlouhodobou kontaminaci rozsáhlého území o ploše téměř 20 000 km². Tato postižená oblast, která je kontaminována především cesiem a stronciem, je známa jako Východouralská radioaktivní stopa. (PIKE, 2018)

Účinky havárie bylo zasaženo asi 270 000 obyvatel, převážně ve městech Čeljabinsk, Sverdlovsko a Ťumen. Evakuováno bylo 23 vesnic z nejvíce zasažené oblasti, s celkovým počtem obyvatel kolem 12 000. (PITOŇÁK, a další, 2018 str. 18)

Někteří obyvatelé byli evakuováni již po týdnu, ale celá evakuace trvala téměř 2 roky.

Celkový počet úmrtí je nejistý, protože rakovina způsobená ozářením je k nerozeznání od jakékoliv jiné rakoviny. Různé zdroje uvádějí odhadovaný počet obětí této nehody za posledních 32 let v rozmezí od 200 až po 8000 mrtvých.

Kontaminovaná půda byla z důvodu snížení rozšiřování radioaktivity shrnuta a uložena na zaplocené skladovací plochy. V roce 1968 byla Sovětským svazem na místech Východouralské radioaktivní stopy zřízena přírodní rezervace, kam je z bezpečnostních důvodů dodnes zakázán přístup. (RASPOPOV, 2011)

Sovětský svaz havárii tajil 32 let a informace o ní zveřejnil až v roce 1989 na zasedání Nejvyšší rady a později na sympoziu MAAE. Zcela utajit se mu ji však nepodařilo, především kvůli závažnosti havárie a jejímu rozsahu, který vyžadoval značný počet sil a prostředků k likvidaci havárie. (PITOŇÁK, a další, 2018 str. 20)

Příčiny havárie:

1) technická závada chladicího systému nádrže.

Politické dopady – nejsou známy.

Ekonomické dopady – náklady na dekontaminaci rozsáhlé oblasti, náklady na likvidaci zhavarovaného zařízení, náklady na obnovu zařízení, ztráta z nevýroby.

Sociálně-kulturní dopady – nemalý počet mrtvých, raněných a nemocných, zánik 23 vesnic, násilně přesídleno asi 12 000 obyvatel, zánik velkého množství sociálně-kulturních struktur.

Technologické dopady – nejsou známy.

Právní dopady – nejsou známy.

Ekologické dopady – únik asi 20 MCi (740 PBq) radioaktivity, kontaminace vodních zdrojů v okolí zařízení, dlouhodobá kontaminace cesiem a stronciem na území o rozloze až 20 000 km², vznik velkého množství radioaktivního odpadu, vznik rozsáhlé nepřístupné zóny.

Dodnes platí zákaz zemědělské činnosti na ploše 167 km^2. (PITOŇÁK, a další, 2018 str. 26)

5.1.3 Chalk River Laboratories

Země – Ontario, Kanada

Datum události – 24. květen 1958

Hodnocení INES – 5

Typ havárie – poškození reaktoru

Popis havárie – další závažná havárie stejného zařízení v průběhu pěti let. V důsledku nedostatečného chlazení došlo k přehřátí palivových tyčí, jejich poškození a požáru jedné uranové palivové tyče, která se při vytahování z aktivní zóny reaktoru rozlomila na dvě části. Požár byl uhašen, ale až po úniku radioaktivních produktů hoření do celé budovy reaktoru. Navíc se ventilační systém zasekl v poloze otevřeno. To způsobilo šíření radioaktivních částic do rozsáhlé oblasti po větru mimo budovu reaktoru. Do úklidových a likvidačních prací bylo zapojeno více než šest set lidí. Při nehodě nikdo nezemřel na následky expozice, a jen velmi málo ze zasahujících bylo vystaveno nadměrné radiaci. Většina evidovaných dávek nepřekročila v té době povolené úrovně pro pracovníky v jaderných zařízeních. Jednomu pracovníkovi se ale rozvinul neobvyklý typ rakoviny kůže, aby mu bylo přiznáno odškodnění za zranění způsobená ozářením, se však musel domáhat u mnoha soudů. (PLANAS, 2010)

Příčiny havárie:

1) konstrukční vada, nedostatečné chlazení palivových tyčí.

Politické dopady – nejsou známy.

Ekonomické dopady – náklady na dekontaminaci, náklady na opravu zhavarovaného zařízení, ztráta z nevýroby.

Sociálně-kulturní dopady – jeden prokázaný případ rakoviny.

Technologické dopady – nejsou známy.

Právní dopady – vznik právního precedentu.

Ekologické dopady – úniku radioaktivních produktů hoření do budovy reaktoru a do rozsáhlé oblasti mimo zařízení, vznik radioaktivního odpadu.

5.1.4 Institutu Borise Kidrica Vinča

Země – Jugoslávie, dnes Srbsko

Datum události – 25. říjen 1958

Hodnocení INES – 4

Typ havárie – kritická expozice personálu

Popis havárie – nehoda při experimentu s výzkumným reaktorem využívajícího jako palivo 3995 kg přírodního uranu a jako moderátor těžkou vodou. Během experimentu s podkritickým množstvím došlo k neočekávanému nárůstu výkonu. Kritická sestava vydržela uvolnění energie asi 80 MJ (ekvivalent asi 2 kg TNT). Šest vědců dostalo radiační dávky 2–4 Sv (200–400 rem). U všech se objevila těžká nemoc z ozáření a jeden zemřel. U pěti přeživších byla ve Francii provedena transplantace kostní dřeně, ve všech případech neúspěšná. Jednalo se o jeden z prvních jaderných incidentů vyšetřovaných tehdy nově vytvořenou MAAE. (JOHNSTON, 2005)

Příčiny havárie:

1) lidská chyba, neočekávaný stav při experimentu.

Politické dopady – nejsou známy.

Ekonomické dopady – náklady na léčbu.

Sociálně-kulturní dopady – jeden mrtvý a pět těžkou nemoc z ozáření.

Technologické dopady – nejsou známy.

Právní dopady – nejsou známy.

Ekologické dopady – nejsou známy.

5.1.5 Brown Ferry

Země – Alabama, USA

Datum události – 22. březen 1975

Hodnocení INES – nehodnoceno

Typ havárie – rozsáhlý požár

Popis havárie – v elektrárně došlo k rozsáhlému požáru. Požár vznikl v rozvodně přímo pod dozornou pro reaktory 1. a 2. bloku. Při postupu požáru došlo k poškození napájecích a ovládacích kabelů bezpečnostních systémů i jejich zálohování. Během požáru byly vyřazeny všechny systémy havarijního chlazení aktivní zóny pro reaktor 1. bloku a většina těchto systémů pro reaktor 2. bloku. Požár prorazil mnoho bariér, které měly chránit před poškozením aktivní zóny reaktorů. Na poslední chvíli se podařilo náhradním způsobem zprovoznit čerpadla chladící vody v reaktoru a zabránit tavení aktivní zóny. Požár zničil 1611 elektrických obvodů, z nichž 628 zajišťovalo chod reaktoru. Všechny kabely vedly jednou kabelovou šachtou a nebyly protipožárně chráněny. Důvodem požáru byla nedbalost při práci s otevřeným ohněm, kdy pracovníci plamenem svíčky vyhledávali netěsnosti a utěsňovali je hořlavým polyuretanem, který se jim vznítil. (ŠTRAIT, 2016 str. 36)

Příčiny havárie:

1) lidská chyba, nedbalost při práci s otevřeným ohněm,
2) konstrukční vada, neoddělené havarijní systémy.

Politické dopady – nejsou známy.

Ekonomické dopady – náklady na hašení, náklady na opravu a znovu vybudování kabelových tras, ztráta z nevýroby.

Sociálně-kulturní dopady – nejsou známy.

Technologické dopady – nejsou známy.

Právní dopady – komise pro jaderný dozor na základě tohoto požáru doplnila normy požární ochrany o dodatek R, což mělo zásadní význam pro úpravy požárních uzávěrů a materiálů na ně používaných.

Ekologické dopady – nejsou známy.

5.1.6 Jaslovské Bohunice

Země – Československo, dnes Slovensko

Datum události – 5. leden 1976

Hodnocení INES – 2

Typ havárie – únik chladiva

Popis havárie – havárie elektrárny A-1 s reaktorem KS-150 sovětského typu. Při výměně palivového článku obsluha nedostatečně uzamkla těsnící zátku jednoho z palivových kanálů. Zátka povolila, palivový článek s těsnící i stínící zátkou vystřelil do reaktorového sálu a došlo k úniku oxidu uhličitého a menšímu úniku radioaktivity do prostoru reaktorovny, viz obrázek 17. V té době na reaktorovém sále pracovali tři pracovníci, všem se podařilo z reaktorového sálu utéct. Poté došlo k zaplavení hlavního výrobního bloku unikajícím oxidem uhličitým. (ŠTRAIT, 2016 str. 35)

Obrázek 17 Vystřelený palivový soubor

Zdroj: badatele.net

Na žádost inženýra, který vedl likvidaci havárie, se do reaktorového sálu vrátili dva zaměstnanci v dýchacích přístrojích. S pomocí zavážecího stroje znovu zazátkovali palivový kanál, čímž zabránili dalším únikům radioaktivity. (VIČAR, a další, 2020 str. 168)

V celé reaktorovně byla vyhlášená evakuace, téměř všem pracovníkům se podařilo reaktorovnu opustit, uvnitř zůstali pouze dva pracovníci, oba se oxidem uhličitým udusili. Informace o havárii byly zveřejněny až po roce 1989. (ŠTRAIT, 2016 str. 35)

Provozní předpisy s takovýmto typem havárie nepočítaly, proto na ní pracovníci nebyli připraveni a museli improvizovat. Z toho důvodu udělali také několik chyb. Nejzávažnější chybou bylo snížení otáček turbokompresoru z 3000 ot/min na 600 ot/min, což mělo za následek patnáctinásobné snížení intenzity chlazení, které nedostatečně odvádělo zbytkový výkon reaktoru. Bylo potřeba provést utěsnění reaktoru, což provedli pracovníci v dýchacích přístrojích. Po utěsnění reaktoru začala teplota v aktivní zóně klesat. Nejvyšší naměřená teplota paliva byla 571 °C, ale rychlost nárůstu byla asi 600 °C/h. Palivo se začíná tavit při 1132 °C, přesto bylo při havárii několik palivových článků nataveno.

Příčinou havárie byla nesprávná činnost pracovníků při výměně paliva. Následnou kontrolou bylo zjištěno nesprávné zajištění na dalších sedmi zátkách palivových kanálů a několik dalších nedostatečně provedených operací. (HEZOUČKÝ, 2008 stránky 292-294)

Příčiny havárie:

1) lidská chyba, nesprávně provedená manipulace,
2) konstrukční vada, nevhodné provedené těsnící zátky palivových kanálů,
3) lidské chyby způsobené nepřipraveností na havárii.

Politické dopady – nejsou známy.

Ekonomické dopady – náklady na dekontaminaci, náklady na opravu zhavarovaného zařízení, ztráta z nevýroby.

Sociálně-kulturní dopady – dva pracovníci zemřeli udušením oxidem uhličitým. Většina ze zhruba 60 pracovníků v reaktorovně dostala velmi malé dávky radiace, větší dávky dostali pouze tři pracovníci z reaktorového sálu.

Technologické dopady – byly provedeny úpravy reaktoru.

Právní dopady – nejsou známy.

Ekologické dopady – únik radiace a její dopad na personál byl mnohem menší něž se při takto masivním úniku chladiva dalo předpokládat. Radioaktivita v reaktorovně sice několikanásobně převyšovala tehdejší limity, ale během 24 hodin byla téměř všechna

vyventilována mimo elektrárnu, ani tím však nebyly výrazně převýšeny tehdejší hygienické limity. (HEZOUČKÝ, 2008 str. 294)

5.1.7 Jaslovské Bohunice

Země – Československo, dnes Slovensko

Datum události – 22. únor 1977

Hodnocení INES – 4

Nejzávažnější jaderná havárie na území Československa.

Typ havárie – roztavení části aktivní zóny

Popis havárie – havárie v elektrárně A-1, která měla reaktor KS-150 sovětského typu. Při výměně paliva obsluha nedostatečně odstranila silikagel, který chrání palivo před vlhkostí. V důsledku ucpaného palivového článku nemohlo chladicí médium, v tomto případě plyn, volně proudit, což způsobilo tavení paliva, viz obrázek 18. Následně se poškodila nádoba s tlakovou vodou, a došlo k úniku radioaktivity přes sekundární okruh až do parogenerátorů na strojovně. Havárií byla poškozena čtvrtina reaktoru. (ŠTRAIT, 2016 str. 35)

Informace o havárii opět nebyly zveřejněny. Skutečný rozsah nehody, jejich příčin, průběhu a následků není zveřejněn ani v současnosti. (VIČAR, a další, 2020 str. 169)

Příčiny havárie:

1) lidská chyba, nesprávně provedená manipulace.

Politické dopady – nejsou známy.

Ekonomické dopady – náklady na dekontaminaci, náklady na likvidaci zhavarovaného zařízení, náklady na novou elektrárnu a reaktor typu VVER, ztráta z nevýroby.

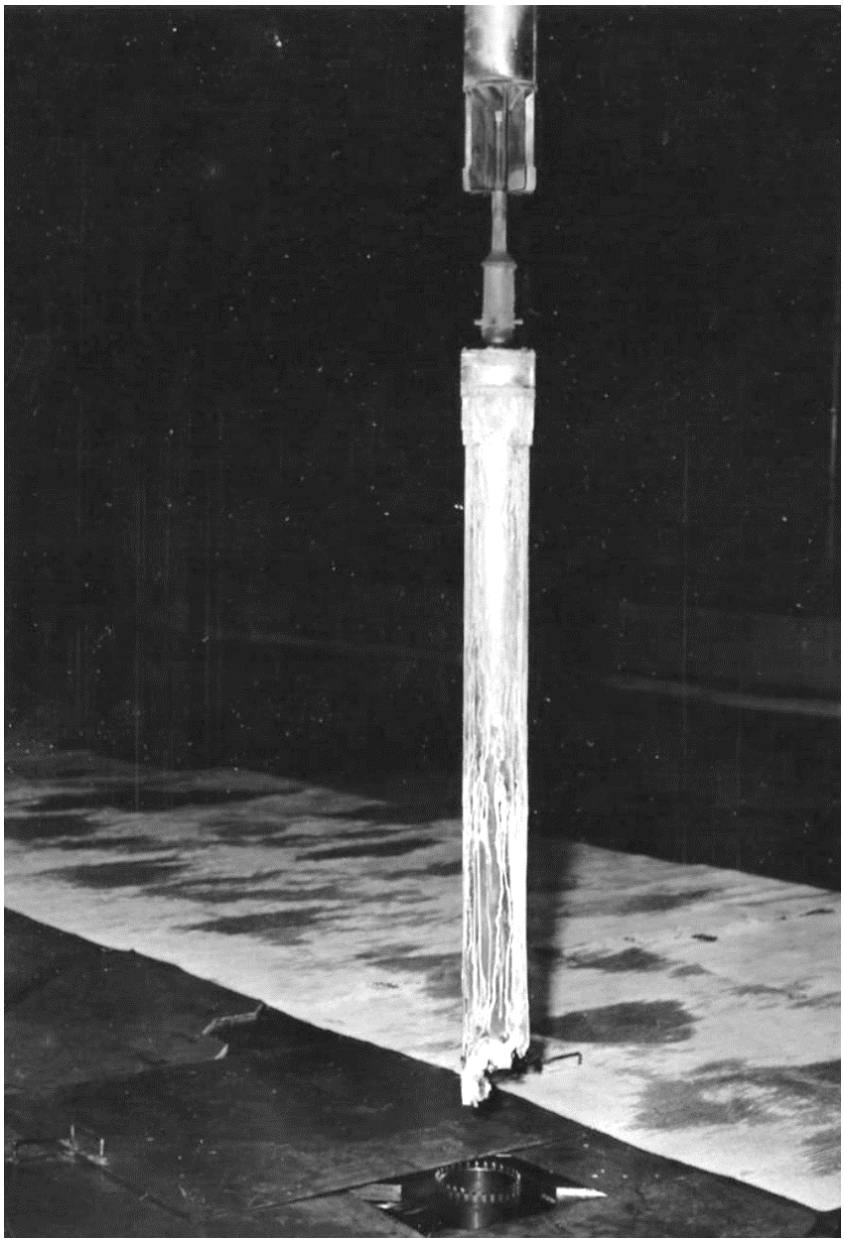
Sociálně-kulturní dopady – menší počet pracovníků byl vystaven vyšší radiační expozici.

Technologické dopady – v roce 1979 bylo rozhodnuto o likvidaci reaktoru, která má probíhat až do roku 2050. Elektrárna A-1 byla nahrazena elektrárnou V1 s novým reaktorem typu VVER.

Právní dopady – nejsou známy.

Ekologické dopady – ačkoliv se oficiálně uvádí že mimo elektrárnu radioaktivita neunikla, ani nedošlo k ozáření osob, M. Plevák ve své studii uvádí že do životního prostředí uniklo

asi 0,1 Ci radioaktivních látek a ve vzdálenosti jedenáct km od elektrárny v trávě naměřil kontaminaci cesiem okolo 500 Bq/kg. (ŠTRAIT, 2016 str. 35)



Obrázek 18 Utavený palivový článek

Zdroj: badatele.net

5.1.8 Brunsbüttel

Země – Německá spolková republika

Datum události – 18. červen 1978

Hodnocení INES – nehodnoceno

Typ havárie – únik radioaktivity

Popis havárie – v důsledku netěsnosti v parovodním potrubí došlo k úniku přibližně 100 tun lehce kontaminované ostré páry do turbínové haly. Maximálně 2 tuny této páry unikly do volného ovzduší prostřednictvím krátkodobě otevřených otvorů ve střeše haly. (HOFFMEISTER, 1979 stránky 237-240)

Do pěti minut automatické systémy vše odstavily. Nicméně obsluha zasáhla do systému ochrany reaktoru a nepostupovala podle provozních pokynů, pokračovala v provozu zařízení další tři hodiny. Vyšetřování ukázalo, že takové jednání bylo běžné již dříve z důvodu ekonomických zájmů. (ŠTRAIT, 2016 str. 37)

Příčiny havárie:

1) technická závada, netěsnost parovodu,
2) lidská chyba, nedodržování provozních předpisů.

Politické dopady – nejsou známy.

Ekonomické dopady – náklady na dekontaminaci, náklady na opravu, ztráta z nevýroby.

Sociálně-kulturní dopady – nejsou známy.

Technologické dopady – na základě důkladného vyšetřování úřady, havárie vyvolala celou řadu technických a organizačních protiopatření.

Právní dopady – havárie a její následky mají dalekosáhlý význam pro otázky provozu jaderných elektráren přesahující rámec konkrétního případu.

Ekologické dopady – unikl především radioaktivní jód, ale radiologický dopad incidentu byl malý. (HOFFMEISTER, 1979 stránky 237-240)

5.1.9 Three Mile Island

Země – Pensylvánie, USA

Datum události – 28. březen 1979

Hodnocení INES – 5

Typ havárie – roztavení části aktivní zóny

Popis havárie – ostrov Three Mile Island, na kterém je vybudována stejnojmenná elektrárna, leží přibližně 16 km od hlavního města státu Pennsylvania, Harrisburgu a nachází se na řece Susquehanna.

Jaderná elektrárna Three Mile Island obsahovala dva tlakovodní reaktory o výkonu 1000 MW. Provozovala jí Metropolitní Edisonova společnost (MEC). V době, kdy se nehoda stala byl druhý reaktor v provozu teprve tři měsíce, ale měl za sebou již několik závad. MEC se totiž snažila uspěchat spuštění elektrárny. Spuštění do konce roku 1978 pro MEC znamenalo úsporu na daních ve výši 100 milionů USD.

28. března 1979 došlo na druhém bloku elektrárny k poruše čerpadla sekundárního okruhu. Turbína, která byla spojena s porouchaným čerpadlem, se sice automaticky odpojila a přestala vyrábět elektrickou energii, ale reaktor pracoval stále na plný výkon. V hlavním chladicím potrubí se začala zvyšovat teplota a tlak. Bezpečnostní systémy zareagovaly otevřením přetlakového pojistného ventilu, čímž se vyrovnal tlak v potrubí a následně se odstavil reaktor.

Poté došlo k řetězení nepříznivých událostí.

Přestože kontrolka na řídícím pultu naznačovala, že je pojistný ventil zavřený, zůstal zaseknutý v otevřené poloze,

Tlak v potrubí začal klesat. Radioaktivní chladící voda, proudící otevřeným ventilem, přetekla z nádrže a zaplavila okolí reaktoru.

Náhradní čerpadla pro chlazení reaktoru byla v tu dobu odstavena z důvodu probíhající údržby.

Do blokové dozorny začalo přicházet velké množství varovných údajů, a obsluha je nestihla vyhodnocovat. Na indikátor signalizující nefunkčnost náhradních čerpadel si někdo odložil papíry tak, že nebyly vidět.

I když byl reaktor odstavený, stále pracoval na 6 % výkonu. To stačilo k tomu, aby se začal zahřívat. Bezpečnostní systémy aktivovaly havarijní čerpadla, která začala do reaktoru dodávat chladící vodu. Bohužel obsluha jedno z těchto čerpadel zastavila, protože situaci opětovně nesprávně vyhodnotila. (ŠTRAIT, 2016 str. 75)

V reaktoru stoupla teplota až na 5200 °C a hrozila exploze. Popraskaly palivové tyče, aktivní zóna se začala tavit a radioaktivní plyny pod tlakem unikaly do atmosféry.

