



Zdravotně
sociální fakulta
Faculty of Health
and Social Sciences

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Porovnání informovanosti studentů vysokých škol o haváriích na jaderných zařízeních ve vybraných lokalityách

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program:

OCHRANA OBYVATELSTVA

Autor: Bc. Kamila Jandová

Vedoucí práce: Mgr. Renata Havránková, Ph.D.

České Budějovice 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci s názvem *Porovnání informovanosti studentů vysokých škol o haváriích na jaderných zařízeních ve vybraných lokalitách* jsem vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby diplomové práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé diplomové práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 7. června 2020

.....

podpis

Poděkování

Touto cestou bych ráda poděkovala paní Mgr. Renatě Havránkové, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce, ochotu, vstřícný přístup a cenné rady.

Porovnání informovanosti studentů vysokých škol o haváriích na jaderných zařízeních ve vybraných lokalitách

Abstrakt

Diplomová práce porovnávala informovanost studentů vysokých škol o jejich znalostech ohledně havárií na jaderných zařízeních.

Cílem práce bylo posoudit a porovnat informovanost studentů vysokých škol v Českých Budějovicích (Zdravotně sociální fakulta Jihočeské univerzity, Vysoká škola evropských a regionálních studií, Vysoká škola technická a ekonomická) a studentů Russian State Hydrometeorological University v Petrohradě (Ruská federace). V rámci práce byly sestaveny dvě hypotézy. První hypotéza měla za úkol zjistit, zda studenti Russian State Hydrometeorological University budou mít statisticky významně vyšší znalosti o haváriích na jaderných zařízeních než studenti vysokých škol v Českých Budějovicích. Druhá hypotéza zjišťovala, zda studenti Zdravotně sociální fakulty Jihočeské univerzity budou mít statisticky významně vyšší znalosti o haváriích na jaderných zařízeních než studenti ostatních vysokých škol v Českých Budějovicích.

K dosažení stanoveného cíle a k ověření hypotéz byl vypracován dotazník a uskutečněno dotazníkové šetření, které bylo následně vyhodnoceno pomocí metod deskriptivní a matematické statistiky. Dotazník obsahoval 15 otázek a celkem se dotazníkového šetření zúčastnilo 200 studentů z České republiky a Ruské federace. První hypotéza, která srovnávala znalost studentů Russian State Hydrometeorological University a studentů v Českých Budějovicích, byla vyvrácena. Druhá hypotéza, která srovnávala znalosti studentů Zdravotně sociální fakulty Jihočeské univerzity a dalších studentů z vysokých škol v Českých Budějovicích, byla potvrzena.

Výsledky diplomové práce dokazují, že mezi ruskými a českými studenty a mezi studenty Zdravotně sociální fakulty Jihočeské univerzity a ostatních vysokých škol v Českých Budějovicích jsou statisticky významné rozdíly ve znalostech o haváriích na jaderných zařízeních.

Klíčová slova

Jaderná havárie; stupnice INES; Černobyl; Fukušima; Three Mile Island; Mayak; Windsale; Jaslovské Bohunice; Tokaimura; informovanost studentů

Comparing awareness students of universities about accidents at nuclear facilities in selected areas

Abstract

The diploma thesis compared the awareness of university students of accidents at nuclear facilities.

The aim of the thesis was to compare and assess the awareness of students of three universities in České Budějovice and one university in St. Petersburg, Russian Federation. The Czech universities concerned were the Faculty of Health and Social Sciences of University of South Bohemia, the College of European and Regional, and the Institute of Technology and Business; the Russian university was the Russian State Hydrometeorological University. First, two hypotheses were set. The aim of the first hypothesis was to find out if the students of Russian State Hydrometeorological University will have statistically significantly better knowledge about accidents at nuclear facilities than the students of the three universities in České Budějovice. The aim of the second hypothesis was to find out if the students of the Faculty of Health and Social Sciences of University of South Bohemia will have statistically significantly better knowledge about accidents at nuclear facilities than the students of the other two universities in České Budějovice.

In order to achieve the set aim and to verify the hypothesis a questionnaire, comprising 15 questions, was compiled and a survey was carried out; its results were then evaluated using the methods of descriptive and mathematical statistics. The total number of 200 students from the Czech Republic and the Russian Federation took part in the survey. The first hypothesis, which compared the knowledge of the students of the Russian State Hydrometeorological University and the students of the three universities in České Budějovice, was disproved. The second hypothesis, which compared the knowledge of the students of the Faculty of Health and Social Sciences of University of South Bohemia and the students of the other two universities in České Budějovice, was approved.

The results of the survey showed that there were statistically significant differences between the Russian and Czech students, and between the students of the Faculty of Health and Social Sciences of University of South Bohemia and the students of the other two universities in České Budějovice as far as their knowledge of accidents

at nuclear facilities is concerned.

Key words

Nuclear and radiation accident; INES scale; Chernobyl; Fukushima; Three Mile Island; Mayak; Windscale; Jaslovské Bohunice; Tokaimura; students's awareness

Obsah

Úvod.....	9
1 Teoretická část	10
1.1 Pojmy spojené s ionizujícím zářením	10
1.2 Účinky ionizujícího záření na lidský organismus	12
1.3 Jaderné elektrárny	15
1.3.1 Princip jaderné elektrárny	16
1.3.2 Jaderné reaktory	16
1.3.3 Typy jaderných reaktorů	17
1.4 Klasifikace radiální mimořádné události	20
1.5 Stupně INES	20
1.6 Stupeň 7 – velmi těžká havárie	22
1.6.1 Černobyl (1986) – SSSR.....	23
1.6.2 Fukushima Dai-ichi (2011) – Japonsko	30
1.7 Stupeň 6 – těžká havárie	36
1.7.1 Mayak (1957) – Sovětský svaz	36
1.8 Stupeň 5 – havárie s rizikem vně zařízení.....	39
1.8.1 Three Mile Island (1979) – USA	39
1.8.2 Windscale (1957) – Velká Británie	41
1.9 Stupeň 4 – havárie bez rizika vně zařízení.....	42
1.9.1 A-1 Jaslovské Bohunice (1977) – Československo	42
1.9.2 Tokaimura (1999) – Japonsko	43
1.10 Stupeň 3 – vážná nehoda	44
1.10.1 Paks-2 (2003) – Maďarsko	44
1.11 Stupeň 2 – nehoda	45
1.11.1 Forsmark (2006) – Švédsko	45

1.12	Stupeň 1 – anomálie	45
1.12.1	Temelín (2015) – Česká republika.....	45
1.13	Stupeň 0 – odchylka	46
1.13.1	Dukovany (2018) – Česká republika	46
2	Cíl práce a hypotézy	48
3	Metodika	49
3.1	Metody deskriptivní statistiky.....	49
3.2	Metody matematické statistiky	51
4	Výsledky	52
4.1	Statistické zpracování výsledků – studenti RSHU a studenti vysokých škol v Českých Budějovicích	66
4.2	Statistické zpracování výsledků – studenti ZSF JU a studenti VŠERS a VŠTE 73	
5	Diskuse.....	80
5.1	Diskuse k otázkám uvedeným v dotazníku.....	80
5.2	Diskuse ke statistickému šetření	84
6	Závěr	85
7	Seznam literatury	86
8	Seznam zkratk	94
9	Seznam obrázků.....	96
10	Seznam tabulek	98
11	Seznam příloh	99

Úvod

Ačkoliv je jaderná energetika jedním z nejbezpečnějších způsobů výroby elektrické energie, mnoho lidí z ní má stále velké obavy a nedůvěřuje jí. Je to způsobeno především několika událostmi, které se nesmazatelně zapsaly do historie lidstva.

