

# PŘÍČINY SELHÁNÍ NAKLÁDÁNÍ S RADIOAKTIVNÍMI LÁTKAMI VE SVĚTĚ

Dana PROCHÁZKOVÁ

## CAUSES OF FAILURES OF HANDLING WITH RADIOACTIVE SUBSTANCES IN THE WORLD



### **ABSTRAKT**

Článek obsahuje výsledky studia selhání nakládání s radioaktivními látkami ve světě. Mezi předmětné pohromy jsou zařazeny jaderné útoky a testy, radiační nehody a havárie a jaderné nehody a havárie.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** radioaktivní látky, jaderné technologie, jaderná zařízení, bezpečnost, rizika, nehody, havárie.

### **ABSTRACT**

The paper contains the results of failures of handling with radioactive substances in the world. Among the appropriate disasters they are included the nuclear attacks and tests, radiological incidents and accidents, and nuclear incidents and accidents.

**KEY WORDS:** radioactive substances, nuclear technology, nuclear facilities, safety, risks, incidents, accidents.

## 1. ÚVOD

Znalosti i zkušenosti ukazují, že nakládání s radioaktivními látkami je spojeno s mnoha nebezpečími pro lidi, majetek, životní prostředí, technická díla a infrastruktury. Jejich používání pomáhá rozvoji, a proto jaderné technologie a zařízení, ve kterých se technologie provozují, jsou dnes předmětem specifického sledování. Předložená práce obsahuje výsledky studia jaderných útoků, jaderných testů, nehod a havárií spojených s radioaktivními látkami.

Šetření je prováděno z důvodu stanovení zásad pro zajištění bezpečnosti lidského systému, jelikož aplikace radioaktivních látek mají řadu rizik a jaderná zařízení jsou kritické objekty, které jsou zároveň velmi zranitelné i velmi důležité pro rozvoj lidské společnosti. Dopady na lidi a další veřejná aktiva působí jak úmyslné zneužití jaderných materiálů, tak provoz zařízení používajících jaderné materiály a jaderné technologie. Z kritického hodnocení příčin narušení životních podmínek lidí sledovanými pohromami je zřejmá velká role lidského faktoru; když nejde o úmysl, tak většinou jde o: organizační havárie, tj. špatná kultura bezpečnosti; chybné lidské úkony; nebo nedostatečné znalosti.

## 2. RADIOAKTIVNÍ LÁTKY A JADERNÉ TECHNOLOGIE

Radioaktivita neboli radioaktivní přeměna látky je jev, při němž dochází k vnitřní přeměně složení nebo energetického stavu atomových jader, přičemž je zpravidla emitováno vysokoenergetické ionizující záření. Objevil ji v roce 1896 Antoine Henri Becquerel u solí uranu. Přirozená radioaktivita je důsledkem samovolné přeměny atomového jádra, přičemž přirozeně radioaktivních je mnoho látek v přírodě i ve tkáních živých organismů[1]. Naše znalosti ukazují, že přírodní radioaktivita je nedílnou součástí našeho životního prostředí. Např. všechny formy draslíku, které se vyskytují v našem životním prostředí, obsahují i radioaktivní draslík  $^{40}\text{K}$ , tj. přírodní zdroj ozáření. V těle průměrného dospělého člověka je obsaženo 13 mg radioaktivního draslíku  $^{40}\text{K}$  o aktivitě v řádu stovek Bq/kg. Hodnota vnitřního ozáření, které je lidské tělo vystaveno díky draslíku  $^{40}\text{K}$  může dosahovat až 1 mSv/rok. Dalším prvkem, který přispívá k přírodnímu záření, je např. radioaktivní uhlík  $^{14}\text{C}$ , protože živé organismy jsou tvořeny asi z 20 % uhlíkem, přičemž zlomek atomů uhlíku tvoří právě radioizotop  $^{14}\text{C}$  s poločasem rozpadu 5730 let, což představuje celkovou aktivitu  $^{14}\text{C}$  v lidském těle okolo 5 kBq [1].

Umělá radioaktivita je podmíněna přeměnou atomových jader, která je způsobena vnějším vlivem, například ostřelováním jádra částicemi alfa se jádra atomu mohou dále samovolně přeměňovat, což znamená, že zákonitosti přeměny uměle vytvořených jader jsou shodné se zákony popisujícími přeměny přirozeně radioaktivních jader [1].

Současné poznání ukazuje, že člověk je permanentně vystaven radioaktivnímu záření; cca 78% záření přichází z vesmíru (kosmické záření - jeho působením se do prostředí dostávají především radionuklidy  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ , ale též  $^{22}\text{Na}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ); 21 % má svůj zdroj ve **zdravotní péči**; a 1 % tvoří přírodní tzv. terestriální radionuklidy, mezi které patří tzv. primordiální radionuklidy, které vznikly v raných stádiích vesmíru a kvůli dlouhému poločasu přeměny většímu než  $10^8$  let se dosud vyskytují na Zemi ve významném množství (izotopy uranu  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ , thorium  $^{232}\text{Th}$ , draslík  $^{40}\text{K}$ ) a radionuklidy vznikající v tzv. přeměnových řadách (radium  $^{226}\text{Ra}$  a radon  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$ ).

Získané zkušenosti ukazují, že radioaktivní záření má potenciál poškozovat živé organismy, tj. může způsobit mutace, zhoubné bujení buněk poškodit plody, a proto při jeho využití se sleduje jeho působení a provádí se ochranná opatření. Je faktem, že více nebezpečné pro živé organismy je radioaktivita umělá. Člověk dnes využívá umělou radioaktivitu pro získávání energie, v lékařství k léčení zhoubných nádorů, pro prodloužení trvanlivosti potravin, k hubení bakterií, v archeologii k datování objevů atd. Postupem doby došlo ke zneužití energie vyvolané radioaktivní přeměnou, tj. vznikly jaderné zbraně. Na základě zkušeností s katastrofálními dopady těchto zbraní existují v dnešním světě smlouvy, které brání jejich rozšiřování a použití.

Jaderné elektrárny i další jaderná zařízení v současné době patří mezi kritické objekty, jež jsou sledovány v souvislosti se zajišťováním bezpečnosti nadnárodních uskupení a států v souvislosti s ochranou kritických infrastruktur. Proto v rámci výzkumu věnujeme pozornost jaderným technologiím a jaderným zařízením.

Je pravdou, že od svržení bomb na Hirošimu a Nagasaki má lidstvo velké obavy z jevů, při kterých dochází k uvolnění radioaktivního záření, explozi a k uvolnění velkého množství tepla. Obavy lidstva posílily jak dopady jaderných testů, tak dopady havárií civilních jaderných zařízení, které jsou pro lidi užitečné, protože pomáhají naplňovat potřeby lidí a zajišťovat jim kvalitní život.

Jelikož jaderná zařízení jsou významnými prvky energetické a výrobní infrastruktury, jsou potřebná, a proto je nutné zajistit jejich bezpečnost. Prvním krokem je poučit se z minulých havárií, pochopit rizika a jejich dopady v souvislostech. Na základě poznání je pak možné udělat kvalifikovaná opatření pro bezpečnost a ochranu občanů, veřejných aktiv, samotných jaderných zařízení a vůbec celého státu.

Abychom získali relevantní poznatky o předmětné oblasti, tak musíme vycházet z teoretických znalostí, experimentálních údajů a zkušeností. Pro potřeby výzkumu jsme sestavili na základě dostupných údajů databázi, která obsahuje jak údaje o radiačních nehodách a haváriích i jaderných nehodách a haváriích, jejich příčinách a dopadech, tak údaje o vojenských jaderných útocích a testech a jejich dopadech [2].

Predložená práca uvádza jak údaje o vybraných jevech, jejichž vyhodnocení přineslo nové poznatky, tak závěry důležité pro nakládání s radioaktivními látkami a pro bezpečnost složitých technologických celků, kterými bezesporu jaderná zařízení jsou.

### 3. DATABÁZE POHROM S PŘÍTOMNOSTÍ TRADIOAKTIVNÍCH LÁTEK A METODY VÝZKUMU

Výzkum je proveden na základě databáze [2], kterou jsme sestavili kritickou analýzou údajů z 678 zdrojů, jejichž seznam je uveden v archivu [3]. Databáze obsahuje 1978 jevů a je uspořádána chronologicky a obsahuje údaje o událostech, při kterých došlo nebo mohlo dojít k úniku radioaktivních látek nebo zařízení, anebo dokonce k explozi, požáru a úniku radioaktivních látek, které měly potenciál způsobit, anebo způsobily ztráty, škody a újmy na chráněných aktivech lidského systému [4]. Obsahuje údaje: čas vzniku události ve světovém čase, místo vzniku, popis příčin a dopadů, popis následků a u velkých jevů i poučení z události. Všechny rozpory mezi daty z různých zdrojů byly zváženy a vypořádány pomocí konkrétních dotazů u provozovatelů, jaderných dozorů a příslušných specialistů z Mezinárodní agentury pro atomovou energii (IAEA - MAEA). Údaje o velkých jaderných haváriích a jaderných testech jsou úplné od poloviny minulého století, protože IAEA provádí kontrolu a vyžaduje doklady k jevům, které jsou zaznamenány mezinárodními monitorovacími sítěmi.

Výzkum sledované problematiky je proveden statistickými metodami a především metodami inženýrských disciplín, které pracují s riziky (risk engineering methods), tj. metodami: kategorizace jevů, analýza příčin a důsledků, strom problémů, mapa procesů, technika What- If, procesní modely, Fishbone diagram apod. [5].