Selhaly filtry, které měly radioaktivní částice zachytit.

Selhávala telefonická komunikace mezi elektrárnou, guvernérem státu a Komisí pro jaderný dozor ve Washingtonu.

Na doporučení Komise pro jaderný dozor se po dvou dnech rozhodl guvernér evakuovat tříkilometrový okruh kolem elektrárny. Do té doby byly k odchodu vyzvány pouze těhotné ženy a děti předškolního věku, ostatní si měli pouze utěsnit okna a dveře.

Živelná evakuace se týkala 200 000 lidí, kteří stejně nevěřili, že je úřady a MEC informuji pravdivé.

V havarovaném reaktoru se po dvou dnech začala vytvářet vodíková bublina a vláda zvažovala vyklidit širokou oblast okolo elektrárny a evakuovat cca 500 000 ohrožených lidí.

Do řešení havárie se zapojil i prezident USA Jim Carter, vystudovaný jaderný fyzik. Dva dny po havárii do elektrárny přijel spolu s manželkou Roselin, aby situaci na místě posoudil a uklidnil, viz obrázek 19.

Obrázek 19 Prezident Jimmy Carter odjíždí z Three Mile Islandu

Zdroj: National Archives and Records Administration

Po havárii došlo k uzavření druhého bloku, ale první blok pracoval ještě měsíc, než ho také nakonec odstavili.

V havarovaném reaktoru došlo k roztavení poloviny aktivní zóny, což činilo asi 20 tun radioaktivního materiálu.

Vyšetřování nehody probíhalo formálně. Společnost MEC s vyšetřovateli nespolupracovala a záhadně ztratila záznamy z měřících zařízení. Síť pro monitorování radiace mimo elektrárnu nefungovala správně. Sběr vzorků pro vyšetřování byl prováděn narychlo a chaoticky. Dodnes chybí klíčové informace o příčinách a průběhu nehody. (ŠTRAIT, 2016 str. 76)

Příčinou havárie byl nevhodný zásah obsluhy, zmatek a množství údajů, které v dané chvíli nešlo vyhodnotit. (ŠTRAIT, 2016 str. 75)

Zpráva prezidentské vyšetřovací komise poukazovala na mnoho nedostatků.

Pracovní předpisy pro zvládání mimořádných událostí byly při nejlepší vůli zavádějící a bylo možné je vykládat takovým způsobem, že operátoři neprovedli nesprávné kroky.

Bloková dozorna odkud se reaktor řídil byla nedostatečná. Většinu plochy zabíral obří panel se stovkami výstražných zařízení, ale některé klíčové ukazatele se nacházely mimo zorné pole operátorů.

Během několika prvních minut nehody přišlo do blokové dozorny přes 100 výstražných informací, a neexistoval systém který by umožnil nepodstatné odstavit a věnovat se důležitým.

K podobnému incidentu došlo již o rok dříve na jiné americké jaderné elektrárně, ale obsluha reaktoru v Three Mile Island o něm nebyla informována. (LEATHERBARROW, 2020 str. 38)

Celá havárie mohla dopadnout daleko hůř nebýt tlakové obálky reaktoru – kontejnmentu, mohutného kovového stínění, které reaktor obklopuje a popřípadě zadrží jeho roztavené radioaktivní zbytky. Černobylské RBMK-1000 tento životně důležitý kontejnment neměly. (LEATHERBARROW, 2020 str. 37)

Příčiny havárie:

1) zřetězení technických závad z důvodu uspěchaného spouštění,
2) konstrukční vada, nepřehledné ovládací pracoviště,
3) lidská chyba, někdo zakryl indikátor nefunkčních čerpadel,
4) lidské chyby způsobené obsluhou zařízení.

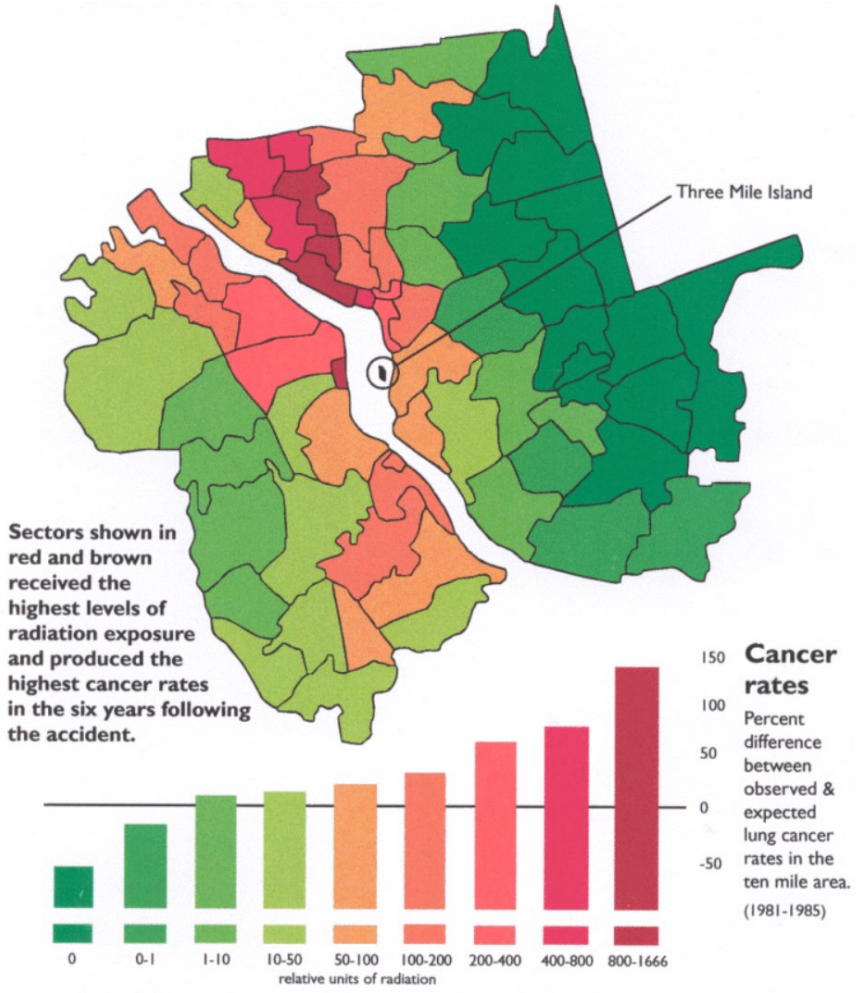
Politické dopady – nejsou známy.

Ekonomické dopady – náklady na likvidaci havárie, náklady na evakuaci a odškodné obyvatelům, náklady na dekontaminaci, náklady na likvidaci elektrárny, ztráta z nevýroby a zmařené investice do obou bloků jaderné elektrárny.

Dekontaminace a likvidace druhého bloku začala v srpnu 1979 a oficiálně skončila v prosinci 1993 s celkovými náklady asi 1 miliarda USD. (NY.Times, 1993)

První blok byl v roce 1985 opět spuštěn, ale v roce 2019 byl z provozu trvale vyřazen z důvodu provozních ztrát. Předpokládá se, že jeho likvidace potrvá do roku 2079 s odhadovanými náklady 1,2 miliardy USD. (PHILLIPS, 2020)

Sociálně-kulturní dopady – orgány USA havárii tajili dva dny, až potom došlo k evakuaci. (ŠTRAIT, 2016 str. 34)



Obrázek 20 Radiační znečištění a četnost výskytu rakoviny v okruhu 15 km od TMI

Zdroj: facingsouth.org

Z osmi kilometrové zóny byly nejprve evakuovány pouze těhotné ženy a děti. 30. března vláda dobrovolnou evakuační zónu rozšířila na 30 km a z okolí elektrárny se evakuovalo 200 000 lidí. Většina z nich se do svých domovů vrátila během tří týdnů.

Po havárii se mnoho lidí začalo potýkat s příznaky ozáření. Pociťovali silnou pachuť kovu v ústech, trpěli záněty kůže, pálením a slzením očí, měli trávicí potíže. (ŠTRAIT, 2016 str. 76)

Ředitel Institutu pro výzkum energie a životního prostředí Dr. Bernd Franke, prováděl v okolí havárie výzkumy a uvedl, že obyvatelé byli vystaveni mnohem vyšším dávkám radiace, než vláda oficiálně zveřejnila. (ŠTRAIT, 2016 str. 77)

Tomuto odpovídá i radiační znečištění a četnost výskytu rakoviny v okolí elektrárny, viz obrázek 20.

Technologické dopady – nehoda na Three Mile Islandu, podle IAEA, představovala významný mezník v celosvětovém rozvoji jaderné energetiky. (IAEA, 2004)

Počet reaktorů ve výstavbě, který do roku 1979 neustále rostl, začal po havárii v Three Mile Islandu klesat, začaly růst náklady na jejich výstavbu a zpožďovat se termíny dokončení výstavby reaktorů. (HULTMAN, a další, 2013 stránky 63-70)

Nehoda v Three Mile Islandu nezapříčinila zánik amerického jaderného průmyslu, ale zastavila jeho historický růst. V době nehody bylo naplánováno a schváleno 129 dalších jaderných elektráren, z nichž však bylo dokončeno pouze 53, a ostatní byly zrušeny. (GERTNER, 2006)

Právní dopady – nehoda vyvolala mezi aktivisty i širokou veřejností obavy o jadernou bezpečnost a vedla k novým předpisům pro jaderný průmysl. Díky nehodě také poklesly snahy o výstavbu nových reaktorů. Aktivisté protijaderného hnutí také vyjádřili obavy z dopadů havárie na zdraví v okolí elektrárny. (GOFMAN, 1979)

Americká veřejnost znepokojena havárií, uspořádala v následujících měsících po celé zemi mnoho protijaderných demonstrací. Největší se konala v New Yorku v září 1979 a zúčastnilo se jí 200 000 lidí. (HERMAN, 1979)

Ekologické dopady – v průběhu havárie uniklo do životního prostředí asi 2,5 MCi (93 PBq) radioaktivních plynů a přibližně 15 Ci (560 GBq) radioaktivního jódu. (ROGOVIN, 1980 str. 153)

Protijaderní aktivisté zpochybnily zjištění Kemenyho komise a tvrdily, že nezávislé měření dalo důkazy o úrovních radiace až sedmkrát vyšších, než je obvyklé, i v místech stovky km po větru od Three Mile Islandu. Antijaderný obhájce Arnie Gundersen řekl, že oficiálně uvedená čísla byla 100 až 1000krát podceněná. (STURGIS, 2009)

Do řeky Dudvah uniklo velké množství cesia a stroncia. Ve vodních rostlinách bylo naměřeno 67 kBq/kg cesia a 28 kBq/kg stroncia. Ještě v roce 1990 byla radioaktivita v okolí elektrárny 20krát vyšší než přirozené pozadí. (ŠTRAIT, 2016 str. 34)

Z důvodu tajení a manipulací s informacemi se dodnes neví, kolik ve skutečnosti při havárii uniklo radioaktivních látek. (ŠTRAIT, 2016 str. 77)

5.1.10 Rancho Seco

Země – Kalifornie, USA

Datum události – únor 1980

Hodnocení INES – nehodnoceno

Typ havárie – poškození zařízení

Popis havárie – dvoutunový kontejner spadl z jeřábu v reaktorové hale jen několik centimetrů od nádoby reaktoru. Elektrárna nehodu tajila šest let.

Příčiny havárie:

1) není známá.

Politické dopady – nejsou známy.

Ekonomické dopady – náklady na opravu, ztráta z nevýroby.

Sociálně-kulturní dopady – nejsou známy.

Technologické dopady – nejsou známy.

Právní dopady – nejsou známy.

Ekologické dopady – nejsou známy. (ŠTRAIT, 2016 str. 37)

5.1.11 Tsugura

Země – Japonsko

Datum události – 8. březen 1981

Hodnocení INES – 2

Typ havárie – únik radioaktivity

Popis havárie – v jaderné elektrárně Tsugura došlo k přetečení nádrže určené pro skladování vyhořelého paliva, čímž se radioaktivní voda dostala do mořského zálivu Wakasa. Firma JAPCO, provozovatel elektrárny, se pokusila o zatajení této havárie. Později se ukázalo, že obsah radioaktivního kobaltu a manganu ve vodě byl 250krát vyšší než údaje, které firma původně uvedla.

Příčiny havárie:

1) není známá.

Politické dopady – nejsou známy.

Ekonomické dopady – náklady na dekontaminaci, náklady na opravu zařízení, ztráta z nevýroby.

Sociálně-kulturní dopady – více než 100 pracovníků bylo při opravě elektrárny Tsuruga vystaveno dávkám záření vyšším, než povoloval limit.

Technologické dopady – nejsou známy.

Právní dopady – nejsou známy.

Ekologické dopady – uvolnění většího množství radioaktivních materiálů do Japonského moře. (ŠTRAIT, 2016 str. 36)

5.1.12 Černobyl

Země – Sovětský svaz, dnes Ukrajina

Datum události – 26. duben 1986

Hodnocení INES – 7

Nejzávažnější jaderná havárie v historii.

Typ havárie – totální havárie

Popis havárie – černobylská jaderná elektrárna měla oficiální název Jaderná elektrárna V. I. Lenina. V době svého vzniku byla v Sovětském svazu i v celém Východním bloku považována za technologicky nejvyspělejší elektrárnu, a zároveň i za nejbezpečnější. Ačkoliv v té době se již běžně ve světě budovaly reaktory typu VVER, sovětská vláda vybrala typ RBMK. Měla k tomu několik důvodů. Tyto reaktory byly mnohem levnější, nevyžadovaly tak přesnou výrobu, byly schopny fungovat s téměř přírodním uranem, a v neposlední řadě produkovaly suroviny pro výrobu jaderných zbraní. (PLOKHY, 2019 str. 49)

V době havárie měla elektrárna čtyři funkční bloky, spuštěné v letech 1977 až 1983, další tři bloky byly ve výstavbě a stavba několika dalších se ještě uvažovala, celkem jich mělo být 12.

Reaktor RBMK 1000 se skládal z válové ocelové nádoby o průměru 10 metrů a výšce 7 metrů, uložené v betonovém bloku téměř 22 metrů dlouhém, 22 metrů širokém a 26 metrů vysokém. Byl naplněný grafitovými bloky, které plnily funkci moderátoru. Vrchní a spodní konce válce byly vybaveny dvěma masivními betonovými deskami, které sloužily jako biologické štíty. V tlakových kanálech reaktoru bylo 1661 palivových tyčí, každá přibližně 3,5 metru dlouhá, naplněná palivovými tabletami s obohaceným uranem U_{235} a přírodním uranem U_{238}. Dále v něm bylo 211 pohyblivých regulačních tyčí vyrobených z karbidu bóru, které absorbovaly neutrony a které dokázaly štěpnou reakci zpomalit nebo zrychlit. Chlazení zajišťovaly dvě chladicí smyčky, které ohřátou vodu odváděly do parních bubnů, kde byla pára od vody oddělována a přiváděna na turbíny vyrábějící elektrickou energii. (PLOKHY, 2019 str. 62)

Z důvodu finanční úspory, elektrárně chyběly některé důležité bezpečnostní prvky. Mezi nejvýznamnější patřila absence kontejnmentu a absence lapače aktivní zóny.

Sovětské jaderné elektrárny se vyznačovali značnou nespolehlivostí, jen v Černobylské JE došlo před osudovou havárií, několika dalším.

V roce 1982 došlo na 1. bloku černobylské elektrárny k částečnému roztavení aktivní zóny z důvodu uzavřeného ventilu chladícího okruhu. Po spuštění reaktoru se jádro reaktoru částečně roztavilo. Rozsah škod byl relativně malý a při nehodě nikdo nezahynul. Kvůli technologické nekázni byla nehoda několik hodin tajena, což mělo za následek únik radiace s párou z reaktoru ventilačním komínem. Nehoda byla přiznána až po pádu Sovětského svazu, přestože v elektrárně a v jejím okolí probíhaly dekontaminační práce. Po osmi

měsících byl reaktor opraven a znovu uveden do provozu. (HIGGINBOTHAM, 2020 stránky 69, 70, 112)

K dalším dvěma vážným incidentům došlo v Černobylu v roce 1984 na 3. a 4. bloku. Informace o těchto nehodách byly zveřejněny až v roce 2021 v odtajněných dokumentech KGB. Podle stejných dokumentů bylo vládě Sovětského svazu již v roce 1983 známo, že jaderná elektrárna Černobyl je jednou z nejrizikovějších jaderných elektráren v rámci SSSR. (GOLOVINA, 2021)

Havárie 26. dubna 1986

Na RB 4 jaderné elektrárny Černobyl, stále nebyla provedena zkouška, která měla ověřit, zda turbogenerátor bude schopen napájet cirkulační čerpadla chladícího okruhu alespoň po dobu 40 vteřin, v případě rychlého odstavení turbíny. Z toho důvodu se jí zástupce hlavního inženýra rozhodl provést před plánovanou odstávkou pro pravidelnou údržbu a výměnu paliva.

Zkouška byla v průběhu dne několikrát odkládána, zahájena byla až pozdě večer a směna, která ji měla provést, stihla pouze několik málo přípravných úkolu, jako snížení výkonu reaktoru a odstavení systému havarijního chlazení a jednoho turbogenerátoru. Nová směna ve zkoušce pokračovala, i když s ní nebyla seznámena a nepřipravena na ní. Měli provést další snížení výkonu, ale z důvodu chyby obsluhy klesl výkon reaktoru téměř na nulu. V tomto okamžiku měla být zkouška ukončena a měl být reaktor odstaven, protože se dostal do extrémně nestabilního stavu. Protože zadaný úkol ještě nebyl splněn, rozhodli se operátoři pokračovat ve zkoušce.

Udržet parametry reaktoru na požadovaných hodnotách se operátorům nedařilo. Aby ho dosáhli a udrželi, rozhodli se z aktivní zóny vytáhnout další regulační tyče. To mělo za následek zvýšení chlazení aktivní zóny, a tím další pokles reaktivity. Výkon reaktoru opět klesl. Protože operátoři chtěli zkoušku dokončit za každou cenu, bylo nutné výkon reaktoru zvýšit, proto se opět rozhodli vytáhnout z reaktoru další regulační tyče. V tomto okamžiku jich měli v aktivní zóně pouze 6 nebo 8, ačkoliv provozní předpis požadoval minimálně 30 tyčí. Touto manipulací se operátorům podařilo výkon reaktoru dostat na asi 200 MWt, ale zároveň do velice nestabilního stavu, kdy i drobná změna některého z provozních parametru, jako třeba tlak nebo průtok chladící vody mohla výkon reaktoru prudce snížit, nebo naopak zvýšit. V tomto okamžiku operátoři udělali další zásadní chybu, odstavili

havarijní signál, který by reaktor automaticky odstavil, po zastavení přívodu páry na turbínu. Odstavení tohoto havarijního systému bylo navíc v rozporu s plánem zkoušky.

Nyní operátoři zahájili samotnou zkoušku uzavřením přívodu páry na turbogenerátor, který ihned začal zpomalovat. To mělo za následek snížení výkonu čerpadel chladícího okruhu, a to nárůst teploty a tlaku v reaktoru. V aktivní zóně se začalo vyvíjet obrovské množství páry a raketově růst reaktivita a sní i výkon reaktoru. Protože v reaktoru bylo nedostatečné množství regulačních tyčí, nebyl bezpečnostní systém schopen zabránit dalšímu nárůstu výkonu, který začal růst nekontrolovatelně. V této chvíli jeden z operátorů stiskl tlačítko AZ-5, což znamenalo nouzové odstavení reaktoru. (SUJB, 2021)

Výkon reaktoru, který se do té doby pohyboval stále okolo 200 MWt, během několika sekund narostl na více než 500 MWt, a poté dle odhadu vyletěl na více než 30 000 MWt, což je desetinásobek normy. Toto byl okamžik, kdy blížící se havárii již nemělo co odvrátit. Výkon reaktoru dále prudce narůstal, začala se tavit aktivní zóna, teplota a tlak v reaktoru stoupal za únosnou mez.

26. dubna 1986 v 1:23:44 došlo k výbuchu reaktoru způsobenému tlakem páry. Výbuch roztrhl plášť reaktoru a vymrštil horní biologický štít reaktoru přes střechu 4. bloku. Horní biologický štít, kterému operátoři říkali Jelena, byl vyroben z betonu a vážil 200 tun, přistál zpět na reaktoru, ale nezakryl ho úplně ale zanechal díru, jíž volně unikalo záření do prostoru.

K dalšímu, mnohem silnějšímu výbuchu, došlo po asi dvou vteřinách od výbuchu prvního.

Druhý výbuch způsobil značné poškození budovy 4. bloku a rozptýlil části aktivní zóny do vzduchu, viz obrázek 21. Vysoce radioaktivní kusy grafitu se dostaly až na střechu sousedního 3. bloku a byly také rozhozeny po celém okolí elektrárny. Uvnitř havarovaného reaktoru došlo k požáru grafitu, který začal do okolního prostředí a chrlit další radioaktivní částice. (PLOKHY, 2019 stránky 77-78)

Čím byl druhý výbuch způsoben nebylo objasněno. Mohlo se jednat o explozi způsobenou reakcí vodíku se vzduchem, nebo také mohlo jít o důsledek druhé výkonové exkurze. (SUJB, 2021)

Určit jednu konkrétní příčinu, která vedla k této doposud nejhorší jaderné katastrofě, není zcela jednoduché.