Jména jaderných havárií a nehod jako jsou Černobyl, Fukušima, Three Mile Island a mnoha dalších nám budou navždy připomínat, co se stane, když se technologie vymkne kontrole. Pro správné zdůvodnění příčin těchto havárií a nehod je důležité si uvědomit, co bylo jejich příčinou nebo čím byly způsobeny. Stroje a technologie pracují vždy podle toho, jak je člověk řídí a programuje. Většinu těchto událostí zavinil právě člověk svou nedbalostí, nepozorností, namyšleností nebo podceněním přírodních živlů.

Zároveň je důležité si uvědomit, že v důsledku těchto havárií a nehod se jaderná energetika vždy posunula o velký krok vpřed co se týče bezpečnosti i technologií. Díky tomu je dnes jaderná energie jedním z nejbezpečnějších způsobů výroby elektrické energie.

Je proto nezbytné si tyto události neustále připomínat a pamatovat si, jak je samotné, tak i jedince, kteří se zasloužili o likvidaci způsobených škod a o záchranu mnoha lidských životů.

1 Teoretická část

V úvodu se teoretická část diplomové práce věnuje pojmům, které jsou spojeny s ionizujícím zářením a jeho účinkům na lidský organismus. Dále se zabývá jadernými elektrárnami a jednotlivými typy jaderných reaktorů. V další části je shrnuta klasifikace radiační mimořádné události, po které následuje přehled mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí. Na tuto kapitolu následně navazují chronologicky seřazené stupně INES (The International Nuclear Event Scale) s uvedením příkladů havárií a nehod.

1.1 Pojmy spojené s ionizujícím zářením

Mezi pojmy, které vyvolávají u většiny lidí obavy, se řadí ionizující záření, radioaktivita, radiace a další. Po bližším prozkoumání dojdeme k závěru, že tyto pojmy jsou nedílnou součástí našich životů a životního prostředí. Například přírodní radioaktivní prvky (^{14}C , ^7Be , ^{222}Rn , ^{220}Rn , ^{40}K) mají mnohem větší podíl na ozáření obyvatelstva než prvky umělé. (Fakultní nemocnice v Motole, ©2012)

Ionizující záření lze vyjádřit jako tok hmotných částic nebo fotonů elektromagnetického záření, které jsou schopny ionizovat atomy nebo excitovat jejich jádra. Dělí se na **přímo ionizující záření**, které je tvořeno přímo nabitými částicemi, jako jsou elektrony, pozitrony, protony, částice α , β . K tomu, aby byla ionizace vyvolána, je třeba, aby částice měly dostatečnou kinetickou energii. **Nepřímo ionizující záření** zahrnuje nenabité částice, mezi které se řadí fotony a neutrony. Ty nemají schopnost samy ionizovat prostředí, ale během interakce s ním se uvolňují sekundární, přímo ionizující částice, které přímo ionizují dané prostředí. (Havránková et al., 2018) Do zdrojů ionizujícího záření se řadí přirozené i umělé radionuklidy, které mají nestabilní atomová jádra, rozpadají se a emitují ionizující záření. Dále sem můžeme zařadit generátory jako jsou RTG lampy, urychlovače atd. (Švec, 2005)

Radioaktivita je vlastnost některých jader atomů, které se samovolně rozpadají, přeměňují a mění energetický stav za současného vzniku ionizujícího záření. (Fakultní nemocnice v Motole, ©2012) **Poločas rozpadu** je charakteristická doba "t", po jejíž uplynutí klesne aktivita vzorku radionuklidu na polovinu. (Reichl, © 2006-2020) **Atomy** všech látek jsou složeny ze tří základních druhů částic – protony, neutrony a elektrony.

Jádro atomu je tvořeno protony a neutrony a prakticky tvoří veškerou hmotnost atomu. Elektrony jsou umístěny v obalu atomu a obíhají kolem samotného jádra. Kombinace počtu protonů a neutronů mohou tvořit stabilní a nestabilní jádra. Lehká jádra jsou složena z přibližně podobného počtu protonů a neutronů, naopak v těžších jádrech se počet neutronů zvyšuje. Hlavním důvodem je, že jsou navzájem odpuzovány kladně nabitě protony a k jejich stabilitě je nutný přebytek neutronů schopných vytvořit přitažlivé síly. (Švec, 2005)

Chemické prvky se rozdělují podle počtu protonů a neutronů umístěných v jádře. Prvky mající stejný počet protonů a rozdílný počet neutronů se nazývají **izotopy**, např. ^{235}U a ^{238}U . (Cohen-Unger, 2016) **Nuklidy** jsou atomy tvořené stejnými atomy, jejichž jádra obsahují přesně vymezený počet protonů a neutronů. (Wagner, 2015)

Přirozená radioaktivita je jev, kdy se nestabilní těžší jádra samovolně rozpadají na lehčí jádra, která jsou stabilní nebo ke stabilní konfiguraci vedou. Izotop bizmutu ^{209}Bi je nejtěžší stabilní nuklid, který tvoří pomyslnou hranici schopnosti udržet jádro stabilní. Druhým typem je **umělá radioaktivita**, kdy je uměle vyvolána nestabilita atomového jádra; obvykle jde o jadernou reakci. Oba typy radioaktivity se řídí stejnými zákonitostmi. (Havránková et al., 2018)

Oblast vědy a techniky se musí opírat o ucelenou terminologii a také o jasně definované a zavedené veličiny a jednotky. V této části budou uvedeny veličiny, které se řadí mezi ty nejznámější a nejpoužívanější.