### 4. SOUHRNNÉ ÚDAJE

Na základě kritického posouzení údajů IAEA [6] a v databázi [2] jsme odvodili následující fakta:

- od r. 1954 (kdy byl zkonstruován první jaderný reaktor) již bylo více než 100 jaderných havárií a radiačních nehod v civilních objektech, např.:
  - jaderné elektrárny (např. roztavení aktivní zóny (jádra reaktoru): 1969 Vaud, 1979 Three Mile Islands, 1986 Černobyl, 2011 Fukushima, menší Idaho 1954 etc.; únik radioaktivity: např. 1980 Saint Laurent, 1986 Hamm a další),
  - havárie v průmyslu (např. 1957 Majak u Čeljabinsku – výroba plutonia a přepracování vyhořelého paliva; 1957 Hanford v Richlandu – přepracování jaderného paliva; 1999 Tokaimura – přepracování jaderného paliva a další),
  - radiační nehody v nemocnicích (např. Mexiko, Brazílie, USA, Španělsko, Maroko, Thajsko, Jižní Afrika, Indie, Egypt, Izrael a další),
  - radiační nehody při přepravě radioaktivních materiálů (např. při výpadku motoru letadla USAF B-50 s atomovou bombou Mark 4 na palubě a další),
  - radiační nehody způsobené špatným uložením radioaktivních odpadů (např. okolí řeky Teča na východní části jižního Uralu v oblasti Čeljabinsku),
  - jaderné havárie či radiační nehody ve výzkumných centrech a laboratořích (např. 1957 v údolí Simi Valley v Kalifornii; Izrael, Čína, Estonsko, Maďarsko a další),
- od r. 1940 již bylo několik set jaderných havárií ve vojenských objektech, jaderných testů pro vojenské účely a útoků jadernými zbraněmi:
  - útoky (1945 Nagasaki, Hirošima),
  - havárie vojenských reaktorů (např. 1952 Ontario, 1957 Windscale, Sellafield a další),
  - letecké dopravní nehody při přepravě bomb (záznamy jsou od r. 1950),
  - nehody a havárie jaderných ponorek (záznamy havárií jsou od r. 1963),
  - jaderné testy (nadzemní: USA-1032, Rusko-792, VB-88, Francie-212, Indie-3, Čína-47, Pákistán-3, Severní Korea-5; nejvíce podzemních - USA přes 1000 zkoušek v Pacifiku a více než 900 v Nevadě; Rusko – Semipalatinsk, Novaja Zemlja cca 600).

Na některých místech došlo k nehodám a haváriím opakovaně. Z hodnocení vyplývá, že:

- IAEA registruje 1276 jaderných nehod za posledních 14 let v 99 zemích,
- jaderné havárie, jaderné nehody a radiační nehody se nevyhýbají žádnému typu reaktoru, žádné jaderné elektrárny či jinému průmyslovému zařízení používajícímu jaderné technologie a žádnému státu,
- dobře zvládají jaderné nehody jaderné elektrárny s tlakovodními reaktory typu PWR s kontejnmentem (tj. typ, který je v ČR),
- jsou jaderné elektrárny, které přežily jaderné nehody i jaderné havárie a po rekonstrukci obnovily provoz,
- mnoho firem tajilo radiační nehody, jaderné nehody a jaderné havárie před světem i před občany v okolí, a tím nedošlo k nasazení ochranných opatření u občanů, což není v pořádku ve spojení s deklaracemi OSN o lidské bezpečnosti, prosazovanými od r. 1994 [7], ani s etickými a morálními pravidly všeobecně přijímanými lidskou společností,
- u mnoha jaderných havárií a nehod hrál významnou roli lidský faktor (viz příklady uvedené v následující kapitole). Je skutečností, že i když bezprostřední příčinou byla technická závada nebo chybný úkon obsluhy, tak se vždy našly chyby v dlouhodobém řízení a kultuře bezpečnosti, což znamená, že události spadají do kategorie označované od r. 1981 jako organizační havárie.

Proto nezbyvá nic jiného, než konstatovat, že jaderná zařízení jsou složitá technologická zařízení typu systémy systémů [8], a proto v souladu s výsledky Charlese Perrowa z roku 1980 získanými po důkladné analýze jaderné havárie TMI [9] je třeba u nich mít po všech stránkách připravenou kvalifikovanou odezvu (personál, odpovědnosti, postupy, materiál, techniku).

## 5. ÚTOKY A TESTY

Známé jaderné útoky byly provedeny na města Nagasaki a Hirošimu. Hirošima, přístav a průmyslové centrum Japonska, se stala prvním terčem jaderné zbraně; USA, těsně před koncem 2. světové války, dne 6. srpna 1945 v 8h 15m svrhly na město atomovou bombu [2]. Nagasaki bylo druhým a do dnešních dnů posledním městem na světě, které zažilo jaderný útok. V 03h49m ráno 9. srpna 1945 letadlo USA Bockscar svrhlo bombu "Fat Man" na Nagasaki. Průmyslové škody v Nagasaki byly vysoké, takže 68-80 % průmyslové výroby bylo zničeno. Bomba byla o něco silnější než "Little Boy" nad Hirošimou, ale protože Nagasaki leží ve více nerovném terénu, tak celkové škody byly menší [2]. Ztráty na lidských životech přesáhly desítky tisíc a počet poškození zdraví stovky tisíc. Důsledky zmíněných útoků vyvolaly v civilizovaném světě strach z atomové války a vznik organizací civilní obrany [10], později mezinárodní dohody o nešíření jaderných zbraní a dohody o kontrole jaderných arsenálů pod hlavičkou organizací OSN.

Databáze [2] obsahuje údaje o 1151 jaderných testech [2], tj. o menším počtu testů než uvádí IAEA. Důvodem je skutečnost, že ne všechny informační zdroje jsou veřejně dostupné. Jaderné testy v databázi jsou od r. 1943. Dále uvedeme vybrané informace z databáze [2].

První známé testy byly provedeny v lokalitě Hanford (USA): bylo zde vyrobeno plutonium pro útok na Nagasaki; bylo zde nespočet radiačních nehod při provozu (úniky do ovzduší a kontaminace podzemní vody); lokalita byla v provozu do r. 1987 a zůstaly problémy s vysoce aktivními kapalnými a pevnými odpady; a od 19. 8. 2008 slouží jako kulturní památka[2]. Pro informaci uvedeme dále podrobně jen údaje o vybraných testech.

Jadernými testy je proslulé místo Nye County v jihovýchodní Nevadě ležící v poušti asi 105 km jihozápadně od města Las Vegas [2]. Testy v rámci 43 různých programů zde byly v letech 1951-1992, 828 testů z celkových 928 testů bylo v podzemí; některé byly tak velké, že vyvolaly otřesy, které zaznamenali občané ve městě Las Vegas, kteří také často viděli houbovité mraky ze stovek atmosférických testů. Radioaktivní spad ze zkoušek v atmosféře byl v jižním Utahu, kde od poloviny 50. let je registrován zvýšený počet nemocí, které vyvolává ozáření.

Velmi mnoho radiačních nehod nastalo při realizaci projektu Manhattan, ve kterém se zkoušely jaderné zbraně a v řadě případů cíleně i dopady záření na živé organismy i lidi, což se dělo také později v rámci výzkumných programů ve Francii, Velké Británii i Sovětském svazu v různých částech světa [2].

K prvnímu cíleně provedenému výbuchu jaderné zbraně došlo dne 16. 7. 1945 v Novém Mexiku pod označením Trinity [2]. Vysoce známým místem jaderných testů je Atol Bikiny na Marshallových ostrovech; zkoušky se zde prováděly v letech 1946-1958; vysoká kontaminace ovzduší, fauny i flóry, která udělala ostrov neobyvatelný [2]. Známý je i obrázek podvodního jaderného výbuchu Baker, který byl proveden 25. 7. 1946 u Marshallových ostrovů [2]. V předmětné lokalitě byly prováděny testy vodíkové bomby a spad z bomby, která explodovala 1. 3. 1954, zaplavil celý svět [2].

V Sovětském svazu se první test jaderné zbraně uskutečnil 29. 8. 1949 u Semipalatinska (Kazachstán) [2]; později se zde prováděly nadzemní i podzemní testy, kterých bylo nejméně 468, např. [2]; nadzemní výbuchy se zde neprovádí na základě mezinárodní dohody zakazující zkoušky jaderných zbraní ve třech prostředích (ve vzduchu, v kosmu a pod vodou), podepsané 10. října 1963 v Moskvě mezi SSSR, USA a Spojeným královstvím; celková kapacita jaderných pum testovaných v letech 1949 až 1963 v Semipalatinské oblasti dosáhla 2500-násobek síly pumy Little Boy, svržené na Hirošimu. Mimo oblast se dostalo 55 radioaktivních oblaků z pozemních a atmosférických výbuchů a částečně i ze 169 podzemních testů, přičemž 224 explozí způsobilo radioaktivní zamoření východní části Kazachstánu, a proto bylo oficiálně uzavřeno dne 29. srpna 1991 [2].

Řada jaderných testů v letech 1951-1957 byla prováděna v Nevadě na místě Desert Rock [2].