Obrázek 21 Zhavarovaný 4. RB

Zdroj: IEAE

Sovětský svaz našel viníky poměrně rychle. Již pár dnů po nehodě vládní komise pro vyšetřování příčin katastrofy uvedla, že k explozi reaktoru došlo během zkoušky turbíny, v důsledku porušení technologických postupů obsluhou elektrárny. Jako příčinu tedy určila technologickou nekázeň a nesprávné postupy provozních pracovníků. Měla k tomu své důvody, v komisi byli především představitelé moskevských výzkumných ústavů, které reaktor navrhly. Pokud by za příčinu určili konstrukční chyby reaktoru, mohli by být za nehodu spoluodpovědní. (PLOKHY, 2019 str. 210)

O tom že reaktor typu RBMK má zásadní konstrukční chybu se v odborných kruzích v Sovětském svazu nějakou dobu vědělo. Některé reaktory ji již měly opravenou, na 4. bloku Černobylské jaderné elektrárny se na opravu teprve čekalo. Šlo o to, že hroty regulačních tyčí byly vyrobeny z grafitu. Při spouštění regulačních tyčí do reaktoru, do aktivní zóny vždy nejprve vstoupily grafitové hroty, a až potom bórové regulační tyče. Důsledkem toho byl efekt pozitivní reaktivity, což znamenalo nárůst štěpné reakce a krátkodobé zvýšení výkonu. Při stisknutí tlačítka AZ-5 a rychlém zasunutí všech regulačních tyčí do aktivní zóny se místo očekávaného snížení výkonu reaktoru grafitové hroty podílely na jeho dalším nárůstu. Než

do aktivní zóny vstoupily bórové části regulačních tyčí, došlo již k prvnímu výbuchu. (DIMITREV, 2023)

K nehodě tedy došlo v důsledku jak hrubého porušení technologické kázně ze strany provozních pracovníků, tak z důvodu závažných nedostatků v konstrukci reaktoru. (HANDRLICA, 2012 str. 56)

Na vině také byla celkově nízká kultura bezpečnosti, a to jak na národní, tak na místní úrovni. Na jaderných elektrárnách v Sovětském svazu se moc nehledělo na dodržování bezpečnostních norem, některé typy elektráren dokonce měly prvky nebo systémy již tenkrát považované za nebezpečné. O tom, že by byla prováděná bezpečnostní analýza a její výstupy se zapracovávaly do provozní dokumentace se nedá ani uvažovat, a samozřejmě se neprováděla ani zpětná vazba mezi operátory a projektanty. Nejinak tomu bylo na černobylské elektrárně, kde bylo zjištěno ještě mnoho dalších pochybení. (IAEA, 1992 stránky 25-26)

Na rozvoji mimořádné situace a velikosti dopadů však významnou roli hrály další aspekty.

V první řadě to bylo dlouhodobé a vytrvalé zapírání Sovětského svazu, že na jejich území k nějaké radiační havárii došlo, a to jak před světem, tak před vlastním obyvatelstvem. Z toho důvodu byla pozdě provedena evakuace uzavřené zóny, ve městě Kyjev byl přes výrazný nárůst radiace pořádán Prvomájový průvod a další akce. Totalitní režim měl větší strach z reakce Západu a vzniku paniky, něž o život vlastních občanů.

Dalším bylo podceňování následků havárie. Ještě několik hodin po výbuchu si nikdo nepřipouštěl, že by mohlo dojít k výbuchu reaktoru, ale pouze některého z pomocných systémů. Vrcholní představitelé strany havárii brali jako jednu z mnoha, které se v Sovětském svazu stávaly. A ještě v první polovině května byli přesvědčeni, že reaktor do konce roku opraví a připojí k síti.

V neposlední řadě to byla absolutní nepřipravenost na havárii takového rozsahu. Stejně jako všichni ostatní ani Anatolij Ďatlov, zástupce hlavního inženýra, který experiment řídil, netušil, co se stalo. U opatření, jako shazování písku, bóru, olova a jílu do reaktoru, odčerpávání vody z reaktorovny, mražení půdy pod reaktorem, budování betonové desky pod reaktorem a dalšími, která v dobré víře prováděli, nevěděli, jaký budou mít dopad a prováděli je metodou pokus omyl. A především se na nich nebyli schopni dohodnout. (PLOKHY, 2019 stránky 91, 136, 173)

Havárie v Černobylu měla katastrofické následky, ale nechybělo mnoho a následky mohly být několikanásobně horší. Poprvé se reaktor probudil k životu 26. dubna večer, kdy na oblohu nad čtvrtým blokem třemi mohutnými výbuchy vymrštil velké množství radioaktivních látek. Po asi 10 dnech od havárie se začalo množství produktů uvolňovaných z reaktoru snižovat. 9. května však nad reaktorem náhle vyšlehl plamen a pak se objevila růžová záře. Opět nikdo nevěděl, co se v reaktoru stalo. Protože teplota v reaktoru narůstala rychlostí asi 200 °C za den, byly obavy, že by v reaktoru mohlo dojít k dalšímu výbuchu, podstatně silnějšímu, než byly ty 26. dubna, při nichž se do atmosféry uvolnilo asi deset procent jádra reaktoru. Pokud by bylo do vzduchu vymrštěno zbývajících 90 % jádra reaktoru, uzavřená zóna by musela být rozšířená až za město Kyjev, Ukrajina by se změnila v pustinu, a pro celou Evropu by se jednalo o globální katastrofu. Naštěstí k třetímu výbuchu nedošlo. Bohužel nemůžeme říct, že k němu nedošlo díky profesionální havarijní odezvě. Nedošlo k němu náhodou. (PLOKHY, 2019 stránky 114, 164, 178, 187)

Příčiny havárie:

1) lidské chyby, porušení technologických předpisů,
2) konstrukční vada, závažné nedostatky v konstrukci reaktoru,
3) lidská chyba, nerespektování a neplnění mezinárodních standardů,
4) lidské chyby způsobené nepřipraveností na havárii.

Politické dopady – havárie měla obrovské politické dopady. Stala se krátce poté, co Michail Gorbačov a Ronald Reagan zahájili diplomatická jednání ohledně jaderného odzbrojení. Sovětský svaz svojí politikou zamlčování, zapírání a bagatelizování informací o nehodě v Černobylu ztratil u západních partnerů vážnost, čímž se celý proces zkomplikoval.

Havárie, jako jeden z aspektů, nepřímo vedla k rozpadu Sovětského svazu a potažmo celého Východního bloku.

Sovětský svaz byl finančně vyčerpaný již před havárií v Černobylu. Odstraňování následků bylo pro něj finančně neúnosné. Další pokles životní úrovně a rozvrat státních financí se stal dalším z důvodů, proč se komunistický režim zhroutil.

Na Ukrajině v roce 1988 vznikla první ekologická organizace nazvaná Zelený Svět, která se stala klíčovým organizátorem masových demonstrací kvůli životnímu prostředí v Kyjevě v listopadu 1988. (SHCHERBAK, 1989 str. 182)

Později vzniklo hnutí za přestavbu Ruch, a mnoho dalších organizací zabývajících se životním prostředím, které kandidovaly v prvních svobodných volbách v Sovětském svazu od roku 1917. Z 2250 poslanců Sjezdu lidových poslanců jich přibližně 40 zastupovalo tyto organizace, a nejméně 300 dalších se o životním prostředí zmiňovalo ve svých programech.

V roce 1990 se na Ukrajině konal druhý sjezd hnutí Ruch. Hnutí změnilo program, z názvu odstranilo za přestavbu a za svůj hlavní cíl vyhlásilo nezávislost Ukrajiny. Ekologická část programu prošla kosmetickými změnami, ale už se nejednalo pouze ekologii, kvůli níž lidé na shromážděních proti režimu demonstrovali. Díky politickým svobodám, které si vydobyli na poli ekologie, teď mohli aktivisté začít prosazovat otázkou státní nezávislosti. Havárie v Černobylu zásadním způsobem podkopala základy, na nichž Sovětský svaz stál. (PLOKHY, 2019 stránky 249, 258)

Ekonomické dopady – havárie měla obrovské ekonomické dopady, konečný účet za havárii bohužel ještě stále nebyl vystaven.

Od prvních dnů začala havárie polykat obrovské množství finančních prostředků. Nejprve to byly prostředky a technika použitá při hašení požáru a shazování písku, bóru, olova a jílu do reaktoru. Dále náklady na vykopání tunelu pod reaktor, vybetonování desky a zamražení půdy bránící protavení roztaveného jádra do spodních vod, odstranění a uložení radioaktivního materiálu z areálu elektrárny, výstavbu sarkofágu, odstranění horní části kontaminované půdy, dekontaminaci a další práce v uzavřené zóně. Na ně navazovaly náklady na evakuaci, nouzové a později trvalé ubytování vysídlených obyvatel.

Dále to byly zmařené investice do zhavarovaného 4. bloku a dalších tří bloků, které byly v té době ve výstavbě, z nichž 5. blok byl z více jak ze 70 % hotov. Částečně ale i z bloků 1., 2. a 3. které byly později předčasně odstavené. Další náklady byly s opravou vážné konstrukční vady na ostatních reaktorech RBMK. Sovětský svaz po havárii v Černobylu také zvažoval vybavit všechny jaderné elektrárny kontejnmentem. Jejich výstavba však byla nesmírně nákladná, a to si skomírající komunistická ekonomika nemohla dovolit, proto před bezpečností opět zvítězily peníze.

Další obří ekonomickou ztrátou byla likvidace více jak 80 vesnic, a především 50tisícového města Pripjať, a také ztráta více než 2000 km² zemědělských a lesních pozemků. (PLOKHY, 2019 stránky 114, 158, 214)

Jaké byly celkové náklady na likvidaci havárie se ani dnes nedá vyčíslit. Celková suma bude součtem nákladů, které na likvidaci následků vynaložila Sovětská vláda, později vlády Ukrajiny, Běloruska a Ruské federace, ale také společenství zemí G-7, Evropské unie, USA a další.

V roce 1988 oznámil Sovětský svaz, že odstraňování následků havárie už stálo 11 miliard rublů. V roce 1988 byl směnný kurz rublu k dolaru takřka 1:1. V roce 2006 Michail Gorbačov přiznal, že náklady na likvidaci havárie si ve skutečnosti vyžádaly 18 miliard rublů. (LEATHERBARROW, 2020 str. 201)

Ruská federace, která byla následky havárie zasažena relativně nejméně a měla mnoho nerostných surovin, se s postčernobylskou krizí vyrovnala celkem bez problémů. Ukrajina a Bělorusko, země na nerostné suroviny chudé, tyto zdroje neměly. Proto byly na počátku 90. let 20. století nuceny zavést zvláštní daň z Černobylu, která v Bělorusku činila 18 % ze všech mezd vyplácených v nezemědělském sektoru a na Ukrajině 12 % z příjmu právnických osob. (PLOKHY, 2019 str. 278)

V roce 1995 se zástupci G-7, Evropské unie a Ukrajiny dohodli na memorandu, které slibovalo pomoc s vyřazením Černobylské jaderné elektrárny z provozu, výstavbou dvou bloků v jiných ukrajinských elektrárnách a další energetické projekty. Na odstavení elektrárny v Černobylu ukrajinská vláda dostala téměř půl miliardy UDS ve formě dotací a 1,8 miliardy USD jako úvěr, na výstavbu nových reaktorů v elektrárnách Rivne a Chmelnickij na západě Ukrajiny. (PLOKHY, 2019 str. 274)

V roce 1996 odhadli běloruští ekonomové celkovou cenu za Bělorusko na 235 miliard USD, což činilo třicet dva ročních rozpočtů jejich země v roce 1985. (PLOKHY, 2019 str. 213)

V roce 1997 se země G-7 zavázaly pomoct Ukrajině vybudovat, místo dočasného sarkofágu z roku 1986, nad zničeným 4. blokem černobylské elektrárny nový, stabilní a pro životní prostředí bezpečný kryt, viz obrázek 22. Pro tento účel byl u Evropské banky pro obnovu a rozvoj zřízen Fond pro kryt Černobylu (CSF), jehož členem a přispěvatelem je i Česká republika. Tento fond pro výstavu nového krytu získal již více než 1,6 miliardy EUR. (EuropeanBank, 2023)

Obrázek 22 Nový kryt

Zdroj: vlastní

Sociálně-kulturní dopady – podle oficiálního vyjádření Sovětské vlády měla havárie pouze dvě oběti na životech. Skutečnost však byla zcela jiná. Havárie v Černobylu opravdu způsobila dvě bezprostřední úmrtí, v průběhu dalších tří měsíců však zemřelo dalších 29 lidí na akutní nemoc z ozáření. Celkově bylo z Černobylu do moskevské specializované kliniky převezeno a ošetřeno 237 lidí. Z nich 134 trpělo příznaky akutní nemoci z ozáření. Již v té době sovětské orgány předpokládaly, že v budoucnosti z různých příčin souvisejících s ozářením zemře další 4000 lidí. Konečné počty úmrtí v důsledku Černobylu jsou velice těžce odhadnutelné. Současné odhady začínají na 4000 úmrtí odhadovaných agenturami OSN a končí na 90 000 podle Greenpeace International.

Na likvidaci následků havárie bylo do Černobylu povoláno 600 000 likvidátorů. Maximální dávka radiace pro specialisty byla 25 rem, pro vojáky byla stanovena na 45 rem. Průměrná dávka, kterou likvidátoři dostali, byla 12 rem, neboli stodvacetinásobek roční dávky považované Mezinárodní komisí pro radiologickou ochranu za bezpečnou. V následujících desetiletích pak počet úmrtí a výskyt vážných nemocí mezi likvidátory výrazně převýšil průměr v obecné populaci. (PLOKHY, 2019 stránky 185, 277)

Z oblasti okolo elektrárny bylo 27. dubna 1986 evakuováno 44 460 osob do čtyřiceti tří nedalekých osad. Byli ubytováni v kulturacích, školách a u lidí v domech a bytech. Ačkoliv evakuace měla být původně pouze na tři dny, obyvatelé Pripjati a vesnic uzavřené zóny se už domů nikdy nevrátili, viz obrázek 23. Evakuace byla velice zmatečná a často vedla k tomu, že došlo k rozdělení rodin, děti byly evakuovány do jedné vesnice, rodiče a prarodiče do jiné. Výběr cílových míst evakuace bohužel taktéž nebyl vhodně zvolen, a radiace v mnoha vesnicích, kam byli obyvatelé uzavřené zóny evakuování taktéž výrazně převyšoval hygienické normy. Ve třiceti kilometrové uzavřené zóně okolo Černobylské elektrárny zanikly všechny sociálně-kulturní struktury, a již nikdy nebudou obnoveny. Vesnice a města která zanikla z důvodu havárie už nikdy obnovena nebudou. (PLOKHY, 2019 stránky 130, 141)

Obrázek 23 Pripjať město duchů

Zdroj: vlastní

Havárie v Černobylu měla i velmi výrazné dopady na změnu veřejného mínění týkajícího se využívání jaderné energie pro výrobu elektřiny, a především bezpečnosti jaderných elektráren, a to nejen na Ukrajině a v Sovětském svazu, ale na celém světě. V Sovětském svazu se změna veřejného mínění, která vyvolala politické změny, stala jedním z faktorů jeho pádu. Blíže je to popsáno v odstavci Politické dopady.

Technologické dopady – v Sovětském svazu se upustilo od zprovoznění většiny nových jaderných elektráren, které se nacházely ve fázi plánování nebo výstavby. V některých případech byly elektrárny zcela zrušeny. Z důvodu nových a přísnějších předpisů bylo odstaveno a zrušeno i několik stávajících elektráren. Sovětská vláda nakonec upustila od dalšího vývoje reaktoru RBMK a s výjimkou rozestavěných reaktorů, je už opětovně nepoužila a přešla na podstatně bezpečnější typ VVER. (LEATHERBARROW, 2020 stránky 195-196)

Po havárii, se bezpečností sovětských jaderných elektráren zabývalo dokonce politbyro v Moskvě, které se shodlo na tom, že jaderný průmysl nutně vyžaduje vážnou reformu. Zvažovali reaktory RBMK rekonstruovat, což bohužel shledali finančně neefektivní. V té době bylo v provozu deset reaktorů černobylského typu v Sovětském svazu a dalších deset ve východní Evropě.

Politbyro se zabývalo různými bezpečnostními opatřeními, dokonce zvažovalo, zda další provozování atomových elektráren nebude horší než jejich uzavření. Ekonomický zisk bohužel zvítězil nad ekologií a bezpečností. (PLOKHY, 2019 str. 214)

Právní dopady – černobylská havárie měla i dalekosáhlé dopady v úrovni práva. Bylo potřeba reagovat na problémy, které havárie přinesla, a provést úpravy legislativy tak, aby se takováto havárie nemohla opakovat.

Krátce po černobylské havárii, MAAE v úzké spolupráci s dalšími organizacemi OSN vytvořila Mezinárodní černobylský projekt, který poskytl hodnocení radiologických následků havárie, a vyhodnotil ochranná opatření.

Ve stejném období MAAE vypracovala dvě úmluvy, které byly ratifikovány členskými státy. Jednalo se o Úmluvu o včasném oznamování jaderných havárií z roku 1986 a Úmluvu o pomoci v případě jaderné havárie nebo radiační mimořádné události taktéž z roku 1986. Tyto úmluvy zakládají mezinárodní rámec pro oznámení mimořádné situace, výměnu informací a poskytování mezinárodní pomoci na vyžádání. Úmluvy pověřují MAAE, aby jednala jako mezinárodní koordinátor těchto činnosti.

V roce 2003 založila MAAE ve spolupráci s vládami nejvíce postižených zemí, Běloruska, Ukrajiny a Ruska, a také s dalšími mezinárodními organizacemi, Černobylské fórum, z důvodu obnovy a radiologického hodnocení postižených oblastí. (IAEA, 2023)

Dalším výsledkem černobylské havárie je Úmluva o jaderné bezpečnosti přijatá ve Vídni v roce 1994, jejíž cílem je celosvětově dosahovat a udržovat vysokou úroveň jaderné bezpečnosti. (SUJB, 2021)

V roce 1988 byl přijat Společný protokol o aplikaci Vídeňské a Pařížské úmluvy.

V roce 1997 byla přijata Společná úmluva o bezpečnosti nakládání s vyhořelým jaderným palivem a o bezpečnosti při nakládání s radioaktivními odpady.

V roce 1997 byl přijat Protokol o doplnění Vídeňské dohody o odpovědnost za jaderné škody.

V roce 1997 byla přijata Úmluva o dodatečné kompenzace za jaderné škody.

V roce 2004 byl přijat Protokol o doplnění Pařížské úmluvy o odpovědnosti v jaderné energetice z roku 1960.

V roce 2004 byl přijat Protokol o doplnění Bruselské úmluvy, kterou se doplňuje Pařížská úmluva, z roku 1963.

V roce 2005 byl přijat Dodatek k Úmluvě o fyzické ochraně jaderných materiálů.

Všechny uvedené úmluvy jsou mnohostrannými úmluvami. (HANDRLICA, 2012 str. 61)

Vnímání využívání jaderné energie k výrobě elektřiny se po černobylské havárii změnilo nejen na Západě, ale v podstatě na celé zemi. V mnoha zemích západní Evropy vznikly, nebo zesílily protijaderné nálady. Černobylská havárie je jedním ze hlavních důvodů negativního postoje k jaderné energetice zemí jako je Německo, Rakousko, Itálie a mnoho dalších.

Itálie k dalšímu provozování jaderné energetiky vypsala v roce 1987 celostátní referendum, a další rozvoj zamítla. Švýcarsko zastavilo výstavbu na 10 let. Polsko, které o stavbě jaderné elektrárny uvažovalo, záměr zrušilo, a stejně tak i Nizozemí. Podobné tendence, rušit jadernou energetiku byly i mimo Evropu, například v Egyptě a Sýrii. (HANDRLICA, 2012 str. 56)

Ředitel jaderné elektrárny Viktor Brjuchanov byl z funkce ředitele odvolán již koncem května 1986. V červnu 1986 byl na schůzi politbyra v Moskvě Michailem Gorbačovem vyloučen z komunistické strany. V srpnu 1986 byl zatčen a v soudním procesu byl 29. července 1987 odsouzen na 10 roků odnětí svobody za to, že jako ředitel nezajistil, aby zaměstnanci elektrárny dodržovali technologickou kázeň a systematicky porušovali oficiální pokyny a ignorovali pokyny dozorčích orgánů.

Dále byli souzeni a odsouzeni, bývalý hlavní inženýr Nikolaj Fomin, jeho zástupce Anatolij Ďatlov, který řídil zkoušku, při které k nehodě došlo, vedoucí reaktorové divize elektrárny Oleksij Kovalenko, vedoucí noční směny, kdy se nehoda stala, Boris Rogožkin a úředník správy jaderné bezpečnosti Jurij Lauškin. Byli odsouzeni na 2 až 10 roků odnětí svobody.

Alexandr Akimov, který byl vedoucím směny na čtvrtém reaktoru v době výbuchu, souzen nebyl, protože zemřel 15 dnů po nehodě z důvodu absorbování asi 15 Gy záření. (PLOKHY, 2019 stránky 211, 212, 225, 230, 287)

Ekologické dopady – ekologické dopady byly celkově nejkatastrofičtějšími dopady celé havárie.