Aktivita je definovaná jako očekávaná hodnota počtu jaderných přeměn, které se uskutečňují v určitém množství látky za jednotku času. Její jednotka se nazývá bequerel (Bq). (Publikace ICRP 103, 2009)

Absorbovaná dávka je popsána jako energie ionizujícího záření, která se absorbovala v jednotce hmotnosti u ozařované látky v určitém místě. Její jednotkou je jeden joule na jeden kilogram, který má speciální zavedený název gray (Gy). S absorbovanou dávkou souvisí dávkový příkon, který je definován jako nárůst dávky za určitý čas. Jednotkou dávkového příkonu je $\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$. Často je vyjadřován v $\text{mG}\cdot\text{h}^{-1}$ nebo $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$. (Radiční ochrana, 2019)

Ekvivalentní dávka je definována součinem radiačního váhového faktoru společně s absorbovanou dávkou v orgánech nebo tkáních pro ionizující záření. Jde o veličinu

vztahující se ke stochastickým účinkům. Její jednotkou je sievert (Sv). Ke stochastickým účinkům se také vztahuje efektivní dávka, která je definována součtem součinů váhových tkáňových faktorů a ekvivalentní dávky v ozářených orgánech nebo tkáních. Jednotkou je také sievert (Sv). (Radiační ochrana, 2019)

1.2 Účinky ionizujícího záření na lidský organismus

Během ozáření dochází v těle člověka k biologickým změnám, které se mohou projevit během dnů až týdnů, nebo i v průběhu několika desítek let. Biologické účinky ozáření se rozdělují na stochastické a deterministické, dnes také nazývané tkáňové. (Súkupová, 2012)

Stochastické účinky jsou vyvolány mutacemi. Jde o změny v genetické informaci buňky a je pro ně předpokládán bezprahový a lineární vztah mezi účinkem a dávkou. Tato závislost účinků na dávce má statistický charakter, proto se těmto účinkům říká stochastické neboli pravděpodobnostní či náhodné. Pokud se má totiž projevit konkrétní genetická změna na orgánové úrovni, je nutné, aby byla rozšířena mezi potřebný počet buněk. Somatické buňky jsou toho schopné, pokud mutace přináší buňce určitou růstovou výhodu – může postupně navyšovat své potomky vůči nepoškozeným buňkám, které rostou pomaleji. V tomto případě jde o karcinogenní mutace. Pokud mají rodiče dětí ozářené pohlavní buňky (gamety) je možné, že se u potomků kromě nádorového onemocnění vyskytnou také různé vrozené vývojové vady benigního charakteru. Intenzita dávky záření neovlivňuje vážnost projevu na jedince, ale mění frekvenci přidané četnosti zhoubných novotvarů a dědičných poškození v populaci. S velikostí dávky vzrůstá pravděpodobnost poškození jednotlivce. Stochastické účinky se nijak neodlišují od spontánně vzniklých případů jako jsou zhoubné nádory, genetické změny či mutace. (Havránková et al., 2020)

K **deterministickým účinkům** dochází díky smrti části ozářené buněčné populace. Jejich závažnost roste společně s dávkou od jistého dávkového prahu (pod tímto prahem se účinky neprojeví) a jejich klinický obraz je pro tyto účinky charakteristický (daná forma nemoci z ozáření, katarakta, neplodnost). Na rozdíl od stochastických účinků se po vystavení organismu nebo jeho části nadprahovým dávkám projeví deterministické účinky u každého ozářeného jedince. Při navyšování dávky se zvyšuje závažnost a také se zkracuje doba mezi ozářením a klinickým prokázáním symptomů. Tyto účinky se

týkají výhradně ozářené tkáně, na rozdíl od stochastických účinků mají charakteristický klinický obraz, a proto se dají snadno odlišit od symptomů neradiačního charakteru. Deterministické účinky poškozují tkáně a orgány, ale při zasažení pohlavních buněk se nepřenesují na další potomstvo. (Havránková et al., 2020)

Již brzy po ozáření, často do několika dnů či týdnů, se projevují následky odumírání poškozených buněk po vysokých jednorázových dávkách – v řádu jednotek Gy. Například, smrt 50 % ozářených osob do 30 dnů ($LD_{50/30}$, tzv. letální dávka) je způsobena jednorázovým celotělovým ozářením člověka dávkou 4-5 Gy. U zvláště závažných případů, kdy dojde k celotělovému ozáření v řádu desítek Gy, umírá člověk ihned po ozáření kvůli okamžité denaturaci a dezintegraci buněk. U vyšších celotělových dávek se před efektem buněčného vymírání objevují klinické symptomy, které zrcadlí podráždění regulačních center organismu díky produktům radiolýzy vody, jako je např. nevolnost, nadměrná únava. Deterministické účinky mohou mít i pozdní, případně chronický charakter v závislosti na dávce, charakteru expozice i ozářené části těla. (Havránková et al., 2020)

O časovém průběhu tkáňové odpovědi rozhoduje, které buňky tkáně jsou ozářené. Různé buněčné typy mají jinou citlivost na ionizující záření, mnohem citlivější jsou buňky, které rychle proliferují, jako např. aktivní kostní dřev, střevo, slizniční epitel a lymfoidní orgány. Tyto tkáně mají mnoho mitotických buněk, které jsou na ozáření senzitivnější než buňky v ostatních fázích buněčného cyklu. Neustálé dělení buněk poskytuje na reparaci poškozené DNA a celkovou rekonvalescenci buněk jen krátký čas, proto se ozáření mitotických tkání projeví brzy po ozáření (kvůli smrti mnoha buněk) a zároveň může být rychle opraveno díky buněčné repulaci. (Havránková et al., 2020)

Akutní nemoc z ozáření (ANO) vzniká po celotělovém jednorázovém ozáření organismu dávkou vyšší než 0,7 Gy. Kvůli ozáření všech systémů je možné zaznamenat rozvoj celkového obrazu poškození. Klinické projevy ANO závisí na geometrii, dávce a dávkovém příkonu ozáření. Dále záleží na věku, pohlaví, zdravotním stavu a dalších biologických faktorech jedince. Důležitý význam mají i další případná onemocnění nebo poranění, která akutní nemoc z ozáření doprovázejí. (Havránková et al., 2018)

Akutní nemoc z ozáření se může projevit v podobě tří různých syndromů, které vznikají na základě absorbované dávky ionizujícího záření. (Havránková et al., 2018)

Dřeňový (hematopoetický) syndrom ANO se objevuje u pacientů, kteří byli vystaveni expozici ionizujícího záření od 0,7 Gy. V závislosti na velikosti dávky dochází k útlumu krvetvorby, která může vést až k pancitopenii zapříčiněné malou až nulovou produkcí krevních buněk. Systémové efekty, objevující se u dřeňového syndromu, zahrnují imunologickou dysfunkci, vzestup infekčních komplikací, krvácení a anemii, což je doprovázeno špatným hojením ran. U tohoto jediného syndromu se může objevit fáze rekonvalescence. (Havránková et al., 2018)

Střevní (gastrointestinální) syndrom ANO vzniká v případě jednorázového zevního ozáření dávkami, které jsou vyšší než 8 Gy. Na tento syndrom ANO se umírá ve 100 % případů a neexistuje žádná kauzální terapie. Nejvíce je postiženo tenké střevo z důvodu, že zde probíhá nejintenzivnější buněčný obrat. (Havránková et al., 2018)

Neurovaskulární syndrom ANO se objevuje u pacientů, kteří byli vystaveni expozici 30 Gy a více a je také ve 100 % případů letální. Cévní složka postradiačního poškození se objevuje po ozáření dávkami 30 Gy a vyšší, ale nervová složka poškození převládá po ozáření dávkami zhruba 100 Gy a vyšší. (Havránková et al., 2018)

U jednotlivých syndromů se mohou projevit různé fáze ANO, např. prodromální fáze, latentní fáze, manifestní fáze nebo fáze rekonvalescence.