Velká Británie provedla první jaderný test 3. 10. 1952 na ostrově Monte Bello v západní Austrálii, čímž se stala po USA a Sovětském svazu další jadernou mocností. Výbuch byl proveden na lodi 2.7 metru pod vodní hladinou a vytvořil kráter 6 m hluboký a 300 m široký ve tvaru talíře. Intenzita byla odhadnuta na 25 kilotun TNT; všechno, co zbylo z lodi Plym, byla "lesklá černá hmota", která byla vyplavena na břeh Trimouille Island. Dvě vrtulníky shromáždily vzorky kontaminované mořské vody z laguny. Vědci v plynových maskách a ochranných oblecích v malých lodkách navštívili různá místa, aby sbírali vzorky a nahrávali záznamy. Přestože nedošlo k obávané přílivové vlně, radioaktivní znečištění ostrovů bylo rozsáhlé a těžké. Bylo jasné, že kdyby atomová bomba explodovala v britském přístavu, byla by to katastrofa horší než bombardování Hirošimy a Nagasaki. Spádový oblak se zvedl do výšky 3000 m a podle plánu směřoval na moře. Ale později změnil směr a vanul nad australskou pevninu. Velmi nízké úrovně radioaktivity byly zjištěny až u Brisbane [2].

První test termonukleárního zařízení, v němž část výbušné síly pocházela z jaderné fúze, byl proveden 31. 10. 1952 světového času pod názvem Operace Ivy Mike na ostrově Elugelab v atolu Enewetak v Tichém oceánu. Výbuch vytvořil kráter o průměru 1.9 km a hloubce 50 m v místě, kde byl předtím ostrov Elugelab. Dle údajů v [2]: výbuch a masy vody vytvořené výbuchem (některé vlny až 6 m vysoké) zbavily testovací ostrov veškeré vegetace, což bylo pozorováno z vrtulníku 60 minut po testu, kdy houbovitý oblak a pára se rozpýlily; radioaktivní úlomky korálů padaly na loď do vzdálenosti 56 km; bezprostřední oblast kolem atolu byla na dlouhou dobu silně kontaminována; dva nové prvky, einsteinium a fermium, byly vytvořeny koncentrovaným neutronovým tokem kolem detonačního místa; a v blízkosti ohnivé koule došlo k rychlé tvorbě bleskových výbojů.

Testy v testovacím místě Nová Země v Archangelské oblasti byly prováděny v letech 1954-1990. V roce 1961 zde vybuchla nejsilnější jaderná zbraň „Bomba Car“, která způsobila zemětřesení s magnitudem (stupeň RichtEROVY stupnice) 7, které uvolnilo lavinu o velikosti 80 milionů tun, která zablokovala dva ledovcové potoky a vytvořila jezero 2 km dlouhé [2]. Celkem se zde provedlo 224 jaderných explozí s celkovou energií téměř 265 megatun TNT [2].

Známá je oblast testů v poušti v Nevadě, kde např. v období 28. 5. – 7. 10. 1957 prováděly testy, jak působí radiace na prasata a jak se snižuje fyzická a psychická odolnost vojáků [2].

Velká Británie v letech 1957 – 58 prováděla jaderné testy na ostrovech Malden a Christmas v souostroví Kiribati v Tichém oceánu [2].

Francie začala provádět jaderné testy až v roce 1960; dne 13. 2. 1960 odpálila atomovou bombu o síle 70 kt TNT v blízkosti Reggane, uprostřed alžírské Sahary během alžírské války (1954-62). Soustředila se především na nadzemní exploze, jejichž zplodiny dopadaly i na Evropu (tj. i na území Čech), a proto od r. 1962 zde prováděla pouze podzemní testy a i ty postupně přesunula na atol ve francouzské Polynésii [2].

Čína provádí jaderné testy od 16. 10. 1964 na testovacím místě Lop Nur [2].

Indie provádí jaderné testy od 18. 5. 1974 na základně Pokhran v Rajasthánu v blízkosti pakistánských hranic [2].

Dvojitý záblesk světla identifikovaný americkým satelitem Vela dne 22. 9. 1979 nedaleko ostrovů Prince Edwarda jihovýchodně od Afriky je nejčastěji vysvětlován jaderným testem s neutronovou bombou, který provedl Izrael ve spolupráci s Jihoafrickou republikou [2]; citovaný zdroj uvádí, že izraelský jaderný fyzik v roce 1986 potvrdil, že již v roce 1984 vyráběl Izrael neutronové bomby. Podle [2] Jihoafrická republika měla atomovou bombu v roce 1980, kterou pracovníci výzkumu v Pelindaba demontovali v roce 1996 a přitom byli ozáření a zemřeli.

Doklady o jaderných testech v Pákistánu jsou od r. 1998, kdy dle [2] bylo provedeno současně pět podzemních jaderných testů v Ras Koh Hills v provincii Balochistan.

Jaderné testy prováděné v Severní Koreji se datují od 25. 5. 2009 [2] a stále pokračují a vyvolávají protesty světové veřejnosti.

Všechna místa, ve kterých se prováděly a dosud provádí jaderné testy, jsou silně znečištěná radioaktivními látkami, a proto z řady těchto území byli lidé evakuováni [2].

Příčinou dopadů jaderných testů na lidi a další veřejná aktiva je lidská činnost, přičemž ke zvýšení dopadů a velkých následků často přispěly selhání techniky, špatně provedené požadované úkony či podcenění možných dopadů.

Úmyslné činy osob nebo skupiny osob s využitím radioaktivního materiálu proti jiným osobám již také existují, např. [2].

Z analýzy databáze vyplývá, že od 14. 2. 1950 [2] jsou údaje o 16 skoro nehodách při vojenských operacích. Předmětné jevy jsou spojeny především s přepravou atomových bomb, kdy bomby byly vyhozeny z letadel s tím, že informace o místech na zemském povrchu a dopadech vyvolaných bombami na zemském povrchu byly buď utajeny, anebo v dokumentaci bylo uvedeno, že k uvolnění radioaktivních látek nedošlo, např. [2]. Proto je, možná nesprávně, zařazujeme mezi skoro nehody.

## 6. RADIAČNÍ A JADERNÉ NEHODY A HAVÁRIE

Radiační nehody, radiační havárie, jaderné nehody i jaderné havárie jsou škodlivé jevy (tj. pohromy), ve kterých se projeví inherentní vlastnosti radioaktivních látek, které mají potenciál způsobovat ztráty, škody a újmy lidem i ostatním veřejným aktivům lidského systému. V třetím a čtvrtém případě jde o projevy vlastností předmětných látek, které nastávají při cíleně vyvolaných procesech v technických zařízeních. Jelikož v dnešní praxi jsou aplikace radioaktivních materiálů i jaderné technologie velmi rozšířené, je dále používáno dělení: radiační událost je jev, při kterém se vyskytly jen dopady na lidi a popř. i na životní prostředí způsobené pouze ionizujícím zářením; a jaderná událost je jev spojený s jadernými zařízeními, při kterém se vyskytly dopady na lidi, majetek, životní prostředí, technologické objekty a infrastruktury; tj. jde o jevy vyvolané neúmyslným nebo úmyslným selháním jaderných technologií, jejichž dopady jsou jen v jaderném zařízení – nehody, anebo i v okolí na veřejná aktiva - havárie.

### 6.1. Radiační nehody a havárie

Databáze [2] obsahuje 414 jevů, tj. radiačních nehod a havárií (z toho 244 bylo zařazeno do nehod). K předmětným jevům došlo při činnostech ve zdravotnických zařízeních, výzkumných ústavech, průmyslových podnicích, přepravě anebo skladování radioaktivních materiálů nebo radioaktivních odpadů. Na základě zkušeností z praxe počet jevů jistě není úplný, protože jsou

po povinně evidovány až v posledních letech a v řadě zemí stále ještě chybí povinnost jejich evidence. Dále uvedeme vybrané informace z databáze [2].

Radiační nehody a havárie jsou zaznamenány od r. 1896. První zaznamenaná událost je z Chicaga v r. 1896 – lékař ozařoval rentgenovými paprsky pacientovi kotník přespříliš, a proto bylo nutno nohu později amputovat. Pacient zažaloval lékaře a vysoudil 10 000 USD [2]. V jiném podobném případě [2] však soud rozhodl ve prospěch lékaře. Pro informaci uvedeme dále podrobně jen údaje o vybraných radiačních nehodách a radiačních haváriích.

Známý případ je případ Marie Skłodowské Curie, která zemřela v důsledku aplastické anémie způsobené vystavením masivnímu ozáření při práci; nepoužívala ochranné prostředky, protože tehdy nebyly účinky tvrdého záření ještě známy [2]. Řada radiačních nehod a havárií je popsána ve výzkumném komplexu Los Alamos (USA) [2]. Velmi mnoho radiačních nehod a radiačních havárií bylo od r. 1950 až do současnosti v centru Majak na Urale, např. [2]. Podobně je na tom i výzkumné centrum Idaho Falls ve státě Idaho, např. [2].

K radiačním nehodám dochází i v souvislosti s poruchou úložišť odpadů. Např. dle práce [2] došlo v Church Rock v Novém Mexiku k porušení hráze přehrady a přes 1000 tun pevného radioaktivního odpadu v 93 milionech galonů kyselých důlních odpadních vod vyteklo do řeky Puerco. Nečistoty putovaly 130 km po proudu do Navajo County v Arizoně. Místní obyvatelé, kteří byli většinou Navajos a kteří používají řeku Puerco pro zavlažování a chov hospodářských zvířat nebyli varováni, ani později odškodněni, i když roztok hlušiny měl hodnotu pH 1.2 a aktivitu alfa částic 128 nanocuries (4.7 kBq) na litr, a obsahoval radioaktivní uran, thorium, radium, polonium, kovy, včetně kadmia, hliníku, hořčíku, manganu, molybdenu, niklu, selenu, sodíku, vanadu, zinku, železa, olova a vysokou koncentraci síranů.