Reaktor od havárie 26. dubna do asi první poloviny května uvolňoval denně 4–6 MCi záření. Největší uvolněné množství bylo 5. května, odhaduje se na 8–12 MCi. (MEDVEDEV, 1992 str. 59)

Celkově katastrofa uvolnila do atmosféry asi 50 MCi záření, což zhruba odpovídá pěti stům bomb shozených na Hirošimu. K tomuto katastrofálnímu úniku stačilo uvolnění méně než 5 % jaderného paliva, které reaktor původně obsahoval. (PLOKHY, 2019 str. 9)

Úrovně radiace v elektrárně byly po výbuchu extrémně vysoké. Protože dozimetr s největším rozsahem, který měli k dispozici, narazil na limit stupnice 200 R/h, dá se předpokládat, že radiace byla vyšší. Později se odhadovalo, že trosky kolem poškozeného 4. bloku vyzařovaly radiační záření až na úrovni 10 000 R/h. (MEDVEDEV, 1992 stránky 74-89)

Podle zpráv KGB činila radiace v blízkosti 4. bloku 1. května 60 až 80 R/h, a 4. května vzrostla na 210 R/h. (PLOKHY, 2019 str. 167)

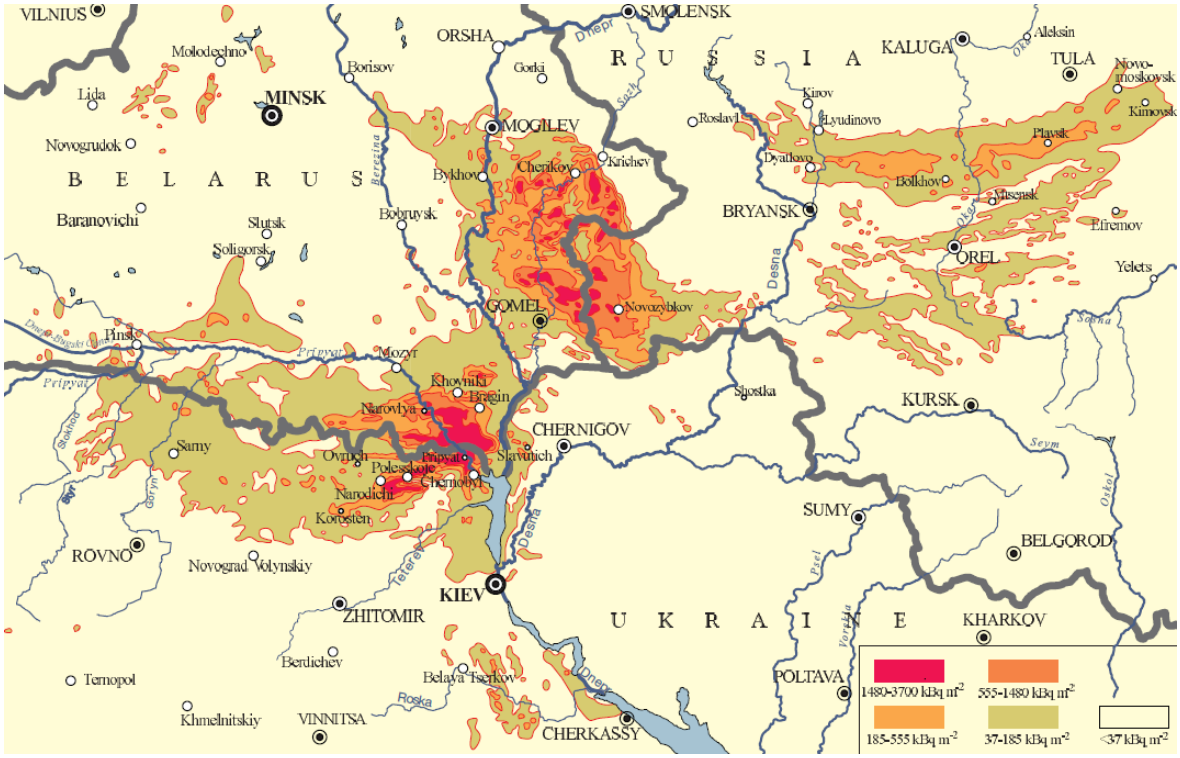
V Pripjati byla ráno 26.dubna 1986 úroveň radiačního záření 14 R/h, což je hodnota tisíckrát vyšší než přirozené pozadí. Ve dvě odpoledne se zvýšila desetkrát na 144 R/h a večer na 1150 R/h, což odpovídá 80 000násobku přirozeného pozadí. (PLOKHY, 2019 str. 103)

V Kyjevě vzdáleném od Černobylu asi 110 km, dosahovala v době povinných a masových Prvomájových oslav úroveň záření až 2,5 R/h. (PLOKHY, 2019 str. 154)

Lidé přesídlení z Pripjati a uzavřené zóny, byli umístění do vesnic a měst mimo uzavřenou zónu, bohužel i v těchto nových lokalitách radioaktivita na podzim roku 1987 běžně přesahovala hodnotu 1,5 R/h. (PLOKHY, 2019 str. 252)

V průběhu roku 1986, bylo z důvodu vysoké radioaktivní kontaminace, evakuováno a v pozdější době přesídleno z postiženého regionu více než 100 000 lidí. Po roce 1986

se ukázala nutnost přesídlit dalších 200 000 obyvatel z Běloruska, Ukrajiny a Ruska. I přes tyto rozsáhlá opatření, zůstává v zóně s vysokou radiací stále zhruba 5 milionů obyvatel. (SUJB, 2021)

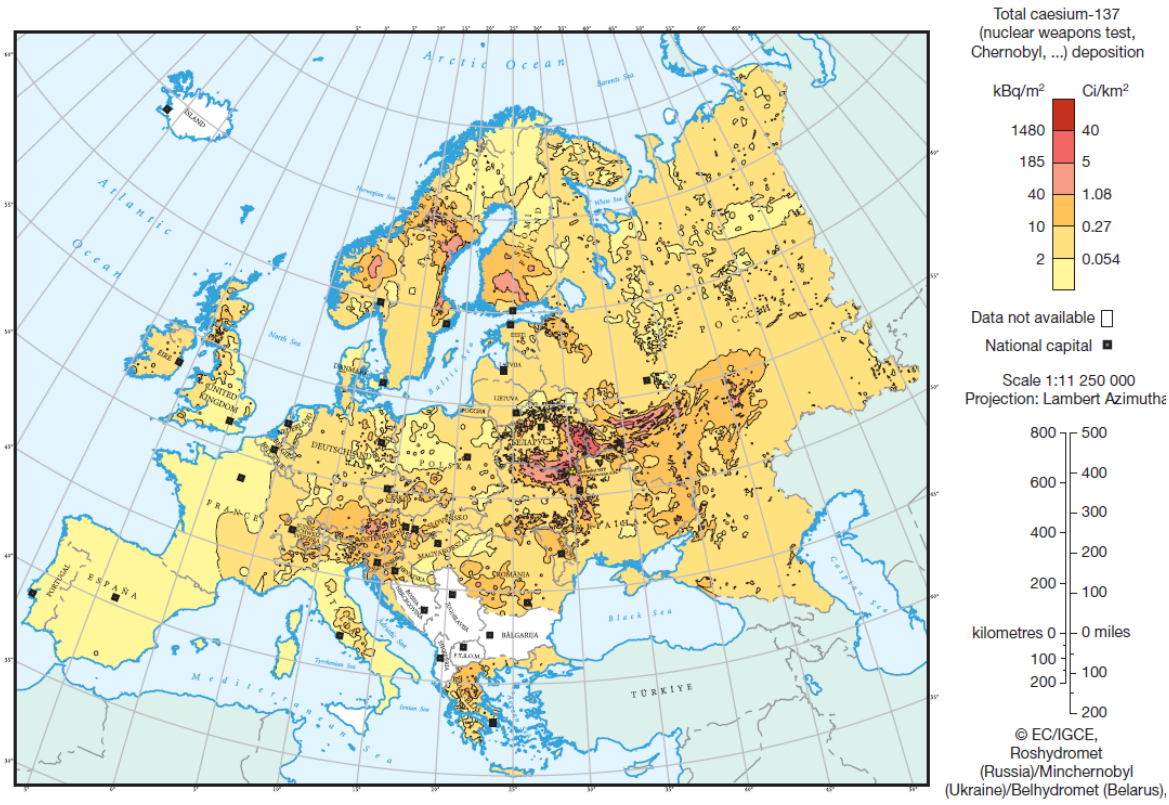


Obrázek 24 Povrchová kontaminace cesiem v okolí místa havárie

Zdroj: IAEA

Kontaminace z černobylské havárie nebyla rozptýlena pravidelně, ale v závislosti na povětrnostních podmínkách, viz obrázky 24 a 25. Velká část spadla v horských oblastech, jako jsou Alpy, a pohoří ve Švédsku, Norsku, Anglii a Skotsku, kde ochlazení způsobilo radioaktivní srážky. Výsledná místa kontaminace byla často vysoce lokalizovaná. Došlo i ke kontaminaci podzemních vod. (GOULD, 1990 stránky 43, 44, 78)

Ke kontaminaci došlo v celé Evropě. Některé země byly zasaženy více jiné méně. Nejzasaženější bylo Bělorusko s 46 500 km^2, což činí přes 22 % jejich území. Další byla Ukrajina s 41 900 km^2, což činí asi 7 % jejich území, a Rusko s 57 900 km^2, což činí ani ne 1 % jejich území. Dále následovalo Švédsko s 12 000 km^2, Finsko s 11 500 km^2, Rakousko s 8 600 km^2, Norsko s 5 200 km^2, Bulharsko s 4 800 km^2, Švýcarsko s 1 300 km^2, Řecko s 1 200 km^2, Slovinsko s 300 km^2, Itálie s 300 km^2, a Moldavsko s 60 km^2.



Obrázek 25 Povrchová kontaminace cesiem v Evropě

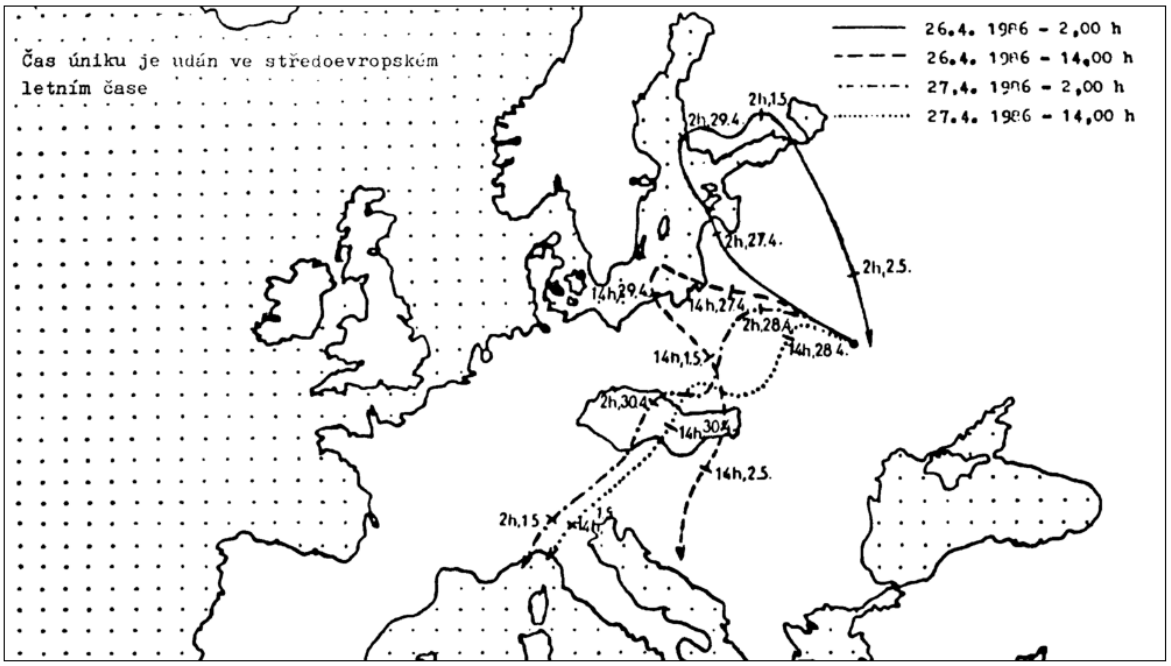
Zdroj: IAEA

V dalších zemích včetně Československa, byly kontaminovány menší rozlohy. Celkově v Evropě bylo kontaminováno 191 560 km^2, což odpovídá zhruba 2,5násobku rozlohy České republiky. (IAEA, 2006 stránky 23-25)

Dodnes uzavřená zóna s omezeným a kontrolovaným vstupem pokrývá více než 2000 km^2, což rozlohou odpovídá asi dvěma bývalým okresům v České republice. (PLOKHY, 2019 str. 159)

V Československu mohli být občané v roce 1986 vystaveni záření 19–20 mSv. Místy mohlo dojít k větším odchylkám. (ŠTRAIT, 2016 str. 52)

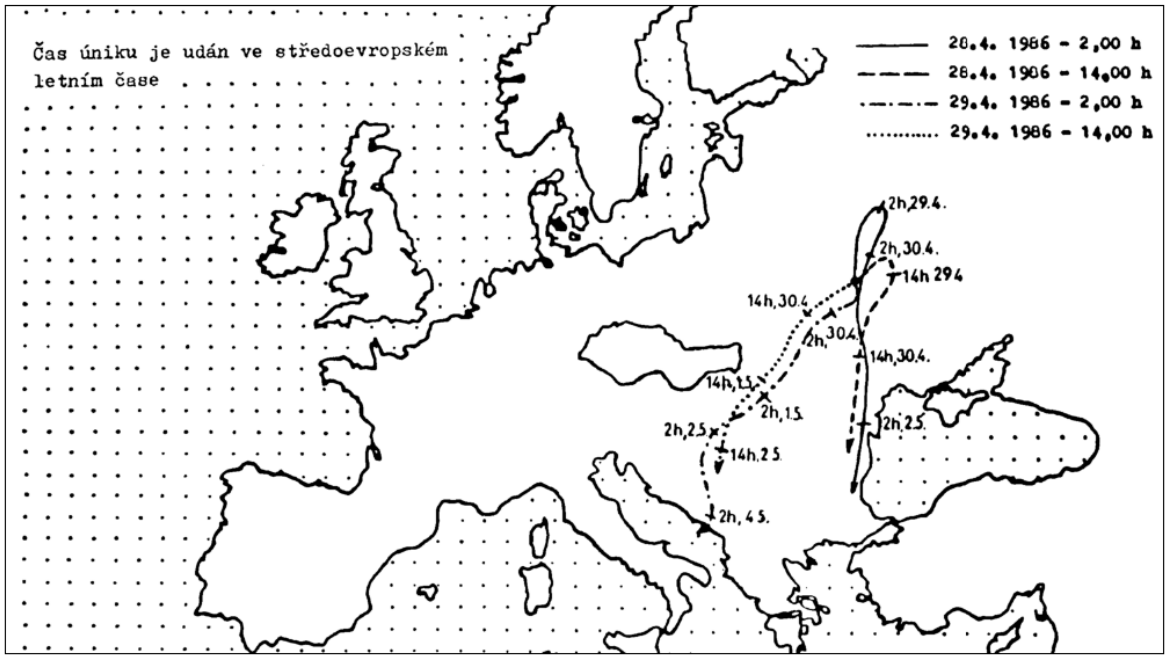
Obrázek 26 zobrazuje trajektorie vzdušných hmot obsahujících uniklé radionuklidy z Černobylu, které způsobily první zvýšení radioaktivity v Československu ve dnech 29. dubna až 1. května 1986. (KUNZ, 1987 str. 117)



Obrázek 26 Trajektorie vzdušných hmot

Zdroj: Zpráva o radiační situaci po havárii v Černobylu

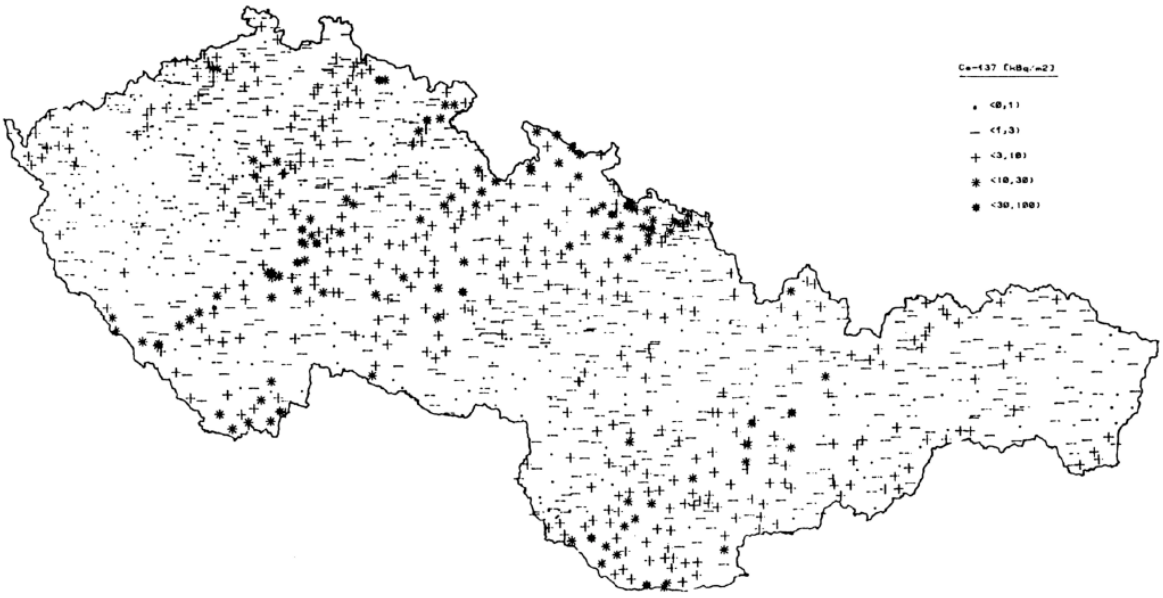
Obrázek 27 zobrazuje trajektorie vzdušných hmot obsahujících uniklé radionuklidy z Černobylu, které způsobily druhé zvýšení radioaktivity v Československu. (KUNZ, 1987 str. 118)



Obrázek 27 Trajektorie vzdušných hmot druhého zvýšení radioaktivity

Zdroj: Zpráva o radiační situaci po havárii v Černobylu

Obrázek 28 ukazuje kontaminaci půdy černobylským spadem na území Československa v době mezi 16. a 18. červnem 1986. Při tomto jednorázovém průzkumu bylo odebráno asi 1300 vzorků půdy na místech vybraných tak, aby co nejlépe ukázaly rozložení radioaktivního spadu na území Československa. (KUNZ, 1987 str. 47)



Obrázek 28 Plošná aktivita cesia v půdě v Československu

Zdroj: Zpráva o radiační situaci po havárii v Černobylu

5.1.13 Tomsk (Seversk)

Země – Ruská federace

Datum události – 6. duben 1993

Hodnocení INES – 4

Typ havárie – únik radioaktivity

Popis havárie – Tomsk-7 bylo jedno z tajných měst na Sibiři. V roce 1992 se vrátil ke svému historickému názvu Seversk. Bylo v něm umístěno několik jaderných zařízení pro výrobu plutonia a uranu pro jaderné palivo a zbraně, a zařízení na přepracování vyhořelého paliva. V uzavřeném městě žilo asi 100 000 dělníků a jejich rodin.

6. dubna 1993 dělníci napustili kyselinu dusičnou do reakční nádoby o objemu 34 m^3 vyrobené z nerezové oceli a uložené v betonovém krytu, aby oddělili plutonium od vyhořelého jaderného paliva. Nádoba obsahovala směs koncentrované kyseliny dusičné, 8757 kg uranu, 449 g plutonia a dále směs radioaktivních odpadů z předchozího extrakčního

cyklu. Není jasné, zda nehodu způsobila lidská nebo technická chyba, ale předpokládá se, že nedostatek stlačeného vzduchu způsobil, že se směs kyseliny dusičné, uranu a plutonia přehřála a během několika minut dosáhla kritických teplot. Následná exploze zbořila stěny ve dvou patrech komplexu, způsobila požár a uvolnila radiaci do životního prostředí.

S pomocí zahraničních specialistů se podařilo v počáteční čistící akci shromáždit a odstranit z oblasti kolem havárie asi 577 g plutonia. Je však zajímavé, že před explozí bylo v nádrži přítomno pouze 449 g plutonia, což naznačuje nehlášené dřívější úniky plutonia ze zařízení.

Příčiny havárie:

1) není známá.

Politické dopady – většina reaktorů v Tomsku byla odstavena v červnu 2008 po dohodě mezi Ruskem a USA z roku 2003 o zrušení výroby plutonia pro vojenské účely. Zařízení pro přepracování vyhořelého paliva a ukládání jaderného odpadu v současnosti nazvaný Sibiřský chemický kombinát však funguje dodnes.

Ekonomické dopady – náklady na dekontaminaci rozsáhlé oblasti, náklady na likvidaci zhavarovaného zařízení, náklady na opravu zařízení, náklady na odškodnění obyvatelům, ztráta z nevýroby.

Sociálně-kulturní dopady – havárie vystavila desetitisíce lidí zvýšeným úrovním radiace a kontaminovala vzduch, vodu a půdu na mnoho příštích generací. Nejvíce byly zasaženy jaderným spadem vesnice Georgievka a Nadezhda. Radioaktivní spad ve dnech po katastrofě vytvořil kontaminovaná místa s úrovní radiace až 30 μGy/h, což byl přibližně sto násobek normálního radiačního pozadí. Půda v oblastech zasažených radioaktivním spadem vykazovala významně zvýšené hladiny radioizotopů s dlouhou životností, jako je cesium Cs_{137} nebo stroncium Sr_{90}. I několik měsíců po havárii vzorky sněhu nadále vykazovaly zvýšené hladiny radioaktivních izotopů, což neustále vystavovalo obyvatelstvo radioaktivitě. V průběhu likvidace havárie bylo 160 pracovníků zařízení a téměř dva tisíce úklidových pracovníků vystaveno zvýšeným radiačním dávkám až 50 mSv. Maximální hranice pro radiační pracovníky je 20 mSv/rok.