Během **prodromální fázi** dochází k rychlému nástupu nevolnosti, zvracení, průjmu, neklidu, projevují se bolesti hlavy a celková slabost. Tyto obtíže znamenají nespecifickou odpověď organismu na ozáření. Prodromální symptomy se u postiženého jedince projevují během několika minut nebo až po šesti hodinách od expozice. Tyto příznaky u ozářeného člověka trvají 24–48 hodin. Jako hrubý diagnostický ukazatel slouží počet lymfocytů v periferní krvi společně s rychlostí nástupu, intenzitou a dobou trvání prodromálních příznaků. Během **latentní fáze** je ozářený jedinec bez příznaků. Trvání této fáze se odvíjí od velikosti dávky záření a nejdéle se projevuje u dřeňového syndromu, kde se tato doba pohybuje mezi 2–4 týdny. Střevní syndrom má dobu latence několik dnů až jeden týden, a u neurovaskulárního syndromu se latentní fáze projevuje pouze po dobu několika hodin. Během **manifestní fáze** se projevují klinické příznaky, které jsou spojené s jednotlivými kritickými orgánovými soustavami, kam se řadí kostní dřeň, gastrointestinální trakt, cévy a centrální nervový systém. **Fáze rekonvalescence** se projevuje pouze v pozitivním případě, kdy podle závažnosti nemoci z ozáření, dochází k úplnému nebo částečnému uzdravení organismu. Její doba trvání, čas nástupu

a závažnost jednotlivých symptomů závisí na celkové absorbované dávce záření a individuální radiosenzitivitě. (Havránková et al., 2018)

Jako další projevy deterministických účinků se může u postiženého jedince projevit radiační dermatitida, která na pohled vypadá jako popálenina, ale na kůži postiženého jedince se objevuje se zpožděním a poškozuje hlubší vrstvy kůže. U ozářených jedinců může dojít k postižení fertility (plodnosti) v případě, že byly ozářeny pohlavní žlázy, a pokud byla ozářena žena v těhotenství, může dojít k poškození vývoje plodu. (Havránková et al., 2018)

1.3 Jaderné elektrárny

Jaderná elektrárna je typ elektrárny, která využívá proces jaderného štěpení k výrobě elektrické energie. Teplo generované reaktorem přeměňuje vodu na páru, která otáčí turbínu a generátor. (Afework, 2019)

První jaderná elektrárna s výkonem 5 MWe byla uvedena do provozu v roce 1954 v Obninsku poblíž Moskvy. Od té doby se jaderná energetika vysoce technicky zdokonalila. Již v roce 1990 pokrývaly jaderné elektrárny 19 % světové produkce elektřiny a v některých státech, mezi které patřila například Francie, šlo až o 70 % celkové produkce. (Reichl, © 2006–2019)

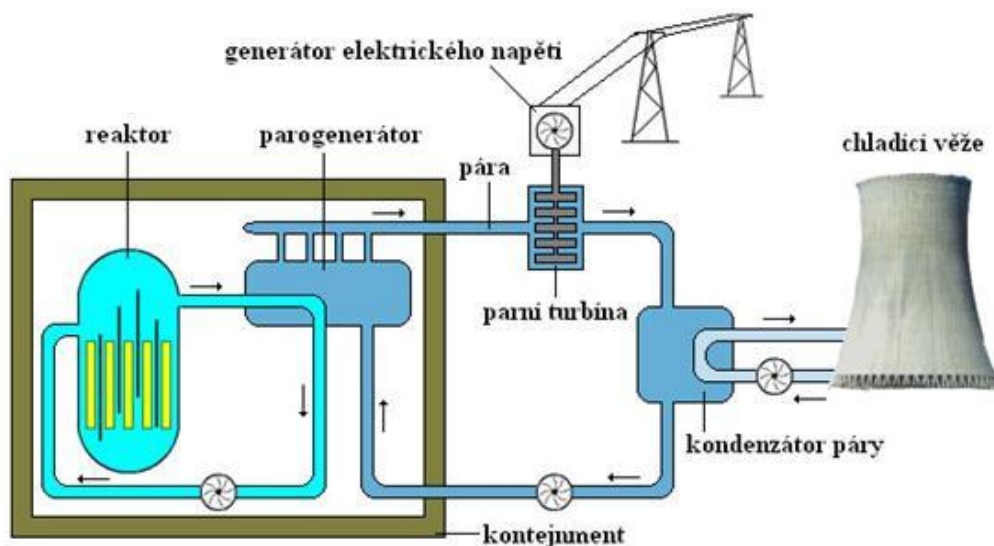
V roce 2020 bylo v provozu 441 jaderných reaktorů o celkovém výkonu 389 979 MWe a 54 jaderných reaktorů o celkovém výkonu 57 441 MWe bylo v opravě. (IAEA, 2020)

Jaderná energetika se rozvíjela také na území bývalého Československa, kde byla vybudována jaderná elektrárna v Jaslovských Bohunicích. Dále byly vybudovány dvě jaderné elektrárny na území dnešní České republiky. První byla Jaderná elektrárna Dukovany na Třebíčsku. Tato elektrárna pracuje s obohacným uranem využívaným ve čtyřech tlakovodních reaktorech voroněžského typu (VVER 440), které nejsou vybaveny ochrannou obálkou. Jaderná elektrárna Dukovany má celkový elektrický výkon 1 760 MWe. V roce 1991 se podílela na produkci 23 % výroby elektrické energie pro Českou republiku. Později došlo ke zvýšení instalovaného tepelného výkonu ze 4 x 440 MWt na 4 x 510 MWt, takže pokrývá přes 20 % celkové spotřeby České republiky. Jako druhá byla postavena Jaderná elektrárna Temelín nacházející se poblíž obce Temelín v jižních Čechách. Tato elektrárna má k dispozici dva tlakovodní jaderné

reaktory (VVER 1 000) o elektrickém výkonu 2 100 MWe, které jsou umístěny v ochranné obálce. První reaktor byl uveden do provozu v roce 2000 a druhý v roce 2001. (Reichl, ©2006–2019, Skupina ČEZ, © 2020)

1.3.1 Princip jaderné elektrárny

Voda ohřátá v primárním okruhu proudí z jaderného reaktoru pomocí čerpadel do parogenerátoru, kde dochází k výměně tepla společně s vodou v sekundárním okruhu. V sekundárním okruhu se voda ohřívá a mění se v páru, která pohání parní turbínu. Tato turbína otáčí rotorem generátoru střídavého proudu, v němž vzniká pomocí elektromagnetické indukce střídavé napětí, které se dále rozvádí do rozvodné sítě. Pára, která slouží k pohánění turbíny, je poté ochlazována ve výměníku tepla, který je napojen na chladicí věže elektrárny. (Reichl, © 2006–2019)



Obrázek 1: Schéma jaderné elektrárny Temelín

Zdroj: (Reichl, © 2006–2019)

1.3.2 Jaderné reaktory

Jaderný reaktor je typ zařízení, který slouží k vyvolávání, udržování a řízení řetězové štěpné reakce. Umožňuje zpracovávat jadernou energii, aby dobře sloužila a přinášela užitek. Jaderný reaktor se skládá z mnoha komponentů a každý z nich plní svou úlohu.