K radiačním haváriím dochází na mnoha místech a při různých situacích. Např. [2] uvádí, že v Praze v roce 1982 byl ze zahraničí přijat dopravní kontejner obsahující radiografický zdroj iridia <sup>192</sup>Ir. Mylně byl identifikován jako prázdný, a tak s ním bylo zacházeno, což mělo za následek radiační poškození kůže na pravém palci pracovníka, jehož tělo obdrželo dávku asi 0.2 rad. Další práce [2] ukazuje příklad nevhodného použití radioaktivní oceli z jaderného reaktoru; ta byla recyklována do prutů, které byly použity při stavbě bytových domů na severním Taiwanu, hlavně v Taipei v letech 1982 až 1984; jde o více než 2000 bytových jednotek a obchodů; asi 10 000 lidí bylo vystaveno dlouhodobě nízké hladině záření. V létě roku 1992 si pracovník elektrárenské Taipower přinesl Geigerův počítač do svého bytu, aby se dozvěděl více a zjistil, že jeho byt byl kontaminován. Navzdory povědomí o problému, majitelé některých budov, které mohly být kontaminovány i nadále pronajímají byty nájemcům. K podobnému případu došlo i v Mexiku a USA, když byl ve městě Ciudad Juarez v Mexiku k výrobě oceli pro nábytek použit šrot kontaminovaný aktivním izotopem kobaltu [2].

Radiační nehody jsou spojené i s úložišti radioaktivních a jaderných odpadů. Např. práce [2] uvádí údaje o únicích radioaktivní vody z úložiště vysoce radioaktivních odpadů z jaderných zařízení v letech 1982-1989; úložiště se nachází severozápadně od Murmansku a 60 km od norské hranice na západním břehu Západní Litsy na poloostrově Kola a je v provozu od roku 1961. Další nehoda tohoto druhu byla v srpnu 1987 v přístavu Koko v Nigeru; zahraniční společnost vysypala chemické odpady v přístavu, přičemž některé z nich obsahovaly radioaktivní materiály. Vyšetřování ukázalo, že 26 pracovníků, kteří zacházeli s odpady, utrpělo chemické zranění spolu s lehkým poraněním, které lze přičíst ozáření [2].

Podle údajů IAEA největší radiační nehoda se stala 13. 9. 1987 ve městě Goiania, v brazilském státě Goiás, kde byl z opuštěného nemocničního areálu ukraden starý zdroj radioterapie s cesiem <sup>137</sup>Cs. Následně s ním manipulovalo mnoho lidí, což mělo za následek čtyři úmrtí. Asi 112 tisíc lidí byly vyšetřeno na radioaktivní kontaminaci a u 249 bylo zjištěno, že mají významnou hladinu radioaktivního materiálu v nebo na svém těle. Z několika míst musela být odstraněna ornice, a několik domů bylo zničeno. Všechny věci uvnitř těchto domů byly odstraněny a vyšetřeny [2].

Nehoda v továrně Acerinox v Los Barrios v Cadizu, která zpracovává kovový šrot, v květnu 1998 zamořila celou Evropu. Došlo k ní tak, že kapsle cesia <sup>137</sup>Cs byla roztavena a radioaktivní látka byla uvolněna do atmosféry a rozšířila se po celé Evropě. Jaderné úřady ve Francii, Německu, Itálii a

Švýcarsku detekovaly až 2400 microbecquerelů ionizujícího záření ve vzduchu, 1000krát vyššího, než je obvyklé. Popel obsahoval mezi 640 a 1420 becquerels na gram (Euratom norma je 10 Bq / g), což je hodnota dostatečně vysoká, aby mohla být hrozbou pro veřejnost. 7000 tun radioaktivního odpadu bylo uklizeno do močálů v Mendana. Odhadované celkové náklady na úklid, skladování odpadu a ztráty ve výrobě v továrně se pohybovaly okolo 26 milionů USD [2].

Velmi časté jsou radiační nehody rentgenů, jak ve zdravotnických zařízeních, tak v průmyslových komplexech např. [2].

Během období od května 2004 do května 2005 bylo v nemocnici Jean Monnet d'Epinal ve městě Epinal ve Francii v průběhu radioterapie předávkováno 23 pacientů. Ošetření byla na rakovinu prostaty a dávky byly o 20% vyšší. První příznaky související s radiačním přexponováním se objevily v létě roku 2005. Jeden pacient v důsledku ozáření zemřel 25. června 2006 a u 13 dalších se prokázalo lokalizované radiační poškození. Ze zbývajících pacientů, 6 nevykazovalo žádné příznaky související s ozářením a 3 zemřeli z příčin nesouvisejících s ozářením. V červenci 2006 bylo zahájeno šetření, které dospělo v září k závěru, že na vině byl softwarový problém v kombinaci s nedostatečným zaškolením obsluhy se softwarem [2].

Databáze [2] obsahuje i údaje o sebepoškození člověka radioaktivitou; např. [2] uvádí, že nezaměstnaný rentgenolog se ozářil ukradeným zdrojem iridia  $^{192}\text{Ir}$  z průmyslové radiografie, což mělo za následek jeho smrt. Je známa řada případů, kdy k otravě vybraného jedince byla použita radioaktivní látka; např. [2] se popisuje, že studentovi byl v období 1. 10. 1994 – 15. 2. 1966 přimícháván spolužáky radioaktivní fosfor  $^{32}\text{P}$  ukradený v laboratoři; následky student pociťoval až do r. 1999.

Z analýzy databáze [2] vyplývá, že některé jevy spojené s radioaktivními materiály či radioaktivními zdroji, které měly potenciál poškodit chráněná aktiva, musíme nesprávně označit jako skoro nehody, protože nebyly nalezeny doklady o jejich dopadech na člověka či jiná veřejná aktiva; např. ztráty materiálů či zdrojů způsobené krádeží, zmizení americké jaderné ponorky Scorpion dne 22. 5. 1968 [2].

Všechna místa, ve kterých se vyskytly velké radiační havárie, jsou silně znečištěná radioaktivními látkami; z řady z nich byli lidé evakuováni [2].

## 6.2. Jaderné nehody a havárie

Databáze [2] obsahuje 369 jevů, tj. jaderných nehod a havárií (z toho nehod 270) souvisejících s provozem jaderných zařízení. Je třeba konstatovat, že v důsledku stále přísnějších bezpečnostních opatření řada jaderných nehod v poslední době není doprovázená únikem radioaktivity nebo únik je omezen tak, že se nedostane do okolí jaderného zařízení.

Jaderné nehody a havárie jsou zaznamenány od roku 1942. První zaznamenaná událost sledovaného druhu označovaná jako Leipzig I-IV experiment se stala na zařízení zhotoveném Wernerem Heisenbergem a Robertem Doepeltem pro množení neutronů. Při kontrole zařízení zacílené na zjištění, zda neuniká těžká voda, protože se objevilo vážné poškození těsnění (zpuchýřování). Po 20 dnech provozu byl přístroj kontrolován za účelem možného úniku těžké vody. Kvůli puchýřům vytvořeným na těsnění byl stroj otevřen. Při otevření se do zařízení dostal uranový prášek. Uran ohřál vodní plášť a vytvořil dostatečný tlak páry, která vystříkla z reaktoru. Hořící uranový prášek se rozptýlil po celé laboratoři a způsobil v objektu větší požár [2]. Pro informaci uvedeme dále podrobně jen údaje o vybraných jaderných nehodách a jaderných haváriích.

Do kategorie jaderných havárií patří i dopravní nehoda amerického pozorovacího letadla B-29 dne 5. 8. 1950 u Fairfield Suisun. Bombardér s 12 výbušnými bombami o hmotnosti 500 liber havaroval při pokusu o nouzové přistání. Přitom vznikl požár a po 15 minutách i výbuch, bylo zabito 19 lidí (posádka i záchranáři) a zraněno dalších 60 osob; výbuch vytvořil kráter 20 yardů napříč a šest stop hluboký a zvuková vlna byla pozorovatelná až do vzdálenosti 30 mil [2].

V průmyslovém areálu Rocky Flats Plant v Coloradu, který byl v činnosti v letech 1952 – 1992 došlo jak k řadě radiačních nehod i radiačních havárií [2], tak i k jaderným nehodám a haváriím v průmyslových objektech, při kterých bylo kontaminováno ovzduší, podzemní voda i půda v závodě i



v okolí průmyslového komplexu. Např.: v r. 1967 byl písek kontaminovaný plutoniem donesen až do Denveru; 11. 5. 1969 došlo k požáru, průmyslové havárii s kontaminací i okolí; v roce 1973 byla zjištěna v blízkosti Walnut Creek a Great Western Reservoir zvýšená hladina tritia. Některé z prvků se dostaly s odpadními vodami do tří přehrad, a proto byla vystavěna zařízení pro reverzní osmózu k vyčištění odpadních vod. V dalším roce byla nalezena zvýšená hladina plutonia v ornici a bylo vykoupeno dalších 4500 akrů do nárazníkové zóny. V roce 1987 byla zahájena cílená dekontaminace oblasti, přičemž poslední kontaminovaný objekt byl odstraněn v roce 2003, a 13. 10. 2005 byla oblast prohlášena za vyčištěnou [2].

Za první havárii prokazatelně způsobenou lidským faktorem se považuje havárie v Chalk River v Kanadě, která vznikla 12. 12. 1952. Vedoucí experimentálního reaktoru si během zkoušek náhle všimnul, že část regulačních tyčí je zcela vytažena. Sešel proto o patro níže, kde našel operátora, který otevíral ventily a vysunoval tím z reaktoru celé bloky regulačních tyčí. Ihned vydal pokyn k jejich zasunutí, ale některé zůstaly zaseknuté v horní poloze. Další operátor se dopustil chyby a vypustil vzduch z tlakových nádrží, které měly regulační tyče pohánět. Reaktor, jehož výkon stále rostl, byl nakonec zastaven zaplavením paliva vodou. Voda však začala vřít a některé palivové tyče popraskaly. Do prostor budovy se vylilo přes 4 miliony litrů kontaminované vody, která obsahovala 10 000 Curie radioaktivních látek. Neznámá část z těchto látek unikla do životního prostředí. Reaktor se napolo roztavil a musel být zlikvidován. INES Level 5 [2].