Technologické dopady – nejsou známy.

Právní dopady – okresní soud v Tomsku v roce 2001 rozhodl o žalobě obyvatel kontaminované vesnice Georgievka proti Sibiřskému chemickému kombinátu a rozhodl,

že společnost musí zaplatit každému žalobci kompenzační částku v hodnotě 860 USD. Během soudního procesu však 14 z 26 žalobců zemřelo.

Ekologické dopady – havárie uvolnila asi 250 m^3 radioaktivního plynu, 8,7 kg uranu a 450 g plutonia. Do životního prostředí uniklo přibližně 160 mCi (6 GBq) plutonia a 810 Ci (30 TBq) dalších radionuklidů. Oblast kontaminace s celkovou plochu 120 km^2, se rozšířila 28 km SV směrem od místa havárie. (NuclearRisk, 2023)

5.1.14 Tokaimura

Země – Japonsko

Datum události – 30. září 1999

Hodnocení INES – 4

Typ havárie – kritická expozice personálu

Popis havárie – fatální selhání managementu, který připustil náhradu poškozeného dopravníku na uranový koncentrát, za ruční přenášení v kyblíčku. Tento postup byl ve spojení s nízkou kvalifikací personálu příčinou přítomnosti nadkritického množství štěpitelného materiálu v nádrži a následné exploze spojené s ozářením pracovníků a úniku radioaktivních látek mimo zařízení. (ČEZ, 2013 str. 22)

Nedostatečně vyškolení pracovníci připravovali malou dávku paliva pro rychlý experimentální reaktor JOYO obsahující asi 16 kg uranu U_{235} obohaceného na 18,8 %, čímž bylo dosaženo kritické hmotnosti. Nádrž nebyla navržena tak, aby zabránila případné kritičnosti.

Tři pracovníci obdrželi radiační dávky v rozmezí 10-20, 6-10 a 1-5 Sv (smrtelná dávka asi 8 Sv). Všichni tři byli hospitalizováni, dva v kritickém stavu. Jeden zemřel po 12 týdnech, další po 7 měsících. Dalších 436 osob dostalo dávky do hodnoty 50 mSv.

Pravděpodobně uniklo 160 TBq vzácných plynů a 2 TBq plynného jódu, ale mimo objekt závodu uniklo jen málo. Po likvidaci havárie a umístění stínění se úrovně radiace vrátily k normálu. (WorldNuclear, 2007)

Příčiny havárie:

1) lidské chyby, porušení technologických předpisů,
2) lidská chyba, selhání managementu.

Politické dopady – nejsou známy.

Ekonomické dopady – náklady na léčbu, náklady na likvidaci a obnovu, náklady na dekontaminaci, ztráta z nevýroby.

Sociálně-kulturní dopady – dva mrtví a jeden těžkou nemoc z ozáření.

Technologické dopady – nejsou známy.

Právní dopady – nejsou známy.

Ekologické dopady – úniku radioaktivních produktů uvnitř budovy, drobný únik mimo areál, vznik radioaktivního odpadu.

5.1.15 Paks

Země – Maďarsko

Datum události – 10. duben 2003

Hodnocení INES – 3

Typ havárie – poškození paliva

Popis havárie – v průběhu odstávky 2. RB došlo při čištění částečně vyhořelého paliva k poškození palivových souborů z důvodu ztráty chlazení. (ČEZ, 2013 str. 22)

V průběhu prací zaznamenaly dozimetrické systémy ventilačního komína i na reaktorovém sále prudký nárůst radioaktivity. V důsledku provedených technických opatření byly úniky radioaktivity sníženy pod povolený limit. Za čtyři dny po odstranění hlavy čistící nádoby bylo zjištěno, že většina palivových souborů uvnitř nádoby byla poškozena. Po analýze situace byly podniknuty kroky k udržení bezpečného chlazení palivových souborů. Po odstranění hlavy nádoby nedošlo k dalšímu uvolnění radiace. (Laka, 2023)

Příčiny havárie:

1) technická závada chladicího systému nádrže.

Politické dopady – nejsou známy.

Ekonomické dopady – náklady na opravu, ztráta z nevýroby.

Sociálně-kulturní dopady – nejsou známy.

Technologické dopady – nejsou známy.

Právní dopady – nejsou známy.

Ekologické dopady – malý únik radiace.

5.1.16 Paks

Země – Maďarsko

Datum události – 4. květen 2009

Hodnocení INES – 2

Typ havárie – poškození zařízení

Popis havárie – při transportu detektoru neutronů z reaktoru přes reaktorovou halu do úložiště vysokoaktivního odpadu, došlo k přetržení ocelového lana, na kterém byl detektor zavěšen. Lano prasklo uvnitř čtyřmetrového trubkového bioštítu, což způsobilo, že celá sestava spadla na pracovní plochu reaktorové haly pod ním. Následkem pádu byl bioštít ohnutý a nakloněný nad dekontaminační nádrž pro ovládací a řídicí tyče. Detektor neutronů vyzařoval více než 50 mSv/h, proto byli pracovníci evakuováni a reaktorová hala byla uzavřena. (DALTON, 2009)

Příčiny havárie:

1) technická závada, přetržení nosného lana.

Politické dopady – nejsou známy.

Ekonomické dopady – náklady na opravu, ztráta z nevýroby.

Sociálně-kulturní dopady – nejsou známy.

Technologické dopady – nejsou známy.

Právní dopady – nejsou známy.

Ekologické dopady – malý únik radiace.

5.1.17 Fukušima

Země – Japonsko

Datum události – 11. březen 2011

Hodnocení INES – 7

Druhá nejzávažnější jaderná havárie v historii.

Typ havárie – roztavení aktivní zóny tří bloků

Popis havárie – jaderná elektrárna Fukušima 1 leží na severovýchodním pobřeží Japonska, přibližně 300 km od Tokia.

V elektrárně bylo umístěno šest varných reaktorů. RB 1 byl typu BWR-3 s výkonem 460 MWe a byl spuštěn v roce 1971. Reaktory RB 2, RB 3, RB 4 a RB 5 byly typu BWR-4, měly výkon 784 MWe, a byly spouštěny v letech 1974 až 1978. Poslední reaktor RB 6 byl typu BWR-5 s výkonem 1100 MWe, a byl spuštěný v roce 1979. (WAGNER, 2015 str. 50)

Při provozu přímo v rektoru vznikala pára, která byla vedena primárním okruhem na turbínu, dále byla chlazená v kondenzátoru a vedena zpět do reaktoru. Kondenzátor byl chlazen sekundárním okruhem, který byl otevřen do moře.

Reaktory byly opatřeny kontejnmenty typu MARK. Horní část kontejnmentu však byla malá na to, aby mohla zabránit poškození kontejnmentu při parním výbuchu. Kontejnmenty byly umístěny v budovách o šířce 28 metrů a výšce 50 m, které nebyly odolné proti výbuchu. (WAGNER, 2015 stránky 42, 45)

RB 2 až RB 6 měly RCIC systémy havarijního chlazení, RB 1 měl méně efektivní IC systém havarijního chlazení. Dále byly reaktory vybaveny systémem HPCI, vysokotlakého vstřikování chladící vody. Všechny tyto systémy potřebovaly pro svoji činnost elektřinu alespoň pro ovládání a kontrolu.

Pro případ výpadku elektrické energie byla elektrárna vybavena dieselgenerátory a akumulátorovnami, bohužel byly umístěny v suterénu strojovny. To bylo nejslabším místem elektrárny a příčinou, která vedla k rozvoji havárie. (WAGNER, 2015 str. 47)

Proti následkům vlny tsunami byla elektrárna opatřena ochranným valem vysokým 6 m. Již v roce 2006 však byl provozovatel elektrárny dozorujícím orgánem upozorněn na možnost, že elektrárnu může zasáhnout vyšší vlna tsunami. I přes upozornění a žádost úřadu nebyla potřebná opatření provedena. I toto doporučení by ale bylo nedostatečné, protože navrhovalo vybudovat ochrannou zeď před vlnou tsunami vysokou 10 m. (WAGNER, 2015 str. 78)

Dne 11. března 2011 v 14:46 nastalo ve vzdálenosti přibližně 150 km od jaderné elektrárny zemětřesení o magnitudu 9,0. V té době byly v provozu reaktory RB 1, RB 2 a RB 3. Čtvrtý reaktor byl odstaven a palivo bylo nedávno vyvezeno do bazénu vyhořelého paliva. Reaktory RB 5 a RB 6 byly také odstaveny, ale měly palivo stále ve svých reaktorech. Všechny provozované reaktory správně zareagovaly na zemětřesení a byly bezpečně odstaveny.

Samotné zemětřesení nemělo na elektrárnu závažnější dopad. Způsobilo však blackout, protože došlo k pádu elektrických vedení spojující elektrárnu s přenosovou sítí. V tomto okamžiku naběhly náhradní dieselové zdroje a začaly napájet všechny důležité systémy, především chlazení reaktorů. (WAGNER, 2015 str. 50)

Vlna tsunami přišla k pobřeží u Fukušimy v 15:41. Měla výšku 14 metrů, a zaplavila celý areál elektrárny. Tím způsobila okamžité zničení všech záložních napájecích systémů jako jsou dieselgenerátory, akumulátorovny a elektrické rozvodny. V důsledku toho došlo k úplné ztrátě veškerých zdrojů elektrické energie pro reaktory RB 1 až RB 4. Vlna tsunami bohužel také zabila dva pracovníky elektrárny. Dále poškodila některé budovy a komunikace. Po opadnutí vody zůstaly všude rozházené trosky, které komplikovaly další záchranné práce. (WAGNER, 2015 str. 80)

I po přerušení štěpné reakce jaderné palivo nadále vytváří teplo, v reaktoru i v bazénu vyhořelého paliva. Toto teplo, i když je řádově nižší než při chodu reaktoru, je potřeba odvádět, jinak začne v reaktoru narůstat teplota. Ve Fukušimě bylo chlazení reaktoru závislé na cirkulaci pomocí čerpadel, které byly napájeny ze zničených dieselgenerátorů. Havarijní systémy chlazení RCIC a IC sice odváděly teplo z aktivní zóny do komory potlačení, ale ta nebyla chlazena mořskou vodou sekundárním okruhem. Začalo docházet k ohřívání celého prostoru kontejnmentu a zároveň v něm začal narůstat tlak. (WAGNER, 2015 str. 54)

Nejhorší situace nastala na RB 1., který měl starší systém havarijního chlazení IC. Ten sice po zemětřesení automaticky najel, ale byl obsluhou z důvodu moc intenzivního chlazení vypnut. Po zničení všech zdrojů elektrické energie nebylo jednoduché ho znovu zprovoznit. K napájení ovládacích a kontrolních systémů pracovníci elektrárny využívali akumulátory z aut. Tímto způsobem se jim povedlo zprovoznit i systém havarijního chlazení na RB. 1.

Protože se reaktor nadále zahříval a klesala v něm hladina vody, bylo potřeba do něj začít doplňovat chladící vodu. K tomu chtěli využít hasičské stříkačky, ale ty neměly dostatečný tlak, aby překonaly obrovský protitlak uvnitř kontejnmentu. Proto bylo nutné vypustit z kontejnmentu část páry havarijními ventily. Tři tomto vypouštění páry, bohužel došlo také k úniku radioaktivity. (WAGNER, 2015 str. 82)

V 19 hodin vláda vyhlásila stav jaderného nebezpečí a ve 21 hodin začala evakuace nejprve z 2 km později z 3 km zóny okolo elektrárny. (WAGNER, 2015 str. 328)

Tlak v kontejnmentu dosahoval takových hodnot, že docházelo k samovolným únikům páry. V 9 hodin druhého dne, dostalo vedení elektrárny informaci, že je evakuace dokončena.

Na základě této informace se rozhodlo začít s masivním upouštěním páry a snižováním tlaku v kontejnmentech. Obsluha začala do kontejnmentu dodávat vodu, později když došla voda technická, začali doplňovat vodu mořskou. Asi hodinu po zahájení doplňování vody do kontejnmentů, došlo na RB 1 k výbuchu. (WAGNER, 2015 stránky 85-86)

Tento výbuch byl způsoben vodíkem, který nějakou netěsností unikl z kontejnmentu do reaktorovny, kde vytvořil výbušnou směs. Vodík v reaktoru vzniká na zirkonovém pokrytí palivových tyčí, při jejich odhalení nad hladinu a vysoké teplotě. Reaktorovna byla výbuchem vážně poškozena a bylo zraněno pět pracovníků. (WAGNER, 2015 str. 55)

Ke stejnému výbuchu vodíku a ze stejných důvodů došlo 14. března i na RB 3. Reaktorovna byla výbuchem taktéž vážně poškozena a bylo zraněno dalších jedenáct pracovníků.

15. března došlo k výbuchu vodíku i na RB 4, v tomto případě se ale jednalo o vodík unikající skrze společný ventilační systém z reaktoru RB 3, protože reaktor RB 4 byl odstaven již před samotnou havárií. (WAGNER, 2015 stránky 328-329)

Obrázek 29 Elektrárna Fukušima po havárii

Zdroj: kernenergie.ch

15. března začal personál elektrárny intenzivně uvolňovat páru a snižovat tlak v kontejnmentu reaktoru RB 2. V 6 hodin ráno došlo v komoře potlačení k výbuchu, tím

došlo k prudkému poklesu tlaku v kontejnmentu, ale zároveň obrovskému úniku radiace. Tento výbuch byl hlavním zdrojem radioaktivního zamoření, se kterým se okolí elektrárny do současnosti potýká. Při výbuchu také vznik v reaktorovně otvor, kterým mohl vodík volně unikat. To byl důvod proč reaktorovna RB 2. nebyla zničena výbuchem vodíku, viz obrázek 29. (WAGNER, 2015 str. 88)

Po snížení tlaku v kontejnmentech všech bloků, se pracovníkům elektrárny podařilo zahájit dodávku chladící vody. Později byly do elektrárny dopraveny náhradní dieselgenerátory a byly opět zprovozněny ovládací a kontrolní systémy, dále také systémy cirkulačního chlazení. Následovalo zabezpečení všech důležitých systémů proti další vlně tsunami přestěhováním minimálně 25 m nad mořskou hladinu. Dále bylo prováděno odklizení radioaktivních trosek a dekontaminace elektrárny. (WAGNER, 2015 str. 101)

Příčiny havárie:

1) konstrukční vada, podcenění velikosti možné přírodní katastrofy,
2) konstrukční vada, nedostatečné záložní a havarijní systémy,
3) lidské chyby způsobené nepřipraveností na havárii.

Politické dopady – v japonské společnosti došlo po havárii k výrazným změnám.

V Japonsku spadal původní jaderný regulační úřad NISA pod ministerstvo průmyslu, a tudíž byl podřízen stejným úředníkům, kteří danou průmyslovou oblast prosazovali. Tato skutečnost byla již před nehodou kritizována i MAAE. (WAGNER, 2015 str. 76)

Z toho důvodu byl vytvořen nový jaderný regulační úřad NRA, který spadal pod ministerstvo životního prostředí jako nezávislý orgán.

Hlavním úkolem tohoto nového úřadu bylo zajistit bezpečnost jaderných elektráren a opětovně získat důvěru obyvatel. Ke splnění těchto úkolů úřad vytvořil nová pravidla, které všechny japonské elektrárny musely nově splnit a prokázat jejich účinnost při stres testech. (WAGNER, 2015 str. 273)

Podmínkou opětovného spuštění reaktorů byl mimo jiné souhlas od místních komunit. V době před havárii bylo v Japonsku 48 reaktorů v provozu a 2 ve výstavbě. Ve 22 případech byla místní veřejnost proti, nebo silně proti, v 11 byla pro, nebo silně pro, v 8 případech se veřejnost nevyjádřila a v 9 dalších případech provozovatelé upustily od dalšího provozování reaktorů, protože splnění bezpečnostních podmínek nebylo finančně efektivní. (WAGNER, 2015 stránky 286-287)

Společnost, která provozovala elektrárnu Fukušima 1 v roce 2016 přiznala, že první dva měsíce po havárii veřejnosti lhala o rozsahu katastrofy. Společnost havárii označovala za pouhé poškození jádra, ve skutečnosti došlo k úplnému roztavení aktivní zóny na třech blocích. Dělala to údajně na nátlak tehdejšího japonského premiéra. (CBC, 2016)

Dodnes japonská vláda nezveřejnila o havárii celou pravdu. Dlouho se vymlouvala na to, že ji firma provozující elektrárnu objektivně neinformovala, což je částečně také pravda. (ŠTRAIT, 2016 str. 37)

Ekonomické dopady – ekonomické dopady havárie byly enormní.

Náklady raketově rostly od prvních dnů, nejprve to byly náklady na havarijní chlazení reaktorů, dále na opětovné zprovoznění důležitých systémů. Byly dovezeny další dieselgenerátory, čerpadla a stříkačky. Byly vybudovány obří zásobníky na radioaktivní vodu a několik zařízení na dekontaminaci vody, také byla instalována technologická bariéra proti průsaku podzemních vod. Dále bylo vybudováno několik sládek pro ukládání radioaktivních odpadů, a to nejen v elektrárně, ale v celé zakázané zóně. Také to byly náklady na evakuaci a ubytování evakuovaných osob, a náklady na dekontaminaci zakázané zóny.

Dále to byly také zmařené investice do všech šesti bloků jaderné elektrárny Fukušima 1, ale také do mnoha dalších reaktorů v Japonsku, které již po havárii ve Fukušimě nebyly zprovozněny. Další obrovské náklady si vyžádaly opatření vycházející ze stres testů v jaderných elektrárnách, které se po havárii ve Fukušimě opět spouštěly.

Další obrovskou ekonomickou ztrátou bylo znehodnocení zemědělské půdy v zakázané zóně a částečná ztráta sídel, především v území kategorie III., které se stále nedaří dekontaminovat na tolik, aby v ní mohli lidé bezpečně žít.

V roce 2014 byly odhadovány náklady na likvidaci následků havárie Fukušimy 1 ve výši přibližně 108 miliard USD. Dalších 24 miliard USD bylo odhadováno na dekontaminaci postižených oblastí, 11 miliard USD na výstavbu úložišť pro radioaktivní odpad, 19 miliard USD na likvidaci samotné elektrárny a uložení radioaktivní vody, 5,5 miliard USD na výstavbu náhradního ubytování a 48,5 miliard USD na kompenzace pro poškozené obyvatele.

Náklady budou pravděpodobně ještě vyšší, protože zatím nejsou započteny náklady na uložení silně a dlouhodobě radioaktivního odpadu a náklady na činnost vládních orgánů, které všechny práce řídí.

Úplná likvidace elektrárny se plánuje na 40 let, tak je jasné že celkové náklady dále porostou. (WAGNER, 2015 str. 227)

Sociálně-kulturní dopady – v přímé souvislosti s havárií nikdo nezemřel. V den havárie v elektrárně zemřeli dva pracovníci, ale ty zabila vlna tsunami. V průběhu záchranných a likvidačních pracích, při výbuších vodíku došlo ke zranění několika desítek pracovníků. (WAGNER, 2015 stránky 86-87)

Na velikosti ozáření obyvatelstva měla velmi příznivý vliv skutečnost, že největší část evakuace okolí elektrárny byla provedena před tím, než došlo k masivnímu úniku radiace. (WAGNER, 2015 str. 167)

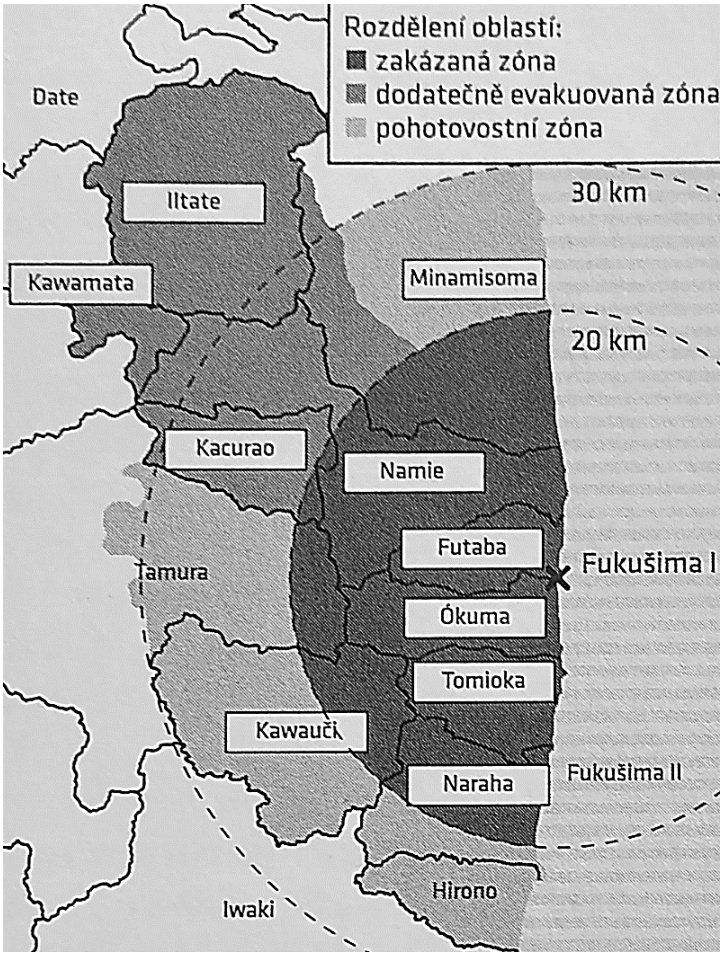
Evakuace začala 11. března ve 21 hodin, nejprve z 2 km později z 3 km zóny okolo elektrárny. V 6 hodin ráno druhého dne byla vyhlášena evakuace ze zóny 10 km okolo elektrárny a večer byla nařízena evakuace 20 km zóny, dokončena byla 15. března. Později docházelo k evakuaci dalších míst, kde došlo k silné kontaminaci.