Nejdůležitější komponenty jsou palivo, moderátor, absorbátor a chladivo. Podle různých druhů a uspořádání těchto komponentů jsou reaktory rozdělovány na mnoho různých typů. (Skupina ČEZ, ©2016)

V tepelných reaktorech se jako palivo nejčastěji používá obohacený uran, který obsahuje vyšší procento nuklidu ^{235}U než přírodní uran. Obohacování uranu je velice obtížné a vyžaduje náročnou technologii, proto se výrobou zabývá jen několik průmyslově vyspělých států světa. (Reichl, © 2006–2019)

Část reaktoru, kde probíhá štěpná reakce a do které je vkládáno palivo se nazývá aktivní zóna. Samotné palivo se ukládá do palivových proutků, které jsou chráněné povlakem ze speciální slitiny. Nejčastěji se používá slitina na bázi zirkonia, která se postará o předání tepla mezi palivem a chladivem a současně nepropustí vzniklé radioaktivní štěpné produkty. Některé typy reaktorů využívají palivo ve formě koulí, které jsou volně spouštěny do aktivní zóny. (Skupina ČEZ, ©2016)

Ke zpomalování neutronů je třeba moderátor. Nejčastěji se používá lehká voda, grafit nebo těžká voda, což jsou látky, které obsahují lehká jádra. Během jaderného štěpení vznikají neutrony, které mají průměrnou energii cca 2 MeV. Ke štěpení nuklidu ^{235}U je nutné, aby měl neutron energii řádově menší než jednotky elektronvoltů. Ke zpomalení neutronů dochází v průběhu srážek společně s jádry moderátoru. Moderátor by měl mít schopnost co nejmenší absorpce neutronů z důvodu dalšího štěpení jader, protože v případě, že by byly neutrony moderátorem absorbovány, by již ke štěpné reakci nedošlo. Pokud dojde k příliš velké absorpci neutronů je důležité používat více obohacené palivo. (Reichl, © 2006–2019)

K odvádění tepla z reaktoru je využíváno chladivo. Štěpící se materiál je nutné neustále ochlazovat, aby nebyl roztaven povlak na palivovém proutku a nedošlo k úniku štěpných produktů. Jako chladivo se nejčastěji využívá upravená voda, těžká voda, helium, oxid uhličitý, sodík a některé soli nebo slitiny. Reaktory mohou mít jeden nebo více chladicích okruhů. (Skupina ČEZ, ©2016)

1.3.3 Typy jaderných reaktorů

V této kapitole jsou popsány nejznámější typy reaktorů, které se používají nebo používaly v jaderných elektrárnách.

Magnox GCR

Magnox GCR (Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor) je plynem chlazený reaktor, který je používán ve Velké Británii a v současné době již dosluhuje. Jako palivo se používá přírodní kovový uran, který je ve formě tyčí a je pokrytý oxidem magnezia. Palivo je vyměňováno za provozu. Aktivní zóna je uzavřena v ocelové tlakové nádobě se silným betonovým stíněním a skládá se z grafitových bloků, které slouží jako moderátor. Těmito bloky prochází několik tisíc kanálů a do každého je umístěno několik palivových souborů. Jako chladivo se využívá oxid uhličitý, který je po ohřátí veden do parogenerátoru, kde předává teplo do vody v sekundárním okruhu. Ve svých počátcích byl tento typ reaktoru používán dvouúčelově, tj. k výrobě elektrické energie, ale i k výrobě plutonia pro vojenské účely. (Klik, 1995; Skupina ČEZ, ©2016)

Pokročilý plynem chlazený reaktor AGR

Reaktor AGR (Advanced Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor) je výhradně používán ve Velké Británii. Jako palivo se používá uran obohacený izotopem ^{235}U ve formě oxidu uraničitého. Moderátorem je zde grafit a oxid uhličitý slouží jako chladivo. Elektrárna, která používá tento typ reaktoru, je dvouokruhová. (Skupina ČEZ, ©2016)

Reaktor typu RBMK

Reaktor typu RBMK (Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanalnyj), je výhradně používán na území bývalého Svazu sovětských socialistických republik (SSSR). Reaktor tohoto typu byl použit v první jaderné elektrárně v Obninsku a stejný reaktor používala i jaderná elektrárna v Černobylu. Další reaktory tohoto typu se již nestaví. Jako palivo ve formě oxidu uraničitého slouží přírodní nebo slabě obohacený uran. Palivové soubory jsou uloženy v kanálech, kudy proudí upravená voda zastupující chladivo. Uvnitř tlakových kanálů vzniká pára, ale aby mohla pohánět turbínu, musí se nejprve zbavit své vlhkosti (pomocí separace). Jako moderátor zde slouží grafit, kterými jsou obklopeny kanály. Elektrárna s reaktorem tohoto typu je jedookruhová. (Skupina ČEZ, ©2016)

Těžkovodní reaktor CANDU

Těžkovodní reaktor CANDU (Canadian Deuterium Uranium) byl zkonstruován v Kanadě a následně se rozšířil také do Indie, Pákistánu, Koreje, Argentiny a Rumunska. V současné době ve světě pracuje asi 35 reaktorů tohoto typu. Jako palivo je používán přírodní uran ve formě oxidu uraničitého. Těžká voda D₂O je moderátorem a zároveň i chladivem. D₂O v prvním chladicím okruhu předává své získané teplo obyčejné vodě, která se nachází v parogenerátoru, odkud je vedena pára na turbínu. (Skupina ČEZ, ©2016)