Kyštymská havárie se vyskytla 29. 9. 1957 v závodě Majak na Urale. Jde o třetí nejvážnější havárii se stupněm INES 6. Spad radioaktivního mraku měl za následek dlouhodobou kontaminaci plochy více než 800 až 20 000 km<sup>2</sup> v závislosti na směru od místa znečištění; nejvíce byl postižen směr severovýchodní, a to především izotopy cesia <sup>137</sup>Cs a stroncia <sup>90</sup>Sr. Záření z jaderné havárie bylo vystaveno přinejmenším 22 vesnic s celkovým počtem kolem 10 000 obyvatel. Někteří byli evakuováni po týdnu, ale trvalo téměř 2 roky, než došlo k celkové evakuaci. Vzhledem k utajení Majáku, nebyla populace postižených oblastí informována o havárii. O týden později se začalo s jednou evakuací, aniž by docházelo k vysvětlení důvodů pro evakuaci. Nejasné zprávy o katastrofě se začaly objevovat v západním tisku mezi 13. a 14. dubnem 1958 a až v roce 1976 byl rozsah katastrofy znám. Vzhledem k neexistenci ověřitelných informací docházelo k přehnanému bilancování katastrofy. Byly pozorovány oběti s kůží opadávající z jejich tváře, rukou a jiných částí. Skutečný počet obětí je stále nejistý, protože rakovina indukovaná zářením je klinicky nerozeznatelná od jakéhokoli jiného druhu rakoviny a poměr jejího výskytu lze měřit pouze prostřednictvím epidemiologických studií. Nejčastěji citovaný odhad je 200 úmrtí v důsledku rakoviny, ale původ tohoto počtu není jasný. Novější epidemiologické studie naznačují, že asi 49 až 55 úmrtí na rakovinu mezi obyvateli na břehu řeky může být spojeno s vystavením záření, což zahrnuje účinky všech radioaktivních látek uvolněných do řeky, z nichž 98% pochází z doby před nehodou v roce 1957. Aby se snížilo šíření radioaktivní kontaminace po nehodě, byla kontaminovaná zemina vykopána a skladována v oplocených ohradách, které byly nazývány "hřbitovy na zemi". Sovětská vláda v roce 1968 k zamaskování oblasti vytvořila East-Ural Nature Reserve do které byl zakázán přístup. Ústřední zpravodajská služba USA (CIA) věděla o nehodě Majáku v roce 1957 od roku 1959, ale držela to v tajnosti, aby se zabránilo negativním ohlasům pro rodící se americký jaderný průmysl [2].

Jaderná havárie „Windscale fire“ v Sellafieldu na severozápadu Anglie z 8. 10. 1957 je největší havárii ve Velké Británii, je klasifikovaná stupněm INES 5. Byla iniciovaná požárem den předtím, který vedl k přehřátí několika palivových článků v aktivní zóně. Z dokumentů [2] vyplývá, že při zahřívání reaktoru, kterým se měla obnovit zářením narušená struktura grafitu, se porouchal snímač teploty a palivové články začaly hořet a následovalo vznícení jejich povlaků. Když vedoucí směny zapnul ventilátory, aby články ochladil, tak se přívodem čerstvého vzduch palivové články prudce rozhořely. Teplota přesáhla 9000°C a teprve čtvrtý den se podařilo zaplavením reaktoru pěti miliony litry vody požár uhasit. Oheň mezitím zničil 8% paliva v reaktoru a uvolněné radioaktivní látky se rozptýlily přes komín nad Anglii, Wales a severní Evropu. Havárie se obešla bez zranění. Na území 520 km<sup>2</sup> v okolí elektrárny byl vyhlášen zákaz spotřeby mléka, ten byl odvolán po 44 dnech. Provoz reaktoru již nebyl obnoven. Ve stejném místě byla řada jaderných nehod a radiačních havárií v závodě na přepracování jaderného paliva [2].

Dne 15. 10. 1958 ve výzkumném komplexu Vinča v blízkosti Bělehradu došlo k havárii výzkumného reaktoru [2].

Velmi mnoho jaderných nehod od r. 1959 je zaznamenáno v provozu laboratoří provádějících průmyslový výzkum a vývoj v kalifornském Simi Valley [2, p72] a v dalších zemích.

Havárii jaderné elektrárny Three Mile Island z 28. 3. 1979 [2] lze považovat za přelom, který způsobil jak revoluci v chápání bezpečnosti složitých technických děl [10], tak i zesílení nároků IAEA na bezpečnost jaderných zařízení [7]. Předmětná havárie začala poměrně nevinně 28. března 1979 ráno. Vypovědělo službu čerpadlo sekundárního potrubí a turbína, napojená na potrubí se automaticky odpojila. Ačkoliv reaktor již nevyráběl elektřinu, pracoval dál na plný výkon, což vedlo k růstu teploty a tlaku v hlavním chladicím potrubí a k automatickému spuštění dalších kontrolních mechanismů. Nejprve se otevřel přetlakový pojistný ventil, aby snížil narůstající tlak v potrubí (asi tak jako tryska na Papinově hrnci), a poté se reaktor zastavil. Ani jedna z těchto událostí nebyla neobvyklá, došlo k nim již několikrát. Tentokrát se však situace vyvíjela jinak. Jenže pojistný ventil se zablokoval v otevřené poloze. Tlak v potrubí proto stále klesal, zatímco nádrž, do které ústil, brzy přetekla. Radioaktivní voda zaplavila prostor kolem reaktoru. Proto na řídicím pultu zazněly poplašné signály. Obsluha reaktoru věděla, že nastal problém, ale neznala jeho příčinu - kontrolka ukazovala, že se pojistný ventil normálně zavřel. Současně selhala náhradní čerpadla, která měla začít chladit reaktor. Byla totiž mimo provoz kvůli v té době probíhající údržbě. Indikátory funkčnosti čerpadla byly náhodou zakryty pohozenými papíry, takže ani tohoto varovného signálu si obsluha nevšimla. Tlak chladicí vody v reaktoru rychle klesal a nastávaly problémy. Reaktor, i když byl již zastaven, stále setrvačností vyráběl asi 6 % tepelného výkonu, který bylo potřeba odvádět a reaktor chladit. Když se spustila havarijní čerpadla, která do reaktoru začala pumpovat hektolitry chladicí vody, tak opět zasáhl člověk - pracovníci obsluhy špatně pochopili situaci a jedno z havarijních čerpadel ručně zastavili. Během několika minut začala voda v reaktoru vřít. Teplota prudce stoupala a začaly prskat palivové tyče. Aniž si to operátoři reaktoru uvědomovali, aktivní zóna reaktoru se začala tavit. A od této chvíle unikaly radioaktivní plyny pod tlakem přímo na oblohu nad okolím elektrárny. Rozsah havárie společnost MetEd několik dní tajila [2]. Teprve po dvou dnech vládní úřady nařídily **evakuaci tisíců těhotných žen a dětí**. V nastalé panice se tisíce lidí rozhodly oblast opustit ve svých autech. Svá obydlí opustilo dalších 200 000 lidí, kteří nedůvěřovali oficiálním údajům a raději byli opatrní. Jen 12 dnů před touto havárií lidé viděli film *Čínský syndrom (The China Syndrom)* z roku 1979, který popisoval podobnou nehodu a i proto byla veřejnost k událostem v elektrárně tak citlivá. Aby vláda zastavila hromadný útěk obyvatel, přijel 1. dubna 1979 na demonstrativní osobní návštěvu elektrárny tehdejší americký prezident James Carter a pensylvánský guvernér Richard Thornburgh. Následně byla jmenována komise pro vyšetření havárie, která označila za bezprostřední příčinu havárie závadu na bezpečnostním ventilu. Zároveň upozornila na pochybení personálu a jeho nedostatečný výcvik ve zvládání velkých nouzových situací. Předpokládá se, že do atmosféry bylo vypuštěno cca 2.5 miliónu curie radioaktivního plynu. Následná vyšetřování prokázala, že společnost MetEd tajila a zkrášlovala důležité informace o havárii reaktoru a únicích radioaktivity. Během nehody se filtry umístěné na větracích komínech, kterými radioaktivita unikala, ucpaly a přestaly fungovat. Záznamy z měřicích zařízení se podle tvrzení firmy MetEd záhadně „ztratily“! Monitorovací síť nefungovala správně, sběr vzorků proběhl narychlo a chaoticky a velká většina klíčových údajů chybí nebo je nespolehlivá. Existují studie, které popírají dopad havárie na lidi, i studie prokazující následky dopadů havárie na lidi i životní prostředí. Teprve v roce 1985 byl prověřen technický stav reaktoru, koncem 80. let byl reaktor dekontaminován a dán znovu do provozu (licenci má do roku 2034).

Jaderné havárie jsou spojeny i s ponorkami na atomový pohon, např. [2].

Havárie v jaderné elektrárně Černobyl dne 26. 4. 1986 se stupněm INES 7 šokovala svět. Významnou úlohu měl vodík, který je asi nejčastější příčinou nehod. Vodík, souvisí s provozem jaderných zařízení, voda se v nich v důsledku záření rozkládá na kyslík a vodík a nahromaděný vodík způsobuje výbuch. V technických oborech se někdy hovoří o stigmatu vodíku - nehoda vzducholodi Hindenburg, zkáza raketoplánu Challenger. Dle [2] těsně po havárii zemřelo 31 osob (zaměstnanců elektrárny nebo hasičů), přes 140 lidí bylo zraněno a více než 100 000 evakuováno. Skutečný rozsah havárie byl zveřejněn až po několika dnech. Od roku 1986 znají slovo Černobyl lidé na celém světě.