Evakuace probíhala chaoticky a zmateně. Nikdo neměl potřebné informace, občané ani krizové orgány nevěděli co mají dělat, nebyli na nic připraveni a pokyny se neustále měnily. Mnoho evakuovaných bylo znovu a znovu přesouváno mimo další nově evakuované oblasti. Během evakuace zemřelo 60 z 800 pacientů z evakuované léčebny dlouhodobě nemocných, když je oddělili od jejich zdravotního personálu a oni tak přišli o zdravotní péči. Poslední evakuace byly provedeny v průběhu července. (WAGNER, 2015 stránky 93, 167, 329, 330)

Havárie a následná evakuace měla značné sociální a psychologické dopady. Opuštění domovů, farem, podniků a sociálních skupin, mělo především u starších lidí za následek zhoršení zdravotního stavu a dřívější úmrtí, v některých případech vedlo i k sebevraždám. (WAGNER, 2015 str. 183)

Nařízenou evakuací bylo zasaženo celkem dvanáct samosprávných celků a týkala se více než 88 000 lidí, viz obrázek 30. Z oblastí okolo zakázané zóny se dobrovolně evakuovalo dalších 28 000 až 50 000 lidí. (WAGNER, 2015 str. 190)

Celkově bylo z okolí elektrárny donuceno se vystěhovat více jak 160 000 lidí. (ŠTRAIT, 2016 str. 67)



Obrázek 30 Mapa zakázané zóny

Zdroj: Fukušima I poté

Technologické dopady – po havárii ve Fukušimě byly v roce 2012 v Japonsku odstaveny všechny jaderné reaktory. Před opětovným spuštěním musely projít náročnými stres testy, při kterých se zjišťovaly jejich slabiny, především možnost ztráty napájení havarijních systémů při zemětřesení, vlně tsunami a dalších živelních pohromách. Odhalené nedostatky musely být před opětovným spuštěním odstraněny. (WAGNER, 2015 str. 269)

Podle pravidel nového jaderného regulačního úřadu NRA musela nově každá elektrárna prokázat, že je schopna odolat nejvyšší možné tsunami a musí zajistit, aby se voda nedostala do životně důležitých prostor elektrárny. To znamená, že museli vybudovat nové dostatečně vysoké vlnolamy. Dále museli na bezpečných místech zajistit dostatek prostředků pro nouzové chlazení reaktorů. Elektrárny s varnými reaktory musely do ventilačních systémů instalovat filtrační zařízení. Další podmínkou byla instalace zařízení, které dokážou vstřikovat vodu do reaktoru i pod tlakem a také instalace pasivního zařízení, které zabraňuje výbuchu vodíku jeho rekombinací. Dále musely být elektrárny vybaveny záložní blokovou

dozornou mimo budovu reaktorovny. V okolí všech elektráren musel být proveden průzkum geologických zlomů.

Z provozu byly vyloučeny reaktory starší 40 let.

Také byl vytvořen speciální team asi 100 odborníků pro řešení případné havárie, s veškerým vybavením včetně robotů a prostředků pro rychlou přepravu. (WAGNER, 2015 stránky 273-275)

Jako jeden z důsledku havárie ve Fukušimě, Japonsko zrušilo některé z plánovaných projektů na nové jaderné elektrárny a pravděpodobně ukončí i projekt rychlého reaktoru Mondžú. Tento reaktor, i když byl spuštěn v roce 1995, nebyl do současnosti v provozu ani 1 rok, a měl již několik nehod. (Atominfo, 2011)

Na základě zkušeností s havárií ve Fukušimě, byly upraveným stres testům podrobeny i všechny reaktory v Evropě. Ačkoliv žádný reaktor nemusel být odstaven, u většiny z nich byla objevena slabší místa, která musela být v následujícím období odstraněna. (WAGNER, 2015 str. 293)

Právní dopady – okolnosti z hlediska práva byly při havárii ve Fukušimě zcela jiné než při havárii v Černobylu. Zatímco v roce 1986 mezinárodní společenství států zjistilo že, problematika prevence a reakce na havárii v jaderném zařízení není mezinárodním právem nijak upravena, v roce 2011 již existoval ucelený mezinárodněprávní systém, který řeší téměř všechny aspekty mírového využívání jaderné energie. (HANDRLICA, 2012 str. 70)

Japonský parlament sestavil komisi pro vyšetření příčin, ale i průběhu havárie. Tato komise vydala zprávu, kde uvedla, že havárie sice vznikla z důvodu vlny tsunami, ale kořenovou příčinou bylo ignorování a podceňování možných přírodních katastrof, motivované snahou uspořit náklady. Komise dále uvedla, že vlna tsunami takovéto velikosti mohla a měla být předvídána, a měly být učiněna odpovídající opatření. Zpráva za viníka havárie označuje lidský faktor. (WAGNER, 2015 str. 75)

Dále komise ve zprávě uvádí, že pracovníci elektrárny nebyli dostatečně vyškoleni a neměli instrukce co mají dělat při úplném výpadku elektřiny v elektrárně, a při souběhu několika havárií. (WAGNER, 2015 str. 90)

Události po havárií v jaderné elektrárně Fukušima, měly v mnoha zemích světa za následek obrat ve vnímání mírového využívání jaderné energie jako levného a spolehlivého zdroje

elektřiny. V mnoha státech padlo již několik měsíců po havárii rozhodnutí jadernou energii k výrobě elektřiny nadále nevyužívat. (HANDRLICA, 2012 str. 69)

Německý parlament rozhodl pro okamžitý odchod od jaderné energie a odstavil všechny jaderné elektrárny. Švýcarsko se rozhodlo stávající provozované jaderné elektrárny novými nahrazovat a další nebudovat. (SUJB, 2021)

Dalším státem, který se začal odklánět od jádra byla Belgie. V Itálii a Venezuele přehodnotili své dřívější rozhodnutí zahájit vlastní jaderný program. (HANDRLICA, 2012 str. 69)

Ekologické dopady – na základě odhadů unikla při fukušimské havárii radioaktivita v hodnotě asi 940 PBq. K velkým únikům radioaktivity docházelo od 12. března až do konce dubna, k největšímu úniku došlo 15. března. Japonsko mělo obrovské štěstí, že v době havárie převládaly západní větry a asi 80 % všeho spadu zasáhlo Tichý oceán. Na pevninu tedy spadlo pouze 20 % spadu, ale i to mělo za příčinu evakuovanou zakázanou zónu v rádiusu 20 km, dobrovolnou evakuovanou zónu o rádiusu 30 km, a evakuovanou zónu ve směru větru na pevninu kde došlo k významné kontaminaci sahající až 45 km od elektrárny. Pokud by po celou dobu po havárii převládaly východní větry, mohly být následky pro japonské území i 5krát horší. (WAGNER, 2015 stránky 163-164)

Radioaktivitou byla nejvíce zasažena území ležící severozápadním směrem od elektrárny, kde místy dávkový příkon dosahoval až 40 mSv/h i ve vzdálenosti 40 km od elektrárny. Na hranicích elektrárny byla naměřena nejvyšší hodnota 300 mSv/h, viz obrázek 31. (WAGNER, 2015 stránky 171, 176)

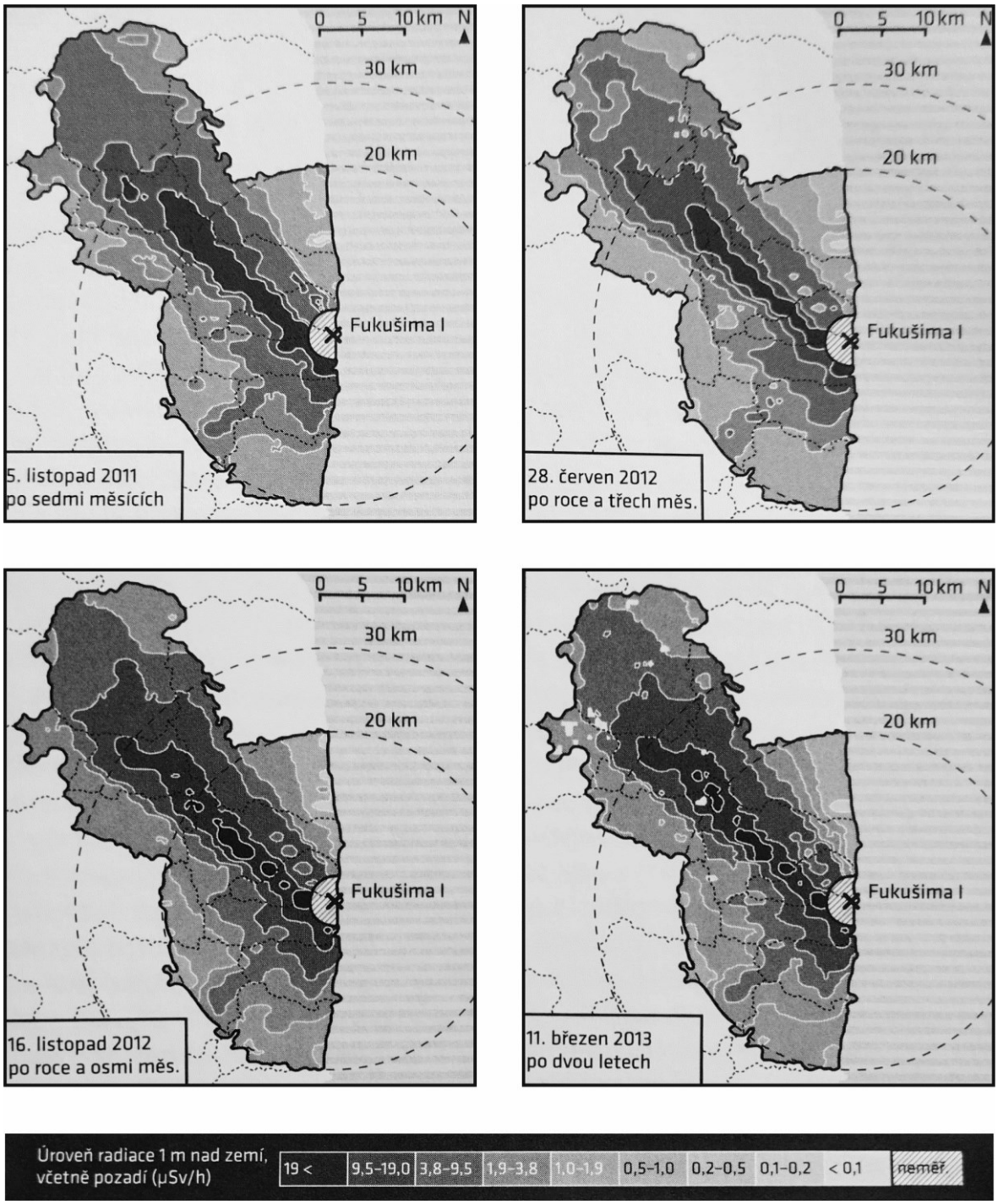
Území, které bylo kontaminováno radioaktivním Cesiem mělo plochu 30 000 km^2, což je více než třetina území České republiky. (HAMALČÍKOVÁ, 2019)

Evakuovaná zóna byla rozdělena podle míry kontaminace do tří kategorií.

Do kategorie I. spadaly území, kde předpokládaná roční dávka nepřekročí 20 mSv. V zóně měla být provedena dekontaminace na úroveň 1 mSv/rok a při této úrovni se měli obyvatelé vrátit zpět.

Do kategorie II. spadaly území, kde předpokládaná roční dávka nepřekročí 50 mSv. V zóně měla být v průběhu dvou let provedena dekontaminace na úroveň 20 mSv/rok a poté další opatření umožňující návrat obyvatel.

Do kategorie III. spadaly území, kde předpokládaná roční dávka překročí 50 mSv. Dekontaminace v této zóně vyžadovala dlouhodobější úsilí a vláda nabídla občanům odkup pozemků a dalších nemovitostí. (WAGNER, 2015 str. 193)



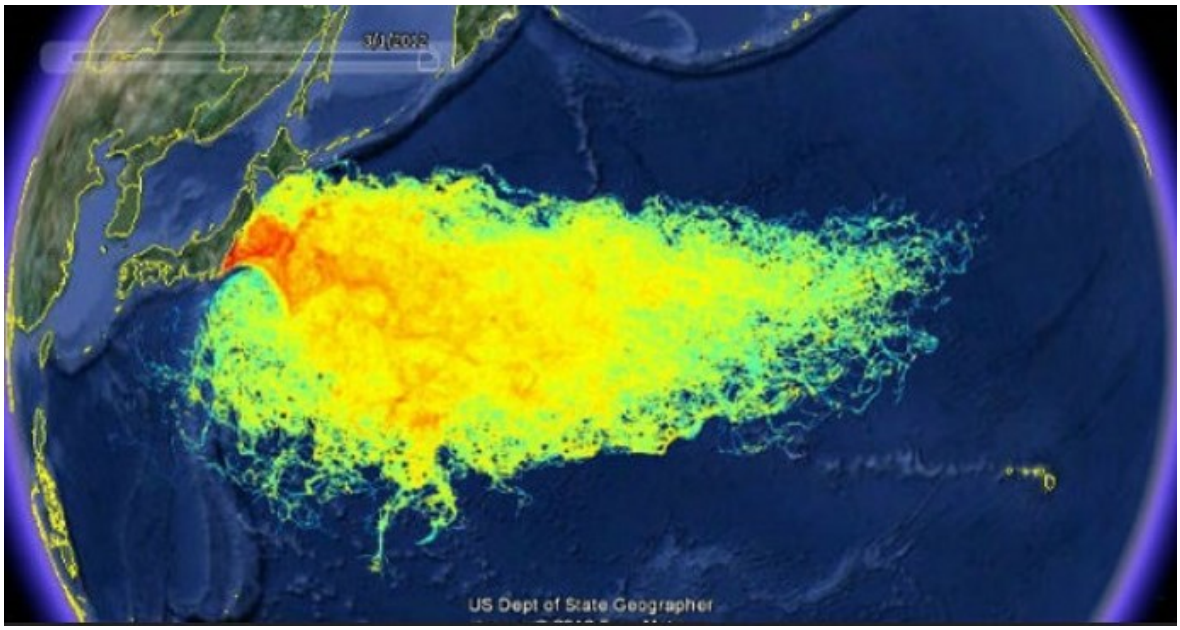
Obrázek 31 Vývoj kontaminace v čase

Zdroj: Fukušima I poté

Radioaktivita uniklá z Fukušimy byla v období března až května měřitelná i na území České republiky, její hodnoty však byly zanedbatelné. (WAGNER, 2015 str. 185)

Předpokládá se, že radioaktivních látek se do atmosféry dostalo zhruba stejné množství jako přímo do moře. Do moře dále spadlo okolo 80 % radioaktivních látek ze vzduchu. (WAGNER, 2015 str. 185)

Podle některých autorů byla havárie v jaderné elektrárně Fukušima horší než ta v Černobylu, kde je radioaktivita ukryta pod sarkofágem. Ve Fukušimě dochází k dlouhodobému zamořování oceánu, viz obrázek 32. (ŠTRAIT, 2016 str. 37)



Obrázek 32 Kontaminace Tichého oceánu rok po havárii

Zdroj: change.org

Radioaktivní látky se v moři dostávají v průběhu dlouhého času do velikých vzdáleností. V moři však dochází k extrémnímu naředění radioaktivity, proto naměřené hodnoty i blízko elektrárny byly po celou dobu havárie poměrně nízké. Již zhruba 1 km od elektrárny není běžnými prostředky radioaktivita měřitelná. (WAGNER, 2015 str. 186)

Dodnes nejsou známy všechny dopady jaderné havárie především na mořskou flóru a faunu. (ŠTRAIT, 2016 str. 37)

V průběhu havárie začalo v elektrárně vznikat velké množství různě kontaminované vody. Jejími hlavními zdroji byly: vlna tsunami, voda použitá na chlazení reaktorů a v neposlední řadě do elektrárny neustále přitékající a kontaminující se podzemní voda. (WAGNER, 2015 str. 129)

Důležité bylo zabránit této vodě volně odtékat do moře. Bohužel z důvodu zemětřesení vznikla v jímce trhlina, kterou silně radioaktivní voda do moře odtékala. Proto bylo do elektrárny navezeno velké množství nádrží, do kterých se především silně radioaktivní voda čerpala. Málo aktivní voda se vypouštěla do moře. (WAGNER, 2015 stránky 99-100)

Ještě v roce 2015 bylo v elektrárně skladováno 620 000 tun radioaktivní vody, i přes to že, přímo v elektrárně bylo postaveno několik zařízení na dekontaminaci vody, viz obrázek 33. (WAGNER, 2015 str. 334)

Obrázek 33 Elektrárna Fukušima a nádrže s kontaminovanou vodou

Zdroj: SUJB

V roce 2016 byla v okolí elektrárny instalována technologická bariéra v podobě stěny ze zmrzlé zeminy, která omezuje přítok podzemní vody do elektrárny a odděluje kontaminované a nekontaminované podzemní vody. (SUJB, 2021)

5.2 Analýza příčin havárií

Z podrobné analýzy sedmnácti závažných havárií vyplývá, že příčin havárií je celá řada.

5.2.1 Lidská chyba

Nejčastější příčinou havárií byla lidská chyba a to ve 14 případech. Jednalo se o nesprávně provedené manipulace, špatné rozhodnutí provozního personálu, nedbalost, porušení technologických a provozních předpisů, nerespektování a neplnění mezinárodních

standardů, selhání managementu, a v neposlední řadě havárie způsobené nepřipraveností na havárii, nebo nečekaný stav zařízení.

5.2.2 Konstrukční vada

Další skupinou příčin havárií byly konstrukční vady jaderných zařízení, a to v 7 případech. Jednalo se o konstrukční vady jak z důvodu ještě nedostatečně vyvinutých a odzkoušených technologií, tak o konstrukční nedostatky vytvořené záměrně z důvodu ušetřit peníze. Mezi konstrukční vady můžeme zařadit závažné nedostatky v konstrukci reaktoru a dalších zařízení, nedostatečně dimenzované chladící systémy, neoddělené havarijní systémy, nedostatečné záložní a havarijní systémy, chybějící kontejnmenty a lapače aktivní zóny a podcenění velikosti možné přírodní katastrofy při projektování zařízení.

5.2.3 Technická závada

Nezanedbatelnou skupinou příčin havárií byly i technické závady a jejich řetězení, a to v 6 případech. Nejčastěji se jednalo o selhání nejrůznějších systémů, například chladících, dále o netěsnosti a jiné závady.

5.2.4 Neznámé příčiny

U mnoha havárií není její příčina zcela jasná, nebo se nepodařila zjistit. I v těchto případech se nejpravděpodobněji jednalo o lidskou chybu, konstrukční vadu, nebo technickou závadu.

5.2.5 Zatajování a zamlčování

Významným aspektem, který nebyl ani u jedné z havárií přímou příčinou, ale u mnoha havárií měl významný vliv na velikost dopadů havárie je skutečnost, že společnosti jaderné zařízení provozující, ale i vlády států na jejichž území se havárie staly, mají tendenci informace o nehodách a haváriích, jejich příčinách i následcích zatajovat, a přiznat jen to, co je již prokazatelné, a i potom následky marginalizovat a zamlčovat.

Až do pádu Sovětského svazu v roce 1991 se informace o jaderných haváriích nezveřejňovaly. Bohužel tomu bylo stejně i při jaderných haváriích v Západní Evropě nebo v zámoří. Ani dnes však není čas na přehnaný optimismus, v mnoha směrech Černobylské fórum a protijaderní aktivisté „vaří z vody“. (ŠTRAIT, 2016 str. 51)

Toto platilo v případě Černobylu, Komplexu Maják, obou havárií v Jaslovských Bohunicích, Three Mile Islandu, Rancho Seco, Tsugura a ostatních havárií v době studené války, ať už se stala na kterékoliv straně. Podobné to bohužel bylo i v nedávné době při havárie

jaderné elektrárny ve Fukušimě, která se stala v demokratické zemi a moderní technologické společnosti.

5.3 Analýza dopadů havárií

Z kvantitativní analýzy vybraných událostí vyplývá, že dopady drobných nehod a havárií v jaderných zařízeních jsou srovnatelné s nehodami v jiných průmyslových odvětvích. Naopak nejzávažnější jaderné havárie mají dopady překračující hranice, a náklady na jejich likvidaci převyšují rozpočty většiny států.

U mnoha havárií uvádím že dopady nejsou známy, to však neznamená, že nebyly, pouze se je nepovedlo dohledat, nebo propojit s havárií. V některých případech je těžké určit, do které kategorie konkrétní dopady patří, například právní, politické a sociálně-kulturní dopady se často prolínají.

5.3.1 Politické dopady

Politické dopady jsou dopady, které u většiny méně závažných havárií nejsou známy. Mezi známé politické dopady patří například mezinárodní smlouvy o ukončení výroby nebo provozování jaderného zařízení, ale také ztráta důvěry veřejnosti vůči provozovatelům jaderných zařízení a vládám z důvodu zatajování a zamlčování informací. Nejvýznamnější politické dopady měla největší jaderná havárie v historii. Černobyl byl jedním z aspektů, který nepřímo vedl k rozpadu Sovětského svazu a potažmo celého Východního bloku. Sovětský svaz byl již před havárií v Černobylu značně finančně vyčerpaný a odstraňování dopadů mělo za následek rozvrat státních financí.