Tlakovodní reaktor PWR/VVER

Tlakovodní reaktor typu PWR (Pressurized light-Water moderated and cooled Reactor) nebo jeho ruský model VVER (Vodo – Vodjanoj Energetičeskij Reaktor) je ve světě nejrozšířenějším typem reaktoru. V současné době pracuje asi 253 tlakovodních reaktorů, tj. zhruba 57 % ze všech světových energetických reaktorů. Reaktor byl původně zkonstruován v USA (Spojené státy americké) a později jeho koncepci převzalo i Rusko. Stejně reaktory jsou také používány k pohonu jaderných ponorek nebo letadlových lodí z důvodu jejich vysoké bezpečnosti. Jako palivo je používán obohacený uran v podobě tabletek oxidu uraničitého, které jsou poskládány do palivových souborů. Palivo je měněno při odstaveném reaktoru. K výměně paliva dochází zpravidla jednou za jeden až jeden a půl roku, kdy se nahradí jedna čtvrtina vyhořelých článků. Moderátorem a zároveň i chladivem je obyčejná voda. Ta pod velkým tlakem a vysokou teplotou (zhruba 300 °C) cirkuluje v primárním okruhu. V parogenerátoru zahřívá vodu sekundárního okruhu. Takto zahřátá voda se mění na páru, která otáčí turbínou. Reaktor tohoto typu je také umístěn v jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín v České republice. (Klik, 1995; Skupina ČEZ, ©2016)

Varný reaktor BWR

Varný reaktor BWR (Boiling Water Reactor) je druhým nejrozšířenějším typem reaktoru, ve světě jich je v provozu zhruba 94, tj. asi 21 % z celkového počtu všech světových reaktorů. Jako palivo je používán mírně obohacený uran v podobě válečků oxidu uraničitého, které jsou naskládány do palivových souborů. Palivo je vyměňováno při odstavení reaktoru jednou za jeden až jeden a půl roku. Aktivní zóna se podobá aktivní

zóně tlakovodního reaktoru. Moderátorem a zároveň i chladičem je upravená voda. Voda je ohřívána až do bodu varu přímo v tlakové nádobě a v horní části reaktoru se akumuluje pára, u které je nutné odseparovat vlhkost. Pára pak může proudit k turbíně. Elektrárny s reaktorem BWR jsou jednokruhové. (Skupina ČEZ, ©2016)

1.4 Klasifikace radiační mimořádné události

Radiační mimořádná událost je událost, která vede nebo může vést k překročení limitů ozáření a vyžaduje učinit opatření, aby se zabránilo jejich překročení nebo zhoršení situace z pohledu zajištění radiační ochrany. (Zákon č. 263/2016 Sb.)

Radiační mimořádná událost prvního stupně je situace, která je zvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníků, kteří vykonávali práci v aktuální směně, při které radiační mimořádná událost vznikla. (Zákon č. 263/2016 Sb.)

Radiační nehoda je situace, která není zvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníků, kteří vykonávali práci v aktuální směně, při které radiační nehoda vznikla nebo která vznikla v důsledku nálezu, zneužití nebo ztráty radionuklidového zdroje a vyžaduje zavedení neodkladných ochranných opatření pro obyvatelstvo. (Zákon č. 263/2016 Sb.)

Radiační havárie je situace, která není zvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníků, kteří vykonávali práci v aktuální směně, při které vznikla radiační havárie nebo která vznikla v důsledku nálezu, zneužití nebo ztráty radionuklidového zdroje a vyžaduje zavedení neodkladných ochranných opatření pro obyvatelstvo. (Zákon č. 263/2016 Sb.)

1.5 Stupně INES

Mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí INES byla zavedena v roce 1990 Mezinárodní agenturou pro jadernou energii (International Atomic Energy Agency – IAEA) a Agenturou pro jadernou energii Organizace pro ekonomickou spolupráci a rozvoj (Organisation for Economic Co-operation and Development/ The Nuclear Energy Agency – OECD/NEA). (Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2008). Stupnice nejprve sloužila ke klasifikaci událostí na jaderných elektrárnách, později

byla rozšířena a upravena, aby se dala využívat na všechna zařízení spojená s civilním jaderným průmyslem. (IAEA, © 1998–2019)

Primární účel stupnice INES je ulehčit komunikaci a dorozumění mezi odborným jaderným společenstvím, sdělovacími prostředky a veřejností v případech, kdy dojde k výskytu událostí na jaderných zařízeních i k jakýmkoli jiným událostem, které jsou spojeny s radioaktivním materiálem nebo radiací, včetně přepravy spojené s radioaktivními materiály. Stupnice INES se skládá z osmi stupňů a její rozsah je stanoven od 0 do 7. Začíná nejméně závažným stupněm a končí stupněm nejvíce závažným. Stupeň 0 je označován jako odchylka. Stupně 1 až 3 jsou označovány jako nehody a stupně 4 až 7 jsou označovány jako havárie. Stupněm 0 jsou klasifikovány události, které nemají žádný bezpečnostní význam, a proto se označují jako události mimo stupnici. (Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2008)



Obrázek 2: Stupnice INES

Zdroj: Zpracováno dle (Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2008)

Dopad na životní prostředí

Toto kritérium hodnotí, jak moc se událost projevila mimo zařízení a jak velké množství záření nebo radioaktivních látek uniklo do okolního životního prostředí. Události hodnocené stupněm 0–3 stupnice INES představují nulový vliv na životní prostředí. U stupňů 3 a 4 stupnice INES se pro stanovení daného stupně používá dávka, kterou byli zasaženi nejvíce ozáření jedinci z populace. Stupně 5 až 7 stupnice INES se posuzují podle množství uvolněné aktivity záření. Stupeň 7 stupnice INES je hodnocen jako havárie spojená s dalekosáhlými následky na zdraví obyvatel i životní prostředí a vyžaduje provedení evakuace nebo přesídlení obyvatelstva ze zasažené oblasti. (INES, 1992)

Úroveň poškození zařízení a zasažení pracovního prostředí uvnitř elektrárny

Toto kritérium hodnotí míru poškození zařízení, stav poškození jaderného paliva, poškození aktivní zóny, únik radiace a radioaktivních látek uvnitř elektrárny. Stupeň 3 stupnice INES hodnotí události související s únikem velkého množství radioaktivních látek do pracovních prostorů elektrárny nebo jde o události spojené s nadlimitním ozářením pracovníků. Stupeň 5 stupnice INES značí závažné poškození aktivní zóny reaktoru a zařízení jaderné elektrárny. (Česká nukleární společnost, b.r.)

Dopad na bezpečnostní systémy

Toto kritérium posuzuje, jak spolehlivě během události pracovaly bezpečnostní systémy elektrárny, které mají za úkol zabránit nekontrolovatelnému uvolnění radioaktivity z reaktoru do prostředí elektrárny a jejího okolí. (Česká nukleární společnost, b.r.)

1.6 Stupeň 7 – velmi těžká havárie

Během této události hrozí únik velkého množství radioaktivních látek z aktivní zóny reaktoru mimo prostor elektrárny (řádově více než 10 000 TBq biologicky významných radioizotopů). Vyskytuje se zde možnost okamžitých zdravotních následků a pozdní zdravotní následky se mohou objevit na velkém území, přesahujícím plochu elektrárny

a jejího okolí. Je nutné počítat s dlouhodobými následky na životním prostředí. Příklad havárií: Černobyl (1986), Fukušima (2011) (Česká nukleární společnost, b.r.)