Vše začalo den před havárií, kdy bylo zahájeno plánované odstavení 4. bloku elektrárny. Před odstavením měl být proveden celkem běžný experiment. Měl ověřit, jestli bude elektrický generátor (poháněný turbínou) po rychlém uzavření přívodu páry do turbíny schopen při svém setrvačném doběhu ještě zhruba 40 vteřin napájet čerpadla havarijního chlazení. Tato elektřina je pro bezpečnost reaktoru životně důležitá: pohání chladicí čerpadla, regulační a havarijní tyče, osvětluje velín i řídicí pult. Plánovaný průběh experimentu zněl: Snížení výkonu na 25-30 % (700-1000 MW tepelných), což je nejnižší výkon, při kterém je povolen provoz tohoto typu reaktoru. Dále odstavení první ze dvou turbín, následné odpojení havarijního chlazení (aby nezačalo působit během testu) a nakonec přerušení přívodu páry. Popis experimentu a havárie je v databázi [2]. Problém byl v tom, že obsluha nebyla informována o odpojení elektřiny, a tudíž nesprávně zareagovala, a když pochopila situaci, bylo již pozdě a při zahájeném odstavování se zablokovaly tyče, čímž vznikly podmínky, které vyústily ve výbuch. Již v okamžiku výbuchu zahynuli dva lidé: jednoho srazila exploze z výšky a druhý uhořel. Mezi první oběti patřili také hasiči, kteří nebyli vybaveni ochrannými pomůckami, respirátory ani obleky, což se týkalo dokonce i jednotek, které sloužily přímo na elektrárně. Osudné bylo také to, že hasiči netušili, co je příčinou ohně a že všude kolem nich hoří vysoce radioaktivní zbytky reaktoru. Hasiči v té době stále ještě zalávali trosky reaktoru vodou. Radioaktivní tavenina ale měla teplotu přes 2000° C, takže voda se při styku s ní rozkládala na vodík a kyslík, které vzápětí explodovaly. Navzdory dobrému úmyslu a vinou neinformovanosti tak hasiči situaci ještě zhoršovali. Během pěti hodin po explozi se podařilo zabránit šíření ohně na další budovy elektrárny, zejména na sousední třetí reaktor. Třetí blok byl odstaven až čtyři hodiny po výbuchu čtvrtého reaktoru! V důsledku výbuchu se kusy grafitu povalovaly po celém areálu elektrárny; za pouhých 15 minut byl člověk v blízkosti takového předmětu odsouzen k akutní smrti z ozáření. Vojáci, zejména piloti helikoptér, které na reaktor shazovaly písek, olovo a další materiál, nebyli zpočátku vůbec chráněni proti radiaci. Trvalo tři dny, než armáda svépomocí vybavila helikoptéry alespoň základním stíněním, které chránilo posádku. V jaderné elektrárně bylo v době havárie přes 400 zaměstnanců, tento počet se ještě zvýšil o hasiče. Zahynulo 31 lidí, z toho 28 na následky z ozáření a tři na následky zranění při výbuchu. Akutní nemocí z ozáření různého stupně bylo postiženo 203 lidí. Z okruhu 30 km od elektrárny a dalších silně zamořených oblastí bylo evakuováno 116 000 obyvatel. Mnoho lidí v nejvíce zamořených oblastech obdrželo významné dávky (někteří až dvacetkrát více než obdrží během jednoho roku průměrný člověk kdekoli na Zemi, tedy přepočteno na dny to znamená, že někteří byly ozáření během výbuchu 7308 krát více než jiný den). Určení případných pozdějších následků je však složité, avšak platí, že jakýkoliv přírůstek obdržené dávky znamená určité zvýšení pravděpodobnosti vyvolání rakoviny. Úmrtnost se v obci zasažené explozí zvýšila až třikrát. Přes 40 tisíc dětí trpělo nemocí štítné žlázy, dvanáctkrát se zvýšila onemocnění anémií, velmi vzrostl výskyt leukémie. Na Ukrajině byl havárií postižen 1.5 mil. lidí včetně 250 000 dětí, v Bělorusku žije 1.2 mil. lidí na zamořeném území a asi 3.5 mil. osob v oblastech se zamořenou půdou. Dnes je zničený reaktor černobylského bloku číslo 4 skrýt pod mohutným železo-betonovým sarkofágem, jehož cena včetně řešení dalších následků exploze se pohybuje kolem dvou miliard dolarů. Podle expertů je třeba tuto ochranu před radioaktivitou každých 40 let obnovit. Okolo elektrárny jsou dvě zóny: 10 a 30 kilometrová. Oficiálním vlastníkem zón je Ministerstvo Černobylu Ukrajiny. Ve vnitřní zóně je úplný zákaz jakéhokoliv pohybu s výjimkou exkurzí a osob, které pracují v elektrárně. V 30 km pásmu kolem elektrárny probíhá druhá etapa vyklizovacích prací, která navazuje na první etapu probíhající v letech 1986 – 1989. Ta měla charakter nouzový a záchranný. Cílem právě probíhající druhé etapy je skrývka miliónů m<sup>3</sup> svršku zeminy, která je do hloubky 3 cm zamořena cesiem <sup>137</sup>Cs a stronciem <sup>90</sup>Sr. Ze zamořené půdy rostou deformované borovice s hněda oranžovými, různě pokroucenými korunami. Ve vnější zóně je dědina, do které se především starší lidé rok po havárii vrátili. Dnes jich tu žije asi 600. Na život si nestěžují, dostávají totiž finanční dávky od Ministerstva Černobylu Ukrajiny. Dvakrát týdně jim vozí autobus základní potraviny z území mimo zóny. Ještě nedávno byly v provozu dva reaktory této elektrárny. Dne 15. prosince 2000 byl odstaven poslední z nich na nátlak západoevropských zemí, a to především z psychologických důvodů. Mnoho lidí tak přišlo o práci. Někteří zaměstnanci elektrárny však zůstávají a pracují na likvidaci, zajištění a pozorování elektrárny. Vstupují do vybuchlého reaktoru a provádějí pozorování a měření. Vše je natáčeno kamerou. Příčiny katastrofy by se daly stručně shrnout takto:

- dvě porušení trvale platných předpisů, jedno nedodržení postupu experimentu a druhý úmyslné zrušení tří automatických ochran reaktoru,
- zastaralá koncepce reaktoru RBMK 1000 (je "nestabilní", má kladnou zpětnou vazbu); výbuch však nebyl nukleární (jako jaderná bomba), ale šlo o výbuch "klasický"; první výbuch způsobil přetlak v uzavřeném prostoru a druhý vodík.

Po zkušenostech z Černobylu jsou dnešní jaderné elektrárny jištěny tak, aby jejich bezpečnost na obsluhu vůbec nezávisela. Jednotlivé důležité systémy jsou zdvojené i ztrojené a nedají se vyřadit z činnosti. Dnes se používají reaktory především tlakovodní, které jsou uzavřené do mohutné neprodyšné železobetonové obálky (kontejnment). V kontejnmentu je reaktor s celým primárním okruhem. Kontejnment snese tlak až 0.6 MPa. V případě havárie se vzniklá pára a tlak v kontejnmentu rychle automaticky likviduje mohutnými havarijními studenými vodními sprchami s přísadou bóru tzv. barbotážním systémem (bór pohlcuje neutrony). V kontejnmentu vznikne naopak podtlak, takže nic neuniká ven. A právě ochranný tlakový kontejnment u varného reaktoru v Černobylu chyběl.

Havárie poškodila rozvoj jaderné elektroenergetiky a některé státy (např. Itálie, Španělsko, Švédsko, Rakousko) dočasně pozastavily nebo zpomalily další realizaci svých jaderných programů. Na odstranění následků havárie se podle některých zdrojů mohlo podílet až 600 000 osob, z nichž asi 150 000 potřebuje dnes zvláštní pozornost a péči.

Nedůvěru v jadernou energetiku zvýšila ještě havárie v jaderné elektrárně Hamm v Severním Porýní-Vestfálsku, ke které došlo 4. 5. 1986, tj. jen 6 měsíců poté, co byla připojena k rozvodné síti. Dle [2] při havárii došlo k úniku radioaktivního prachu do životního prostředí. Provozovatelé incident bagatelizovali a po několika týdnech elektrárnu opět zprovoznili. Reaktor měl technické potíže s palivovými články, které se lámaly častěji, než se předpokládalo. Po 80 incidentech byla elektrárna odstavena z provozu; dne 10. října 1991 byla 180 metrů vysoká suchá chladicí věž, která byla nejvyšší chladicí věží na světě, s pomocí výbuchu rozebrána a v období od 22. října 1993 do dubna 1995 bylo zbývající palivo vyloženo a transportováno do meziskladu v Ahaus. Zbývající zařízení bylo "bezpečně uzavřeno" a k demontáži nedojde před rokem 2027.