5.3.2 Ekonomické dopady

Ekonomické dopady mají všechny havárie v jaderných zařízeních. Nejméně závažné havárie mají ekonomické dopady v řádech milionů korun, jako ztráta z nevýroby, náklady na opravu zařízení nebo léčbu raněných nebo ozářených. U závažnějších havárií spojených s únikem radiace se náklady navyšují o dekontaminaci a likvidační práce. U nejzávažnějších havárií dosahují ekonomické dopady astronomických hodnot za dekontaminaci rozsáhlých oblastí, likvidaci celých zařízení a sídel, vybudování nových zdrojů energie, náklady na evakuaci, náklady na léčbu a odškodnění obyvatelům.

Dekontaminace a likvidace druhého bloku elektrárny Three Mile Island trvala 14 let a stála asi 1 miliardu USD.

Celkové náklady na likvidaci havárie v Černobylu se ani dnes nedají vyčíslit. Bude to součet nákladů, které na likvidaci následků vynaložila Sovětská vláda, později vlády Ukrajiny, Běloruska a Ruské federace, ale také společenství zemí G-7, Evropské unie, USA a další. V roce 1996 odhadli ekonomové celkovou cenu za Bělorusko na 235 miliard USD, a v roce 2006 byly náklady Ruské federace asi 18 miliard USD.

V roce 2014 byly odhadované náklady na celkovou likvidaci následků havárie ve Fukušimě ve výši asi 200 miliard USD. Úplná likvidace elektrárny se plánuje na 40 let.

5.3.3 Sociálně-kulturní dopady

Sociálně-kulturní dopady byly opět v široké škále, od ozáření nebo zranění několika pracovníků, přes ztráty na životech a závažné nemoci z ozáření, až po velký počet mrtvých, kontaminaci tisíců obyvatel, kontaminaci jejich životního prostředí, zánik mnoha měst a vesnic, násilné přesídlení desetitisíců obyvatel, a zánik velkého množství sociálně-kulturních struktur.

5.3.4 Technologické dopady

Technologické dopady u mnoha havárií nebyly žádné, nebo nejsou známé. Mezi technologické dopady patří provedení organizačních opatření, technologických změn a úprav zařízení, v některých případech byly konkrétní zařízení, nebo všechna zařízení stejného druhu, trvale vyřazena z provozu. Největší havárie v historii měly vždy na čas významný vliv na útlum jaderného průmyslu, kdy se současně odstavovaly desítky elektráren a rušila se většina připravených projektů.

5.3.5 Právní dopady

Většina menších havárií neměla žádné právní dopady, na druhou stranu, pokud se v oblasti jaderného práva něco významného událo, bylo to vždy po závažné havárii. Mezi právní dopady můžeme zařadit, vznik nových národních nebo mezinárodních úřadů a organizací, a nových národních nebo mezinárodních předpisů a standardů. Dále pak změny veřejného mínění a tlak veřejnosti na provozovatele jaderných zařízení a vlády, což v některých případech mělo za následek úplný odklon od jaderné energetiky.

5.3.6 Ekologické dopady

Ekologické dopady byly opět v širokém rozsahu. U nejméně závažných havárii se jednalo o bezvýznamný úniku radiace nebo jiné životnímu prostředí škodlivé látky. U závažnějších

havárií se jednalo o kontaminaci všech složek životního prostředí jak radiací, takt dalšími látkami. U nejzávažnějších havárií se jednalo o likvidaci životního prostředí na velice rozsáhlých plochách a vznik velkého množství radioaktivního odpadu.

Při havárii v Tomsku uniklo asi 160 mCi (6 GBq) plutonia a 810 Ci (30 TBq) dalších radionuklidů která kontaminovala území o rozloze asi 120 km² a délce asi 28 km.

Při havárii v Three Mile Islandu uniklo asi 2,5 MCi (93 PBq) radioaktivních plynů a přibližně 15 Ci (560 GBq) radioaktivního jódu.

Při havárii v komplexu Maják uniklo asi 20 MCi (740 PBq) radioaktivity, která kontaminovala cesiem a stronciem území o rozloze asi 20 000 km² a délce asi 120 km.

Při havárii ve Fukušimě uniklo asi 25 MCi (940 PBq) radioaktivity, která kontaminovala území ve vzdálenosti až 45 km od elektrárny. 80 % radioaktivního spadu však zasáhlo oceán, na pevninu spadlo pouze asi 20 %.

Při havárii v Černobylu uniklo asi 50 MCi (1850 PBq) radioaktivity, která kontaminovala území o rozloze asi 191 560 km².

5.4 Zhodnocení

K významným jaderným haváriím i k drobným nehodám docházelo po celou dobu používání jaderné energie, a to už od pionýrských let až do současnosti, a jak na rozvinutém západě, tak v socialistickém východě.

To, že se největší jaderná havárie stala v Sovětském Svazu nikoho moc nepřekvapí. Kultura bezpečnosti v bývalém socialistickém bloku byla bohužel celkově nízká, a to proto, že byl především kladen důraz na urychlenou industrializaci, což se týkalo i výroby elektrické energie. Dále to byl i nedostatek finančních prostředků a zdrojů, které ovlivňovali možnosti vývoje, a především instalace moderních bezpečnostních prvků jaderných reaktorů. Dalším problémem bývalých komunistických režimů byla nedostatečná transparentnost a otevřenost, tyto režimy preferovaly utajení a kontrolu informací. To vedlo k nedostatečnému sdílení informací o potenciálních rizicích a nehodách v jaderném průmyslu.

O to větší šok pro celé lidstvo byla havárie ve Fukušimě, která se stala v poměrně nedávné době, a především v jedné z technologicky nejvyspělejších zemí. Najednou se ukázalo, že i bohatá japonská společnost, která o zdroje neměla nouzi, preferovala zisk jako největší hodnotu, a doporučení, které mohly havárii zabránit nebo snížit její dopady, se snažila

obcházet a nerealizovat. I když úroveň bezpečnosti byla ve Fukušimě na podstatně vyšší úrovni než v Černobylu, z analýzy fukušimské havárie vyplývá, že se z té černobylské dostatečně nepoučili.

6 NÁVRHY NA OPATŘENÍ

Z provedených analýz vyplývá, že počet událostí, a především jejich následky jsou natolik závažné, že je neustále potřebné navrhovat další a další opatření na zvýšení úrovně jaderné bezpečnosti.

Protože se na zvyšování úrovně bezpečnosti v jaderné energetice pracuje již mnoho let a mnoho opatření již bylo provedeno, je velmi obtížné navrhnout organizační opatření, které by bylo po technické stránce jednoduché, šlo by okamžitě zavést, nevyžadovalo by velké investice, nebo by bylo realizováno formou kontrol, či zákazů.

Taktéž varianty opatření, které předpokládají rychlou ekonomickou návratnost, jako jsou elektrická požární signalizace, stabilní hasící zařízení, požárně bezpečnostní zařízení atd., jsou již dávno aplikované.

Proto zbývají pouze opatření investičně náročná, nebo na první pohled nerealizovatelná, jako je doplnění dalších bezpečnostních prvků a systémů, nebo budování nových moderních jaderných zařízení jako náhrada starých a nebezpečných.

6.1 Lidská chyba

Hlavními faktory, které přispívají k vzniku lidských chyb, jsou nedostatečná pozornost, stres, únava a nedostatek zkušeností. Lidé mohou také podléhat emocím, které ovlivňují jejich rozhodovací schopnosti, což také může vést k chybám.

6.1.1 Opatření proti lidským chybám

Vhodné pracovní prostředí

Vytvoření vhodného pracovního prostředí, které minimalizuje stres a únavu. Minimalizace potenciálních nebezpečí, hluků, rozptylujících podmětů a rizik, které by mohly vést k chybám.

Plánování a řízení času

Chytré plánování práce a řízení času, zabraňuje přetížení zaměstnanců. Efektivní rozvržení úkolů a správa času pomáhá minimalizovat stres a únavu, které mohou vést k chybám.

Audity a revize pracovních předpisů

Pravidelné kontroly a revize pracovních postupů a procesů k identifikaci potenciálních rizik a chyb. Pracovní dokumentace musí být jednoznačná a přehledná. Aplikace podpůrných rozhodovacích a kontrolních nástrojů jako je Checklist.

Školení a výcvik

Důležitým opatřením je také výcvik a školení zaměstnanců, aby byli dobře připraveni jak na své rutinní pracovní úkoly, tak také na činnosti při havárii, nebo při nečekaném stavu zařízení, a mohli se efektivně vyrovnat s různými situacemi. Kromě toho je nezbytné vytvořit systém kontroly a zpětné vazby, který umožní identifikovat a odstraňovat nedostatky ve vyškolenosti a vycvičenosti provozního personálu.

Týmová spolupráce

Podpora týmového prostředí a komunikace, která umožňuje zaměstnancům navzájem se kontrolovat a pomáhat si v prevenci chyb.

Moderní technologie

Využívání automatizovaných systémů a umělé inteligence k eliminaci rutinních úkolů a snížení lidského zásahu. Přehledné moderní a uživatelsky přívětivé informační systémy, všechny informace vždy přehledně a na jednom místě. Dále systémy kontroly a zpětné vazby, které identifikují a napravují chyby na jejich počátku, místo aby byly přehlédnuty nebo zatajeny.

Kultura otevřenosti a odpovědnosti

Podpora prostředí, kde zaměstnanci mohou bez obav hlásit chyby a kde je odpovědnost za ně nesouvisí s trestem, ale spíše s učením se a zlepšováním.

Celkově řečeno, předcházení lidským chybám vyžaduje komplexní přístup, který zahrnuje nejen technická opatření, ale také péči o fyzické i duševní zdraví zaměstnanců a posilování jejich dovedností a vědomostí.

6.2 Konstrukční vada

Konstrukční nebo projektové vady měly za následek obě nejvážnější havárie jaderného zařízení v historii. V Černobylu to byla projektová chyba reaktoru, ale také chybějící kontejnment, lapač aktivní zóny a dalších bezpečnostních prvků, především kvůli snaze Sovětského svazu ušetřit peníze. Ve Fukušimě to pak byla projektová chyba, kdy ochranné

valy proti vlně tsunami byly příliš nízké, opět kvůli snaze společnosti elektrárnu provozující ušetřit peníze.

Opatření proti konstrukčním vadám lze rozdělit do dvou kategorií, a to na opatření pro provozovaná jaderná zařízení a na opatření pro připravovaná jaderná zařízení.

6.2.1 Opatření proti konstrukčním vadám pro provozovaná jaderná zařízení

Kontejnment

Doplnění kontejnmentu u všech jaderných reaktoru, které v současnosti tento základní a důležitý bezpečnostní prvek nemají.

Kontejnment je ochranná obálka jaderného reaktoru, která je vystavěná z oceli a betonu. Jeho hlavní funkcí je poskytnout hermeticky uzavřený prostor, který zabraňuje úniku nebezpečných látek do okolí a zároveň poskytuje mechanickou ochranu proti vnějším vlivům.

Při haváriích v Three Mile Island a Fukušimě tento bezpečnostní prvek výrazně snížil dopady havárií. V Černobylu toto bezpečnostní zařízení z důvodu snahy ušetřit náklady na výstavbu neměly, čemuž odpovídá rozsah havárie.

V České republice oba reaktory Temelínské elektrárny kontejnment mají, bohužel čtyři bloky Jaderné elektrárny Dukovany kontejnment postrádají.

Lapač aktivní zóny

Doplnění lapače aktivní zóny u všech jaderných reaktoru, které tento důležitý bezpečnostní prvek nemají.

Lapač aktivní zóny je zařízení navržené k zachycení a chlazení roztavené aktivní zóny, která unikla z reaktorové nádoby. Jeho hlavním účelem je nejen záchyt roztaveného paliva, ale také jeho ochlazení. Pokud se toto nezdaří, horká a chemicky velmi aktivní tavenina začne působit na betonovou šachtu reaktoru, což je extrémně nebezpečné, protože by se mohlo uvolnit velké množství vodíku a vysoce radioaktivní složky taveniny. Roztavené palivo by se mohlo protavit skrz tlakovou nádobu reaktoru, kontejnment a pokračovat dále. Což by mohlo způsobit až kontaminaci spodních vod.

Absence lapače aktivní zóny byl velký problém při havárii v Černobylu, kde se kvůli jeho absenci nejprve musel pod reaktor vykopat tunel pro chlazení aktivní zóny, později se pod

reaktorem vybudovala masivní betonová deska, a nakonec se půda pod reaktorem zmrazila výkonným chlazením.

Absence lapače aktivní zóny byl problémem i při některých haváriích ve Spojených státech, kdy byla obava že by se roztavené palivo mohlo dostat hluboko do země. Tato obava byla ironicky označována jako čínský syndrom, obava že by se roztavené palivo mohlo protavit skrz celou Zemi až do Číny.

V České republice ani jeden z reaktorů lapačem aktivní zóny vybaven není.

Pasivní havarijní nádrž

Doplnění pasivní havarijní nádrže chladící vody u všech jaderných elektráren, které tento důležitý bezpečnostní prvek nemají.

Nádrž chladící vody jako jezero, přehrada nebo řeka s dostatečnou kapacitou a možným pasivním, gravitačním nátokem do elektrárny.

Nedostatek dostupné chladící vody a jeho snadná doprava do zhavarované elektrárny se projevil jako zásadní nedostatek u většiny závažných havárií.

V České republice ani jedna z jaderných elektráren pasivní havarijní nádrž chladící vody nemá.

6.2.2 Opatření proti konstrukčním vadám pro připravovaná jaderná zařízení

Bezpečný reaktor

Při výběru reaktoru pro nové jaderné zařízení, by se mělo uvažovat pouze o reaktorech III. generace, ještě lépe III+ nebo IV. generace. Reaktory III., III+ a IV. generace mají oproti starším reaktorům navíc mnoho bezpečnostních prvků, především pasivních a silnou odolnost proti roztavení jádra.

Současně by se mělo jednat o reaktor prověřené a odzkoušené konstrukce, ne prototyp, nebo na zakázku upravený jiný reaktor.

Malé modulární reaktory

Alternativou ke konvenčním jaderným elektrárnám je instalace malých modulárních reaktorů, blízko místa spotřeby, u průmyslové zóny nebo aglomerace. Díky jejich velikosti mohou být vyráběny v továrnách a následně dopravovány na místo výstavby jaderného zařízení, kde jsou sestaveny, což znovu zvyšuje jejich spolehlivost. Malé modulární reaktory

se dnes vyrábí v III+ generaci, a i v případě totální havárie je území zasažené havárií nesrovnatelně menší než při havárii klasické jaderné elektrárny.

Výběr vhodného umístění

Při výběru vhodného místa pro umístění nového jaderného zařízení je potřeba zvážit mnoho hledisek a splnit mnoho požadavků. V opatřeních uvádím pouze ty nejdůležitější z bezpečnostního hlediska.

- Stanovení bezpečnostních zón okolo JZ – i poměrně malé havárie s drobným únikem radiace mimo areál elektrárny nám ukázaly, že nové elektrárny již dnes není možné budovat v obydlených oblastech. I v případě drobného úniku, bývá kontaminace ve vzdálenosti mnoho kilometrů od elektrárny. Druhým důvodem pro velkou odlehlost jaderného zařízení je jeho podstatně jednodušší ostraha a ochrana před, v současné době stále aktuálnějšími, teroristickými útoky. Prázdný a bezlidný perimetr se podstatně lépe kontroluje.
- Dostatek vody na chlazení – hydrometeorologická situace v České republice se každoročně zhoršuje a vodní zdroje postupně vysychají, proto nový jaderný zdroj musí být umístěn u dostatečně průtočné řeky. Rybníky, jezera a přehrady bez dostatečného průtoku jsou nevyhovující, v případě havarijního chlazení nemusí poskytnout dostatek vody.
- Geologické a seismické poměry – nejbezpečnější jsou stavby postavené na krystaliniku, např. rula, žula nebo magnetit, ležící mimo aktivní zlomy a v místech kde nejsou zaznamenána větší zemětřesení.

6.3 Technická závada

Technické závady jsou bohužel nevyhnutelnou součástí každého složitého technického zařízení. Tyto závady mohou způsobit vážné narušení jaderné bezpečnosti, proto je nutné neustále hledat a aplikovat další opatření k jejich prevenci a minimalizaci jejich dopadu.

6.3.1 Opatření proti technickým závadám

Pravidelná údržba a servis

Pravidelná údržba zařízení pomůže identifikovat potenciální problémy dříve, než se stanou závažnými. Díky pravidelnému servisu lze včas nahradit opotřebované díly, což může snížit riziko poruchy.

Monitoring a diagnostika

Používání nástrojů pro monitorování a diagnostiku zařízení může pomoci identifikovat potenciální problémy dříve, než se stanou závažnými. Tyto nástroje mohou sledovat provoz všech klíčových a bezpečnostních systémů.

Redundance zařízení

Redundance, zdvojení, nebo znásobení zařízení nebo bezpečnostních systémů je důležitý prostředek ke zvyšování spolehlivosti a odolnosti proti chybám a závadám.

Plán havarijního zotavení

Plán havarijního zotavení je důležitý aspekt pro rychlé obnovení provozu po technické závadě. Plán by měl obsahovat kroky, které je třeba podniknout, aby se riziko výpadku minimalizovalo a obnovení proběhlo co nejrychleji.

Tato opatření mohou pomoci snížit počet technických závad. Je však důležité si uvědomit, že technické závady nelze zcela vyloučit, a proto je důležité mít havarijní plán pro případ, že k nim dojde.

6.4 Zatajování a zamlčování

Vlády států, i společnosti, které jaderné elektrárny provozující často informace o haváriích těchto zařízení zatajují, zamlčují nebo marginalizují.

6.4.1 Opatření proti zatajování a zamlčování

Automatizované informační systémy

Automatizované informační systémy, které by přes internet přenášely aktuální informace o stavu zařízení, a formou zpráv zasílaly varování v případě překročení daných limitů. Podmínkou je samozřejmě nemožnost tyto informace upravovat a editovat.

Nezávislé pozorovatelské organizace

Nezávislé pozorovatelské organizace, které by v rámci režimových opatření měly přístup k aktuálním informacím o stavu zařízení a měly by povinnost o překročení daných limitů informovat obyvatele a média.

Komunikace o riziku

Komunikace o riziku je proces sdělování informací mezi zainteresovanými stranami, jako jsou státní organizace, podniky, média, vědecké organizace, zájmové organizace a veřejnost.

Systém komunikace o riziku má podle OECD sedm základních pravidel:

- akceptovat veřejnost jako legitimního partnera,
- pečlivě naplánovat a vyhodnotit účinnost komunikace,
- naslouchat veřejnosti,
- slušnost a upřímnost,
- koordinace a spolupráce s dalšími stranami,
- vycházení vstříc potřebám médií,
- vyjadřovat se jasně a pochopitelně.

Stejně jako má společnost právo na ochranu před nebezpečím, mezi něž se řadí i nebezpečí související s některými výrobními aktivitami, má právo i na ochranu před účinky průmyslových havárií. Legislativně je tato povinnost provozovatelů zařízení podchycena v zákoně č. 224/2015 Sb., Zákoně o prevenci závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami nebo chemickými směsmi a v zákoně č. 263/2016 Sb., Atomovém zákoně.

Problematice způsobu komunikace rizika směrem k veřejnosti, ale i k orgánům státní správy nebo médiím je vedením jednotlivých firem věnováno velmi málo pozornosti. Mezi základní problémy v současnosti patří nedostatek osob schopných smysluplné komunikace, nebo jejich nedostatečná profesionální úroveň. K dalším příčinám patří rakousko-uherské úřednické manýry, dále zdokonalované papalášstvím z doby totalitního režimu. Současní úředníci nebo manažeři proto stále rádi rozhodují pohodlně z pozice síly, a nikoliv na základě společenského konsenzu. (ŠEMEROVSKÝ, a další, 2005)

ZÁVĚR

Z kvantitativní analýzy databáze událostí INES i z kvalitativní analýzy vybraných závažných havárií vyplývá, že celkový počet událostí v jaderné energetice setrvale klesá, na druhou stranu každých 10-20 let se stane velmi těžká havárie. 1957 komplex Maják Kyštym, 1979 Three Mile Island, 1986 Černobyl, 1993 Tomsk, 2011 Fukušima.

Po každé významnější jaderné havárii, nebo úniku radionuklidů do životního prostředí, se v dané společnosti, ale často v celém světě, zvedla vlna protijaderných nálad. Z toho vyplývá otázka, je opravdu jaderná energetika pro lidstvo tak nezbytná, i za cenu nepřiměřených rizik které přináší, nebo je jí možné něčím smysluplně nahradit?

Odpůrci jaderné energetiky nejčastěji zmiňují jako hlavní nevýhodu jaderné energetiky její dopady v případě havárie, kdy může dojít k úniku radioaktivních látek, což má vážné důsledky pro životní prostředí a lidské zdraví.

Dalším závažným problémem je produkce velkého množství radioaktivního odpadu, který zůstává nebezpečný po dlouhou dobu. Bezpečné skladování odpadu je nákladné a vyžaduje dlouhodobou péči, aby se minimalizovalo riziko jeho úniku, nebo zneužití například teroristy.