1.6.1 Černobyl (1986) – SSSR

Havárie v jaderné elektrárně Černobyl se stala dne 26. dubna 1986 v 01:23. V důsledku nezdařeného experimentu došlo ke dvěma následným výbuchům na reaktoru č. 4. Účelem experimentu bylo vyzkoušet bezpečnost reaktoru v případě výpadku dodávky elektřiny. Necelou minutu po zahájení testu došlo k explozi páry, která odhodila víko reaktoru a měla za následek největší uvolnění radioaktivity do životního prostředí v historii výroby jaderné energie. Odhalené jádro reaktoru hořelo po dobu 10 dnů během nichž docházelo k uvolňování radioaktivity do atmosféry a nad Evropou se vytvořil radioaktivní oblak. (Beresford, 2016)

Informace o elektrárně

Černobylská jaderná elektrárna se nachází zhruba 130 km severně od hlavního města Ukrajiny – Kyjeva. Elektrárna se skládala ze 4 reaktorů typu RBMK – 1 000. Reaktory RBMK byly používány v SSSR od roku 1954, kdy byla v Obminsku uvedena do provozu první jaderná elektrárna na světě. (Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 1996)

Elektrárna v Černobylu měla původně využívat vodovodní reaktory (VVER). Místo nich ale byly nakonec použity reaktory RBMK. Tyto reaktory měly elektrický výkon 1 000 MWe, což bylo dvakrát více než měly reaktory VVER, a také jejich výstavba a provoz byly levnější. Reaktory VVER využívaly obohacený uran, naopak reaktory RBMK byly navrženy, aby mohly fungovat s využitím přírodního uranu ^{238}U , který měl úroveň obohacování pouhých 2–3 % ^{235}U . Další výhodou reaktorů RBMK bylo, že se daly stavět na místě z prefabrikátů, které bylo možné vyrábět i ve strojírenských závodech, které se nespécializovaly na výrobu pro jaderný průmysl. Anatolij Alexandrov, který zastával místo vědeckého ředitele pro oba typy reaktorů v Ústavu pro atomovou energii Igora Kurčatova, věděl o jejich přednostech i nedostacích a o reaktoru RBMK tvrdil, že je bezpečný jako samovar. Konstrukteři o tomto reaktoru dokonce tvrdili, že je tak bezpečný, že se dají náklady na stavbu dále zmenšit tím, že bude postaven bez ochranné obálky, tzv. kontejnmentu, který by v případě selhání reaktoru byl schopný zadržet záření. (Plokhly, 2019)

Stavba čtvrtého bloku byla dokončena v prosinci 1983 a již 20. prosince začal reaktor vyrábět energii. Obvykle se po dokončení stavby provádějí testy jednotlivých částí a teprve poté je elektrárna spuštěna. Jaderná elektrárna Černobyl nemohla déle otálet se svým spuštěním, protože se musela uvést do provozu do konce roku 1983, i když neměla splněné všechny testy. Jeden z testů se například týkal nouzového fungování turbíny. (Králová, b.r.)

Čtvrtý blok v jaderné elektrárně Černobyl byl nový a mnozí lidé se domnívali, že je také nejbezpečnější z celé elektrárny. Byl umístěn v tzv. „duplexu“, kde byl umístěn spolu s třetím blokem. Oba bloky měly výrobní kapacitu až 1 000 MWe. (Plokhy, 2019)

Uvnitř reaktorové nádoby byly umístěny grafitové bloky, které měly za úkol zpomalovat rychlé neutrony. Na horní i spodní straně se nacházely dvě masivní betonové desky, které sloužily jako biologické štíty. Horní biologický štít byl nazývaný „Systém Je“. (Plokhy, 2019)

V reaktoru bylo umístěno 1 661 palivových souborů o délce 3,5 m. Tyto tyče byly naplněny peletami s obsahem 2–3 % obohaceného uranu ^{235}U a přírodního uranu ^{238}U . Dále zde bylo 211 pohyblivých regulačních tyčí, jenž byly vyrobeny z karbidu bóru a sloužily ke zpomalování štěpné reakce. (Plokhy, 2019)

Průběh havárie

Přípravy na zkoušku reaktoru začaly v březnu a v polovině dubna již běžely naplno. Zkouška parní turbíny se řadila mezi potencionálně nejsložitější test, který měl být na reaktoru č. 4 dokončen. Už dříve se ukázalo, že při zasunutí grafitového jádra do hloubky menší než 2 m může dojít k efektu pozitivní reaktivity neboli nárůstu štěpné reakce a tím pádem i ke zvýšení výkonu. (Plokhy, 2019)

Dne 25. dubna v ranních hodinách začaly první přípravy na odstávku reaktoru č. 4. Do 4:48 se úroveň reaktoru snížila na polovinu jeho výkonu, která byla zajištěna na 1 600 MWt. Dále bylo nutné vypnout systém nouzového zásobování vodou. Tento úkon byl proveden kolem druhé hodiny odpoledne a do začátku testu zbývalo zhruba 20 minut. Poté obdržel šéf ranní směny telefonát od vedení elektrárny, aby byl test odložen kvůli výpadku jednoho z bloků na jaderné elektrárně v Mykolajevské oblasti. Zkouška byla tedy odložena a výkon reaktoru se udržoval na výkonu 1 600 MWt až do večera, kdy se

předpokládalo, že poklesne poptávka po elektřině, a nastanou vhodné podmínky k provedení samotného testu. (Plokhly, 2019)