Jaderná havárie se stupněm INES 4 vznikla 30. 9. 1999 v závodě na přepracování uranu provozovaného JCO (Japan Nuclear Fuel Conversion Co.) dceřině společnosti Sumitomo Metal Mining Co. v obci Tōkai, okres Naka, prefektura Ibaraki. K nehodě došlo, když tři pracovníci připravovali malou dávku paliva pro experimentální rychlý množivý reaktor pomocí uranu obohaceného na 18,8% se štěpnými radionuklidy  $^{235}\text{U}$ . Příčinou nehody bylo rychlé přidání roztoku dusičnanu uranu, který obsahoval asi 16 kg uranu do srážecí nádrže. Tím se výrazně překročil limit 2.4 kg a došlo okamžitě k nekontrolovanému jadernému štěpení [2, p48]. Pět hodin poté byla zahájena evakuace asi 161 lidí z 39 domácností v okruhu 350 metrů od budovy. Dvanáct hodin po začátku incidentu byli požádáni obyvatelé v okruhu 10 kilometrů, aby zůstali preventivně doma a toto omezení bylo zrušeno následující odpoledne. Ozářeno bylo údajně přes 600 osob, dva pracovníci zemřeli. Reakce byla zastavena až druhý den. Havárie byla dosud označována za nejhorší jadernou havárii v Japonsku před Fukušimou a třetí nejhorší na světě [2].

Jaderná elektrárna Kashizawaki-Kariwa (Japonsko) byla 16. 7. 2007 postižena zemětřesením s magnitudem 6.6 (Richterova stupnice). Se svými 7 jednotkami jde o největší jadernou elektrárnu na světě s čistým elektrickým výkonem 7 965 MWe. Zemětřesení s epicentrem vzdáleným od elektrárny jen 19 km způsobilo materiální škody a malý únik radioaktivních látek; reaktory byly postaveny v souladu s normami nutnými pro zemětřesení a při zemětřesení řádně odstavily. Po zemětřesení se zjistilo, že zemětřesení způsobilo, že chybí data o provozu reaktoru z intervalu cca 20 minut. Dalším zjištěným nedostatkem bylo, že chybělo místo pro řízení odezvy na požár, který vznikl v důsledku zemětřesení. Proto byla elektrárna odstavena po dobu 21 měsíců a byla restartována až po seismických úpravách v roce 2009 [2]. Po zemětřesení 11. 3. 2011 byly opět všechny restartované jednotky odstaveny a byla provedena bezpečnostní vylepšení [2].

Jaderná elektrárna Fukushima Daiichi byla dne 11. 3. 2011 postižena zemětřesením o síle 9 stupňů Richterovy stupnice a silným tsunami s třemi nárazy vln dosahujících výšku až 18 m. Tsunami zatopilo elektrárnu a způsobilo havárii INES 7 [2]. Při havárii došlo s velkou pravděpodobností k

závažnému poškodení tří tlakových nádob reaktoru. Při obnažení paliva v reaktoru vznikál vodík, který byl následně příčinou tří mohutných explozí. Exploze zásadně přispěly k úniku a rozptýlení štěpných produktů, které dočasně způsobily okolí elektrárny neobyvatelným a také dočasně ekonomicky znehodnotily široké oblasti jinak velmi úrodné zemědělské půdy. Příčiny havárie je nutné hledat již v čase před samotnou havárií – nedostatečná připravenost personálu na možné havarijní stavy, zanedbávání připomínek regulačních úřadů, chyby v japonské legislativě týkající se regulačních úřadů a k havárii svojí měrou přispěly i kulturní předpoklady, zejména japonská hierarchie. Byly objeveny i chyby v zadávacích podmínkách u parametrů pro zemětřesení i tsunami – např. u tsunami byla brána jen data od r. 1890 (pro srovnání 30 km vzdálená jaderná elektrárna Onagawa ustála zemětřesení i tsunami, protože v zadávacích podmínkách zvažovala tsunami od r. 860).

Přes 150 000 obyvatel muselo být evakuováno z potenciálně nebezpečného okolí elektrárny z důvodu šíření štěpných produktů, ale prozatím nebyla potvrzena žádná úmrtí nebo nemoci způsobené ozářením. Více než 1000 evakuovaných obyvatel zemřelo na následky samotné evakuace, ať již kvůli pokročilému věku, nebo z důvodu chronických onemocnění.

Ničivá katastrofa tedy odhalila spoustu chyb v přístupu společnosti TEPCO k jaderné bezpečnosti, dále ukázala na roztříštěnost vedení po katastrofě a odhalila nebezpečnou laxnost kontrolních úřadů. Právě kvůli nedostatečné informovanosti japonské veřejnosti byla po havárii velmi prudká reakce vůči pokračování jaderné energetiky, což byl vedle bezpečnosti další z důvodů k odstavení zbylých japonských jaderných elektráren. Havárie se stala podnětem k politickým debatám o jaderné energetice po celém světě a vedla i k odborným debatám ohledně jaderné bezpečnosti. Kromě toho došlo ke vzniku nového jaderného regulačního úřadu, jenž oproti minulému nespádá pod Ministerstvo ekonomie, obchodu a průmyslu, ale pod Ministerstvo životního prostředí. Zemětřesení poškodilo rozvodné elektrické sítě spojující elektrárnu s rozvodnami, následkem čehož byla elektrárna bez jakéhokoliv vnějšího zdroje elektrické energie. Z toho důvodu došlo k automatickému spuštění záložních diesel generátorů, které však nebyly schopné provozu.

Situace byla stabilní, dokud vlny tsunami vyvolané zemětřesením nezaplavily a nezničily záložní diesel generátory, čerpadla mořské vody, elektrické vedení uvnitř elektrárny a zdroje stejnosměrného napájení. Ztráta elektrické energie znemožnila použití měřicích přístrojů a značně omezila funkce blokové dozorny. Nebylo možné zjistit hodnoty hladiny vody a tlaku v reaktoru a další klíčové parametry, což v důsledku znamenalo zbytečně prostoje a nedostatečně rychlé reakce na rapidně se zhoršující stav havárie.

V důsledku ztráty elektrické energie a nedostatečné připravenosti provozovatelů na takovou situaci docházelo postupně ke ztrátě záložních systémů chlazení na jednotlivých blocích. Nejhorší situace byla z počátku na bloku 1, kde se dá předpokládat první poškození aktivní zóny okolo 19:00 v den havárie. Po obnažení paliva dochází k nárůstu teploty palivových proutků vyrobených ze slitiny zirkonia. Když povrchová teplota palivových proutků překročí 900 °C, výrazně se zvyšuje množství exotermické reakci zirkonia s vodní párou, při níž vzniká oxid zirkoničitý a vodík. Vodík unikál z tlakové nádoby reaktoru a hromadil se ve vrchním patře budovy. Po dosažení výbušné koncentrace došlo k jeho explozi a hoření, což se na bloku 1 stalo v 15:36 den po havárii. Výbuch vážně poničil vrchní patro a rozmetál trosky do širokého okolí, což dále zkomplikovalo snahy o zvládnutí havárie. Výbuch také narušil těsnost vrchního patra na bloku 2, proto v něm nedocházelo k hromadění vodíku a následnému výbuchu.

Postupem času došlo k obnažování a tavení paliva i na bloku 2 a následně i na bloku 3. Na bloku 4 k poškození aktivní zóny nedošlo, neboť v ní nebylo žádné palivo. K výbuchu na bloku 3 došlo stejným způsobem jako na bloku 1. Také na bloku 4 došlo k explozi vodíku, protože ten se k němu dostal z bloku 3, který s blokem 4 sdílí odvětrávací systém SGTS (Stand-by Gas Treatment System).

Po ztrátě všech dostupných systémů chlazení se na jednotlivých blocích započalo se vstřikováním vody do tlakové nádoby reaktoru pomocí požárních cisteren. Aby bylo možné tohoto vstřikování docílit, museli operátoři složitě odtlakovat reaktor, čímž se dále zvyšovalo množství uniklých štěpných produktů. Nejdříve se do reaktoru dodávala slaná voda, která nahradila sladkovodní

vodu. Tento způsob chlazení se používal do té doby, než se podařilo získat elektrické napájení, k čemuž došlo 22. března 2012.

V prosinci 2011 došlo u všech reaktorů k dosažení stavu, při kterém je teplota v tlakové nádobě reaktoru pod 100 °C a únik štěpných produktů do atmosféry tak byl již minimální. Takovýto stav se nazývá studená odstávka („cold shut-down“). Bloky 5 a 6 byly již v době zemětřesení ve stavu studené odstávky a havárii se na nich přes počáteční problémy podařilo zvládnout bez poškození reaktorů.

V jedné z jímek, v nichž se zachycuje radioaktivní voda unikající z reaktoru č. 2, se 2. dubna objevila trhлина. Následovaly neúspěšné pokusy o ucpání praskliny betonem a polymery. Nakonec bylo úspěšně použito až tzv. tekuté sklo. Tím se podařilo zastavit unikání vysoce radioaktivní vody přímo do Tichého oceánu. Přibližně ve stejné době bylo do oceánu řízeně vypuštěno 11 500 tun mírně radioaktivní vody, aby se uvolnily prostory pro skladování vysoce radioaktivní vody unikající z reaktorů do okolních budov.

Vzhledem k tomu, že při chlazení přehřátých reaktorů byla použita mořská voda, došlo k poškození chladicích systémů. Navíc v několika reaktorech došlo k roztavení paliva. Japonský premiér Naoto Kan prohlásil, že elektrárnu bude potřeba odstranit. Japonsko již požádalo o pomoc s odstraňováním následků havárie francouzské jaderné korporace Areva a EDF a je možné, že do prací budou zapojeni i odborníci z jiných států. Poradce premiéra Keniči Macumoto sdělil 13. dubna médiím, že podle odhadu bude 20 let nejbližší okolí elektrárny neobyvatelné. Japonská vláda však toto prohlášení záhy dementovala.

Dochází také k odstraňování palivových souborů z bazénu pro vyhořelé palivo na bloku 4.