Dále zmiňují velkou zátěž pro životní prostředí, která vzniká po celý palivový cyklus. Začíná emisemi a odpady při těžbě uranové rudy a její tisíce kilometrů dlouhé přepravy do zpracovatelských závodů, které jsou nejčastěji v Rusku a Spojených státech. V těchto závodech se uran mele, louží, konverzuje a obohacuje, při těchto procesech opět vzniká velké množství emisí a odpadů. Dále se za produkce emisí uran přepravuje do dalších závodů, kde se z něj vyrábí jaderné palivo, což se samozřejmě neobejde bez vzniku dalších odpadů a emisí. Odtud jaderné palivo opět putuje přes půl zeměkoule zpět do jaderné elektrárny a opět vznikají emise. V tomto okamžiku začíná „bezemisní“ výroba elektrické energie. Samotná výroba elektřiny opravdu moc odpadů a emisí neprodukuje, to se už však nedá říct o tisících zaměstnanců a celé elektrárně, která produkuje velké množství jak odpadů, tak emisí. Posledním článkem palivového cyklu je buď dlouhodobé skladování, nebo přepracování vyhořelého paliva. Bohužel v obou případech opět vzniká velké množství emisí i odpadů. Vznik velkého množství emisí a odpadů jak radioaktivních, tak ostatních po celou dobu palivového cyklu je dán velkou složitostí systému, logistickou náročností a spotřebou velkého množství energie.

Dále odpůrci jaderné energetiky upozorňují na neekonomičnost výroby elektrické energie z jádra, která začíná velmi nákladnou výstavbou jaderných elektráren, a často překračuje plánované rozpočty. Pokračuje ekonomickou náročností palivového cyklu. A končí náklady na likvidaci jaderných elektráren a skladování odpadu, které jsou také vysoké, a navíc jsou tyto náklady přenášené na další generace.

V neposlední řadě také upozorňují na riziko šíření jaderných zbraní. Existuje totiž obava, že technologie jaderné energetiky může být zneužita k výrobě jaderných zbraní. To vyvolává obavy o bezpečnost a šíření zbraní ve světě.

Jako alternativu k jaderné energetice nabízí především obnovitelné zdroje energie, jako je sluneční, větrná, vodní a geotermální energie, které jsou čisté a obnovitelné zdroje energie. Navíc fotovoltaické panely a větrné turbíny jsou stále výkonnější a cenově dostupnější, což umožňuje jejich širší využití.

Dále doporučují zvyšování energetické účinnosti a používání energeticky úsporných technologií v průmyslu, budovách a dopravě, které může snížit spotřebu energie a tím i emise skleníkových plynů.

Alternativou k jaderným elektrárnám jsou i plynové elektrárny, které spalující zemní plyn, jsou vysoce efektivní a mají relativně nízké emise skleníkových plynů ve srovnání s uhelnými elektrárnami.

Omezeně doporučují i uhelné elektrárny s technologiemi zachycování a ukládání oxidu uhličitého CCS. Tato technologie umožňuje zachytit emise CO_2 a následně je ukládat pod zem. CCS může snížit uhlíkové emise, ale stále se jedná o spalování fosilních paliv, které může mít negativní dopady na životní prostředí.

Další alternativou je využití biomasy, což je využívání organického materiálu, jako jsou rostlinné zbytky, dřevní štěpka nebo biologický odpad. Jedná se o spalování biomasy pro výrobu tepelné nebo elektrické energie, bioplynové stanice nebo biopaliva.

Jsou obavy odpůrců jaderné energie opodstatněné, nebo je pro bezpečnou budoucnost lidstva jaderná energetika nepostradatelná?

Dvě největší evropské ekonomiky, Německo a Francie, se na to dívají zcela odlišně.

Francie je velice silně závislá na jaderné energii. Její energetický mix je tvořen z více než 70 % jadernou elektřinou, což z Francie činí nejvíce jaderně orientovaný stát na světě.

Francie je známá svým vývozem jaderných technologií a aktuálně pracuje na několika projektech týkajících se jaderné energetiky.

Na druhou stranu Německo se rozhodlo postupně opustit jadernou energetiku po havárii ve Fukušimě v roce 2011. Německá vláda si stanovila cíl ukončit provoz všech jaderných elektráren v zemi do roku 2022. K tomuto opatření přistoupila s důrazem na bezpečnost a také z ekologických důvodů. Německo se, namísto jaderné energetiky, zaměřuje na rozvoj obnovitelných zdrojů energie.

Obě tyto země mají tedy zcela odlišné postoje ke jaderné energetice. Německo se snaží postupně opustit jadernou energii a zaměřit se na obnovitelné zdroje, zatímco Francie zůstává silně závislá na jaderné energii z hlediska provozu elektráren i vývoje jaderné technologie.

Jaderná energetika není příliš ekonomická ani ekologická za běžného provozu, v případě rozsáhlé havárie se však mění v ekonomickou i ekologickou katastrofu. Havárie jako byly v Černobylu nebo ve Fukušimě by byly pro Českou republiku zcela likvidační. Náklady na odstranění jejích následků by dosáhly výše mnoha státních rozpočtů, vážné dopady by zasáhly až 20 milionů obyvatel v České republice a okolních státech, a zničené a neobyvatelné území by mohlo mít dvojnásobnou rozlohu, než je rozloha České republiky.

Proto na základě principu předběžné opatrnosti, který nám říká: „I když není jisté, zda hrozící závažné poškození skutečně nastane, není to důvod pro odklad opatření, jež mu mají zabránit.“, je nutné vybavit a doplnit v současné době provozované jaderné elektrárny navrhovanými bezpečnostními prvky, popřípadě zvážit jejich další provoz, stejně jak to již udělalo několik provozovatelů a zemí v Evropské unii i mimo ni.

V případě hledání vhodného místa pro vybudování nové jaderné elektrárny v České republice, je nutné najít takové místo, které by splnilo předložené bezpečnostní požadavky, což je velmi obtížné. Splnila by to snad pouze lokalita na Šumavě.

Na energetickou nezávislost se však dnes již není potřeba dívat pouze z pohledu České republiky. Dnes jsme součástí Evropské unie, a tudíž je jedno kde na jejím území bude nová elektrárna vybudována. Z tohoto pohledu se jako nejvýhodnější a nejbezpečnější jeví lokality blízko moře, v odlehlých oblastech Skandinávie. Dalšími možnostmi by byly lokality na severní Sahaře a na Balkáně, kde by mohly být evropskými provozovateli vybudovány a provozovány jaderné elektrárny, z nichž by se elektřina přenášela do Evropské

unie. Tyto elektrárny by se daly považovat i za ekonomickou pomoc těmto státům, a zároveň příspěvek proti nelegální migraci.

To že k instalaci navržených bezpečnostních prvků spíše nedojde, a v případě hledání místa pro novou elektrárnu taktéž převládnou ekonomické zájmy nad bezpečností, se dá předpokládat, protože management má tendenci šetřit a rizika podhodnocovat, jak nám ukázala většina velkých havárií.

Jsem přesvědčen, že hlavního i dílčích cílů práce bylo dosaženo.

V průběhu práce byla vymezena terminologie a teoretická východiska související s využitím jaderné energie a jejími haváriemi. Dále byla charakterizována oblast využití jaderné energie na národní i globální úrovni. Poté byl sestaven přehled havárií při mírovém využití jaderné energie a provedena jejich analýza. Dále byly vyhodnoceny příčiny a dopady havárií při mírovém využití jaderné energie.

A jako hlavní cíl byla navržena vhodná opatření, která by mohla být přijata k minimalizaci rizika budoucích incidentů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Atominfo, 2011. Japonsko v rámci „pofukušimské“ energetické strategie možná ukončí projekt reaktoru na rychlých neutronech. *Atominfo.* [Online]. https://atominfo.cz/2011/07/japonsko-v-ramci-„pofukusimske“-energeticke-strategie-mozna-ukonci-projekt-reaktoru-na-rychlych-neutronech/.

CBC, 2016. Japanese power company TEPCO admits it lied about meltdown after Fukushima. *CBC News.* [Online]. https://www.cbc.ca/news/business/japan-fukushima-tepco-1.3645516.

COMBY, Bruno, 2007. *Environmentalisté pro jadernou energii.* Hodkovičky: Pragma. ISBN 978-80-7349-042-3.

ČESKO, 2022. *Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon - znění od 1. 2. 2022.* Praha: Zákony pro lidi.cz [online] © AION CS 2010–2023.

ČEZ, 2009. *Jaderná energetika v číslech.* Praha: ČEZ a.s.

ČEZ, 2013. *Učební materiál základní přípravy zaměstnanců vykonávajících činnosti s vlivem na jadernou bezpečnost.* Brno: ČEZ a.s.

ČEZ, 2023. Jaderná elektrárna Dukovany. *Skupina ČEZ.* [Online]. https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/edu.

ČEZ, 2023. Jaderná elektrárna Temelín. *Skupina ČEZ.* [Online]. https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/ete.

DALTON, David, 2009. Outage Incident At Hungary’s Paks-4 Rated INES Level 2. *Nucnet.* [Online]. https://www.nucnet.org/news/outage-incident-at-hungary-s-paks-4-rated-ines-level-2.

DIMITREV, Viktor Markovich, 2023. Konečný efekt. *Příčiny černobylské havárie jsou známé.* [Online]. http://accidont.ru/PS_effect.html.

EuropeanBank, 2023. Chernobyl Shelter Fund. *EuropienBank.* [Online]. https://www.ebrd.com/what-we-do/sectors/nuclear-safety/chernobyl-shelter-fund.html.

GERTNER, Jon, 2006. Atomic Balm? *The New York Times Magazine.* [Online]. https://www.nytimes.com/2006/07/16/magazine/16nuclear.html.

GOFMAN, John W, 1979. Foreword to the 1979 Printing of Poisoned Power, After the Three Mile Island Near-Disaster. *Ratical.org.* [Online]. https://ratical.org/radiation/CNR/PP/Foreward1979.html.

GOLOVINA, Světlana, 2021. SBU odtajnila nové dokumenty o katastrofě v jaderné elektrárně v Černobylu. *TV Zvezda.* [Online]. https://tvzvezda.ru/news/20214261358-yMZcQ.html.

GOULD, Peter, 1990. *Fire in the rain: The democratic consequences of Chernobyl.* Oxford: Polity Press in association with Basil Blackwell. ISBN-10: 074560787X.

HAMALČÍKOVÁ, Kamila, 2019. Černobyl vs. Fukušima: Která jaderná katastrofa více otřásla světem? *Elektřina.cz.* [Online]. https://www.elektrina.cz/cernobyl-vs-fukusima-ktera-jaderna-katastrofa-byla-horsi.

HANDRLICA, Jakub, 2012. *Jaderné právo: právní rámec pro mírové využívání jaderné energie a ionizujícího záření.* Praha: Auditorium. ISBN 978-80-87284-33-9.

HERMAN, Robin, 1979. Nearly 200,000 Rally to Protest Nuclear Energy. *The New York Times.* [Online]. https://www.nytimes.com/1979/09/24/archives/nearly-200000-rally-to-protest-nuclear-energy-gathering-at-the.html.

HEZOUČKÝ, František, a další, 2008. Dve vážne havárie na jadrovej elektrarni A-1. *Bezpečnost jaderné energie.* 2008, 9/10.

HIGGINBOTHAM, Adam, 2020. *Midnight in Chernobyl: The Untold Story of the World's Greatest Nuclear Disaster.* New York: Simon and Schuster. ISBN 978-1-5011-3463-0.

HOFFMEISTER, N., 1979. Brunsbuettel incident - events, experience. *Atw Atomwirtschaft, Atomtechnik.* 1979, 24(5).

HULTMAN, Nathan a KOOMEY, Jonathan, 2013. Three Mile Island: The driver of US nuclear power's decline? *Bulletin of the Atomic Scientists.* 2013, 69:3.

IAEA, 1992. *INSAG-7 The Chernobyl accident: updating of INSAG-1.* Vienna: International Nuclear Safety Advisory Group. ISBN 92-0-104692-8.

IAEA, 2004. 50 Years of Nuclear Energy. *IAEA.* [Online]. https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc48inf-4-att3_en.pdf.

IAEA, 2006. *Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience.* Vienna: IAEA. ISBN 92–0–114705–8.

IAEA, 2023. The 1986 Chornobyl nuclear power plant accident. *IAEA.* [Online]. https://www.iaea.org/topics/chornobyl.

JOHNSTON, Robert, 2005. Vinca reactor accident, 1958. *Johnston's Archive.* [Online]. http://www.johnstonsarchive.net/nuclear/radevents/1958YUG1.html.

Journalmural, 2023. Análise de PESTEL. *Sperohope.* [Online]. https://sperohope.com/an-lisis-pestel-para-qu-sirve.

KUNZ, Emil, a další, 1987. *Zpráva o radiační situaci po havárii v Černobylu* . Praha: Institut hygieny a epidemiologie Centrum hygieny záření.

Laka, 2023. Incremented radioactivity of the heat carrier during refueling outage at a time of fuel cleaning. *Documention and research centre on nuclear energy.* [Online]. https://www.laka.org/docu/ines/event/76.

LEATHERBARROW, Andrew, 2020. *Černobyl 01:23:40: neuvěřitelný příběh nejhorší jaderné katastrofy.* Brno: CPress. ISBN 978-80-264-3032-2.

LIBRA, Martin, MLYNÁŘ, Jan a POULEK, Vladislav, 2012. *Jaderná energie.* Praha: Ilsa. ISBN 978-80-904311-6-4.

Managementmania, 2015. PESTLE analýza. *Managementmania.* [Online]. https://managementmania.com/cs/pestle-analyza.

MEDVEDEV, Zhores, 1992. *The Legacy of Chernobyl.* New York: W. W. Norton & Company. ISBN-13: 978-0393308143.

Mobbybusiness, 2023. Was ist eine PEST-Analyse? *Mobbybusiness.com.* [Online]. https://www.mobbybusiness.com/2143what-is-pest-analysis.

NuclearRisk, 2023. Tomsk-7/Seversk, Russia. *The Nuclear Chain.* [Online]. http://www.nuclear-risks.org/en/hibakusha-worldwide/tomsk-7seversk.html.

NY.Times, 1993. 14-Year Cleanup at Three Mile Island Concludes. *The New York Times.* [Online]. https://www.nytimes.com/1993/08/15/us/14-year-cleanup-at-three-mile-island-concludes.html.

PHILLIPS, Susan, 2020. Pennsylvania raises alarms on transfer of radioactive Three Mile Island reactor. *State Impact Pennsylvania.* [Online]. https://stateimpact.npr.org/pennsylvania/2020/04/17/pennsylvania-raises-alarms-on-transfer-of-radioactive-three-mile-island-reactor/.

PIKE, John, 2018. Chelyabinsk-65 / Ozersk. *GlobalSecurity.org.* [Online]. https://www.globalsecurity.org/wmd/world/russia/chelyabinsk-65_nuc.htm.

PITOŇÁK, Vojtěch a PÍSEK, Václav, 2018. *Významné historické havárie na jaderných zařízeních.* Praha: Česká nukleární společnost. ISBN 978-80-02-02788-1.

PLANAS, Oriol, 2010. Nuclear Accident in Chalk River - Ontario, Canada. *Nuclear Energy.* [Online]. https://nuclear-energy.net/nuclear-accidents/chalk-river.

PLANAS, Oriol, 2014. How Did the Kyshtym Disaster Happen? Mayak Facilities, Russie. *Nuclear Energy.* [Online]. https://nuclear-energy.net/nuclear-accidents/mayak.

PLOKHY, Serhii, 2019. *Černobyl: historie jaderné katastrofy.* Brno: Jota. ISBN 978-80-7565-462-5.

RASPOPOV, Pavel, 2011. Radiační rezervace východního Uralu. *Uraloved.ru.* [Online]. https://uraloved.ru/vostochno-uralskiy-zapovednik.

ROGOVIN, Mitchell, 1980. *Three Mile Island: a report to the commissioners and to the public.* Washington D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission. doi:10.2172/5395798.

SEQUENS, Edvard, 2010. *Jaderná energetika: jen problémy a žádné řešení: pravda o jaderné energetice.* České Budějovice: Calla - sdružení pro záchranu prostředí. ISBN 978-80-87267-11-0.

SHCHERBAK, Iurii, 1989. *Chernobyl: A Documentary Story.* London: Palgrave Macmillan. ISBN-13: 9780333496671.

STROHMANDL, Jan, 2023. *Metologie vědy.* Uherské Hradiště: Univerzita Tomáše Bati.

STURGIS, Sue, 2009. Investigation: Revelations about Three Mile Island disaster raise doubts over nuclear plant safety. *Facingsouth.org.* [Online]. https://www.facingsouth.org/2009/04/investigation-revelations-about-three-mile-island-disaster-raise-doubts-over-nuclear-plant-s.

SUJB, 2008. *INES Uživatelská příručka.* Praha: SUJB.

SUJB, 2021. 35 let od havárie v Černobylu (SÚJB). *SUJB.* [Online]. https://www.sujb.cz/radiacni-ochrana/dnes-si-pripominame-35-let-od-havarie-na-cernobylske-jaderne-elektrarne.

SUJB, 2021. Uplynulo 10 let od jaderné havárie na elektrárně Fukušima I. *SUJB.* [Online]. https://www.sujb.cz/aktualne/detail/dnes-si-pripominame-10-let-od-jaderne-havarie-na-elektrarne-fukusima-i.

SUJB, 2023. Stupnice INES. *SUJB.* [Online]. https://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/ines/stupnice-ines/.

ŠEMEROVSKÝ, Zdeněk, a další, 2005. Vybrané kapitoly o komunikaci rizika. *Acta hygienica, epidemiologica et microbiologica.* 1/2005.

ŠTOREK, Pavel, 2009. Poločas rozpadu. *Galaktis.cz.* [Online]. https://galaktis.cz/clanek/polocas-rozpadu/.

ŠTRAIT, Jaroslav, 2016. *Černobyl + 30: ve správný čas na špatném místě.* Modřišice: Presstar. ISBN 978-80-87141-40-3.

URBANČÍK, Libor, 2014. *Jaderná bezpečnost: na půdorysu atomového zákona.* Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 978-80-214-4971-8.

VIČAR, Dušan, a další, 2020. *Jaderné, radiologické a chemické zbraně, radiační a chemické havárie.* Zlín: Univerzita Tomáše Bati. ISBN 978-80-7454-947-2.

WAGNER, Vladimír, 2015. *Fukušima I poté.* Praha: Novela bohemica. ISBN 978-80-87683-45-3.

WorldNuclear, 2007. Tokaimura Criticality Accident. *World Nuclear Association.* [Online]. http://www.world-nuclear.org/info/inf37.html.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CCS	Carbon Capture and Storage, česky zachycování a ukládání oxidu uhličitého
HZS	Hasičský záchranný sbor
IAEA	International Atomic Energy Agency, česky MAAE
INES	The International Nuclear Event Scale, česky Mezinárodní stupnice jaderných událostí
JAPCO	Japan Atomic Power Company, česky Japonská atomová elektrárenská společnost
JE	Jaderná elektrárna
KGB	Kamiťét gasudárstvěnoj bězapásnosti, česky Výbor státní bezpečnosti
MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii, anglicky IAEA
MEC	Metropolitan Edison Company, česky Metropolitní Edisonova společnost
NEA	Nuclear Energy Agency, česky Agentura pro jadernou energii
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development, česky Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj
PESTLE	Political, Economical, Social, Technological, Legal, Ecological, česky politické, ekonomické, sociální, technologické, právní, ekologické
RB	Reaktorový blok
RBMK	Reaktor bolšoj moščnosti kanalnyj, česky kanálový reaktor velkého výkonu
SSSR	Svaz sovětských socialistických republik
SUJB	Státní úřad pro jadernou energii
VVER	Vodo vodní energetický reaktor

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma jaderné elektrárny 16
Obrázek 2 Generace reaktorů v jaderné energetice 17
Obrázek 3 Graf počtu provozovaných reaktorů 19
Obrázek 4 Graf počtu reaktorů v jednotlivých zemích 19
Obrázek 5 Graf počtu reaktorů ve výstavbě 20
Obrázek 6 Graf počtu trvale vyřazených reaktorů 20
Obrázek 7 Důležité parametry českých JE 22
Obrázek 8 Stupnice INES událostí 26
Obrázek 9 Graf událostí INES ve světě 36
Obrázek 10 Graf událostí INES v Evropě 37
Obrázek 11 Graf událostí INES v České republice 37
Obrázek 12 Graf stupňů INES ve světě 38
Obrázek 13 Graf stupňů INES v Evropě 39
Obrázek 14 Graf stupňů INES v České republice 39
Obrázek 15 Graf událostí INES v jednotlivých státech 40
Obrázek 16 Východouralská radioaktivní stopa 43
Obrázek 17 Vystřelený palivový soubor 48
Obrázek 18 Utavený palivový článek 51
Obrázek 19 Prezident Jimmy Carter odjíždí z Three Mile Islandu 54
Obrázek 20 Radiační znečištění a četnost výskytu rakoviny v okruhu 15 km od TMI 56
Obrázek 21 Zhavarovaný 4. RB 63
Obrázek 22 Nový kryt 68
Obrázek 23 Pripjať město duchů 69
Obrázek 24 Povrchová kontaminace cesiem v okolí místa havárie 73
Obrázek 25 Povrchová kontaminace cesiem v Evropě 74
Obrázek 26 Trajektorie vzdušných hmot 75
Obrázek 27 Trajektorie vzdušných hmot druhého zvýšení radioaktivity 75
Obrázek 28 Plošná aktivita cesia v půdě v Československu 76
Obrázek 29 Elektrárna Fukušima po havárii 83
Obrázek 30 Mapa zakázané zóny 87
Obrázek 31 Vývoj kontaminace v čase 90
Obrázek 32 Kontaminace Tichého oceánu rok po havárii 91
Obrázek 33 Elektrárna Fukušima a nádrže s kontaminovanou vodou 92

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Databáze INES