Při havárii došlo k úniku velkého množství zdraví škodlivých štěpných produktů. Přesné množství není možné stanovit a odhady se značně různí. Podle jedné studie došlo např. k úniku až 20 500 TBq radioaktivního césia <sup>137</sup>Cs. Pokud nepočítáme stále probíhající úniky do podzemních vod, do konce března 2011 došlo k úniku 99% z celkového množství uniklých štěpných produktů. V srpnu roku 2013 došlo k úniku 300 m<sup>3</sup> radioaktivní vody, což bylo na stupnici INES ohodnoceno stupněm 3. Podle japonského ministerstva životního prostředí je možné naměřit roční dávku radiačního záření ve vzduchu o hodnotě 5 mSv na ploše zhruba 1800 km<sup>2</sup> v okolí elektrárny.

Z důvodu havárie došlo k znehodnocení zemědělské půdy v širokém okolí elektrárny a to hlavně césiem-137 s poločasem rozpadu 30 let. Znehodnocení je také zapříčiněno odporem obyvatel k produktům z širokého okolí elektrárny. Mimo to bylo potřeba omezit rybolov, neboť chycené ryby vykazovaly zvýšené úrovně radiace – příkladem budiž ryba chycená v únoru 2013, jež obsahovala 740 000 Bq/kg radioaktivního césia, což je hodnota překračující zdravotní limity 7400 – krát. Třebaže hodnoty radiace naměřené v dnešní době (k 2/2015) v zemědělských produktech z prefektury Fukušima jsou již bezpečně pod zdravými nebezpečnými hodnotami, strach stále přetrvává.

Havárie v jaderné elektrárně Fukušima I vyvolala mezinárodní politickou diskuzi o dalším využívání jaderné energie. V Německu tato havárie způsobila obrat v energetické koncepci, což v důsledku vedlo k tomu, že vláda neprodloužila jaderným elektrárnám provoz a navíc po bezpečnostních проверkách bylo 7 z nich dočasně uzavřeno. Tento krok způsobil růst cen elektrické energie na německém trhu až o 18 % již v dubnu 2011. Bavorský odpor vůči atomu obnovil i snahy o odstavení JE Temelín. V roce 2015 se i v Německu jedná o možném a možná i nutném prodloužení provozu některých jejich jaderných elektráren po roce 2022.

V samotném Japonsku pak došlo ke zrušení některých projektů nových bloků jaderných elektráren a s velkou pravděpodobností bude ukončen i japonský projekt rychlého reaktoru Mondžú ve městě Curuga. Tento projekt již dlouho provázejí nehody. Reaktor byl v provozu dohromady asi jen rok, přestože byl spuštěn již v roce 1995. Zrušení projektu ale bude znamenat velkou ránu pro japonskou energetickou koncepci, neboť s přechodem na rychlé reaktory se počítalo.

Podle zprávy japonské parlamentní vyšetřovací komise katastrofu nezavinila přílivová vlna tsunami, ale člověk. „Šlo o havárii způsobenou člověkem. Bylo jí možné předvídat a měla být předvídána. Dalo se jí zabránit a mělo se jí zabránit,“ uvádí komise. Zpráva kritizuje nekvalitní zákony regulující jadernou energetiku, nedostatečnost bezpečnostních opatření, chyby vedení elektrárny a

státního dozoru i špatné reakce po nehodě. Zpráva proto doporučila posílit dozor vlády v oblasti jaderné energetiky.

Provoz žádného jaderného zařízení není bez poruch; v dostupných zdrojích jsou na základě zkušeností z praxe záznamy jen o těch závažnějších. Např.:

- Podle [2] v jaderné elektrárně Saint Laurent (Francie) dne 17. 10. 1969 byla vážná nehoda způsobena chybou v programu, kterým se ovládala výměna článků a porušením několika předpisů; nehoda se stejnou příčinou byla v r. 1980. Další vážná nehoda byla 12. 1. 1987 kvůli ucpaní potrubí, které přivádělo vodu z řeky do chladicí nádrže, a selhání diesel generátorů. Po ní byla nehoda 12. 5. 2004 způsobená netěsností na parogenerátoru a nehoda způsobená dalším selháním technického zařízení vedla k odstavení reaktoru 19. 8. 2011.
- Podle [2] v jaderné elektrárně Sosnovy Bor spuštěné v roce 1974 byla do dnešního dne celá řada jaderných nehod a několik jaderných havárií; závažnější byly např. 7. 1. 1975 a 6. 2. 1975, kdy došlo k obětem na životech a k dopadům na rozsáhlé okolí.

Mezi skoro nehody v jaderných elektrárnách patří např. události, ke kterým došlo v roce 1980 v jaderné elektrárně Rancho Seco v Kalifornii [2]: dvojtunový kontejner spadl z jeřábu v reaktorové hale a doslova o pár centimetrů minul nádobu reaktoru; několik týdnů poté byl na stejném laně přepravován kontejner o váze 7 tun. Kdyby některý z kontejnerů spadnul na reaktor, mohl by jej natolik poškodit, že by nastal velký únik radioaktivity. Elektrárna však události šest let tajila. K další vážné skoro nehodě související se stavem technického vybavení jaderné elektrárny došlo 1. 3. 2006 v jaderné elektrárně Kozloduj v Bulharsku; z 60 regulačních tyčí v reaktoru se ukázalo, že 22 je nefunkčních, což by znamenalo, že v případě potřeby nouzového vypnutí při ztrátě chladicího média, by nebylo možné rychle zastavit reaktor, což by mohlo vést k roztavení aktivní zóny [2].

Vážnější skoro nehoda je doložena v jaderné elektrárně Oak Harbour v okrese Ottawa v Ohio ve Spojených státech, přibližně 25 kilometrů východně od města Toledo. V lednu 2003 byl její informační systém podporující řízení jaderné elektrárny nakažen počítačovým červem, což vedlo k pětihodinové ztrátě bezpečnostního sledování v závodě, ale nehoda se nestala [2].

Všechna místa, ve kterých se vyskytly velké jaderné havárie, jsou silně znečištěná radioaktivními látkami; z řady z nich byli lidé evakuováni, např. [2].

## 7. ZÁVĚR

Využití radioaktivních látek i jaderných technologií zlepšuje kvalitu života lidí. Protože z aplikace poznatků z přírodovědných, technických i sociálních věd vyplývá, že nic není absolutní, tak je v každém technologickém zařízení nutno počítat s poruchami, nehodami, skoro nehodami i haváriemi. Z pohledu ochrany lidské společnosti je třeba se soustředit na zabránění jaderným haváriím, které mají významné dopady na lidi, životní prostředí a také samotné zařízení, které je drahé. Znamená to dobře vypořádat všechny známé zdroje havárií uvedené v podrobné práci [11]. Zajistit bezpečnost jaderných zařízení znamená kvalifikovaně pracovat s riziky, a protože v čase přibývají stále nová rizika, tak je třeba sofistikovaně řídit bezpečnost jaderných zařízení v čase, což platí pro všechna složitá technologická zařízení [12].

## ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- [1] [on-line] Available on - URL: <http://astronuklfyzika.cz>
- [2] PROCHÁZKA, Z., PROCHÁZKOVÁ, D. Databáze jaderných událostí. *Archiv*. Praha: ČVUT, Fakulta dopravní, ústav bezpečnostních technologií a inženýrství.
- [3] ČVUT. Archiv ústavu bezpečnostních technologií a inženýrství. Praha: Fakulta dopravní 2017.
- [4] PROCHÁZKOVÁ, D. *Analýza a řízení rizik*. ISBN: 978-80-01-04841-2. Praha: ČVUT 2011,, 405p.

- [5] PROCHÁZKOVÁ, D. *Metody, nástroje a techniky pro rizikové inženýrství*. ISBN 978-80-01-04842-9. Praha: ČVUT 2011, 369p.
- [6] [on-line] Available on - URL: <https://iaea.org>
- [7] UN. *Human Development Report*. New York: UN 1994, [www.un.org](http://www.un.org).
- [8] PROCHÁZKOVÁ, D. *Safety of Complex Technological Facilities*. ISBN:978-3-659-74632-1. Lambert Academic Publishing, Saarbruecken 2015, 244p. ID:200303845
- [9] PERROW, CH. *Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies*. Princeton: Princeton University Press 1984.
- [10] PROCHÁZKA, Z., PROCHÁZKOVÁ, D. Příčiny pohrom s přítomností radioaktivních látek. In: *Řízení rizik procesů spojených s technickými díly*. ISBN: 978-80-01-06351-4. Praha: ČVUT 1017, pp. 94-119, <http://hdl.handle.net/10467/73522>
- [12] PROCHÁZKOVÁ, D. *Zásady řízení rizik složitých technologických zařízení*. e-ISBN: 78-80-01-06182-4. Praha: ČVUT 2017, 364p. <http://hdl.handle.net/10467/72582>

***Pod'akovanie [zaradenie príspevku]***

*Autorka děkuje za podporu EU a MŠMT, projekt RIRIZIBE, CZ.02.2.69/0.0/0.0/16\_018/0002649*

**ADRESA AUTORKY**

**Doc. RNDr. Dana PROCHÁZKOVÁ, PhD., DrSc.,**

ČVUT v Praze, fakulta dopravní, Konviktská 20,

110 00 Praha 1, Česká republika

e-mail: [prochazkova@fd.cvut.cz](mailto:prochazkova@fd.cvut.cz)

**RECENZIA TEXTOV V ZBORNÍKU**

*Recenzované dvomi recenzentmi, členmi vedeckej rady konferencie. Za textovú a jazykovú úpravu príspevku zodpovedajú autori.*

**REVIEW TEXT IN THE CONFERENCE PROCEEDINGS**

*Contributions published in proceedings were reviewed by two members of scientific committee of the conference. For text editing and linguistic contribution corresponding authors.*