Po půlnoci začala odstávka reaktoru, kdy byla jeho úroveň snížena z 1 600 MWt na 520 MWt. Postupně se pokračovalo ve snižování výkonu pomocí regulačních tyčí, které se zasouvaly do jádra. Čím byly tyče hlouběji, tím bylo neutralizováno více neutronů a štěpná reakce se zpomalovala. Všechny práce probíhaly podle plánu, dokud se neozval nouzový signál, že dodávka vody do reaktoru klesla na nepříjemně nízkou úroveň. To vedlo k náhlému snížení výkonu, což téměř způsobilo vypnutí reaktoru ještě před plánovaným dokončením testu. Dne 26. dubna 28 min po půlnoci zaznamenal počítač pokles výkonu reaktoru na 30 MWt. Oproti původnímu výkonu 520 MWt to byl obrovský pokles, a proto Alexandr Akimov (vedoucí směny) společně s dalším operátorem Toptunovem vypnuli automatický systém ovládání tyčí, a začali je zvedat ručně, aby zvedli již tak nízký výkon reaktoru. Za čtyři minuty se výkon zvedl z 30 MWt na 160 MWt. Zástupce hlavního inženýra Anatolij Ďatlov požadoval, aby se úroveň výkonu udržovala na 200 MWt. Byl rozhodnut provést test s touto úrovní, i když podle plánů se mělo pracovat s 760 MWt. V 1:19 se rozezněl alarm, který signalizoval nízký tlak páry, ale operátoři ho vypnuli a společně s ním vypnuli i záložní čerpadla. Díky rychlému poklesu výkonu a pokračujícímu provozu reaktoru na úrovni 200 MWt se v palivových souborech začal hromadit ^{135}Xe . Tento nuklid je vedlejším produktem jaderného štěpení a jeho hromadění znamená pomalejší absorbování neutronů. Aby nedocházelo ke snižování výkonu reaktoru, vytáhl Toptunov z aktivní zóny regulační tyče, kterých tam zbylo pouze 9 z celkového počtu 167. Díky takto velkému počtu vytažených tyčí byla jaderná reakce těžko ovladatelná a reaktor se stal nestabilním. V 1:22 ukázal počítačový systém, že se reakce začala zvyšovat, tím byli operátoři upozorněni na další faktor, který nemohli ovlivnit. Voda v chladícím systému dosáhla bodu varu a změnila se na páru. Tímto fyzikálním účinkem se snížila schopnost vody absorbovat neutrony. V 1:23:40 začal výkon reaktoru stoupat alarmující rychlostí a reaktor se vymkl kontrole. (Plokhly, 2019)

Vzhledem ke stoupajícímu výkonu reaktoru nařídil Alexandr Akimov vypnutí reaktoru pomocí tlačítka AZ-5N sloužícího k nouzovému vypnutí reaktoru. Po stisknutí tohoto tlačítka se začalo všech 178 regulačních tyčí zasouvat do aktivní zóny reaktoru. Tyče byly vyrobeny z bóru, ale jejich hroty byly z grafitu, který reakci nezpomalil, ale naopak zrychlil. Došlo k tzv. efektu pozitivního vakua, což byl velký konstrukční problém

reaktorů RBMK, který v roce 1975 málem zničil elektrárnu v Leningradu. Zavedení regulačních tyčí společně s grafitovými hroty způsobilo rychlý nárůst úrovně reakce společně s vysokým nárůstem teploty jádra. Zvýšení teploty způsobilo popraskání palivových souborů, a to v důsledku vedlo k tomu, že regulační tyče byly zasunuty jen jednou třetinou své délky. Jádro a spodní část aktivní zóny byly mimo dosah regulačních tyčí a reakce se vymkla kontrole. Výkon reaktoru se pohyboval okolo 200 MWt, ale během několika sekund se zvedl na 500 MWt a poté vystoupal na více než 30 000 MWt, což byl desetinásobek normy. Rychle rostoucí počet neabsorbovaných neutronů spálil ^{135}Xe , který do té doby udržoval reaktor pod kontrolou. (Plochy, 2019)

Palivové soubory se z důvodu vysoké teploty rozpadly, tablety uranového paliva se uvolnily do vody chladicího systému. Tento krok způsobil obrovský nárůst páry, který neměl kam unikat. Přetlak v reaktoru odmrštil biologický štít reaktoru o váze 1 000 t. (World Nuclear Association, 2019) Deska přistála zpět na reaktoru, ale nezakryla ho úplně a zanechala otvor, kterým unikalo záření do atmosféry. Bylo přesně 1:23:44. O 2–3 s později nastala druhá, mnohem silnější exploze. Tato reakce nastala vniknutím vzduchu do reaktoru, kde společně s vodní párou a rozžhaveným grafitem vznikl vodík. Exploze rozmetala do okolí přibližně 700 t radioaktivního hořícího grafitu, který způsobil požár. (Česká televize, 2016; Plochy, 2019)



Obrázek 3: Fotografie poničeného reaktoru

Zdroj: (Sarcophagus, b.r.)

Následky havárie

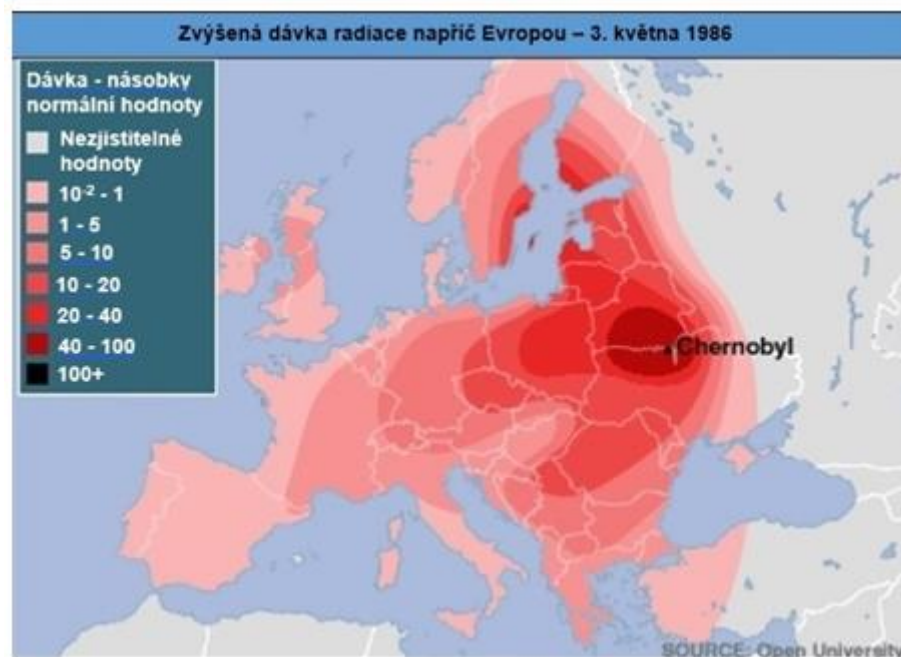
V 1:26 byl spuštěn požární alarm a hasičské jednotky dorazily na místo události v 1:28. K zásahu byli povoláni i hasiči, kteří v ten den službu neměli. V 2:20 se povedlo hasičským jednotkám požár lokalizovat a kolem sedmé hodiny ráno byl požár uhašen. Většina zasahujících hasičů si po nějaké době začala stěžovat na bolesti hlavy, sucho v krku a na žaludeční nevolnosti doprovázené zvracením. Stejně symptomy měli také operátoři ze čtvrtého bloku, šlo o počáteční symptomy akutní nemoci z ozáření. Všichni zasažení byli hospitalizováni v místní nemocnici a později byli převezeni do nemocnic v Moskvě a na další místa. (Česká televize, 2016; Ploky, 2019)

Pacienti z Černobylu, 134 mužů a žen, kterým byla diagnostikována akutní nemoc z ozáření, byli později rozděleni do čtyř kategorií. V první kategorii, do které spadalo dvacet pacientů ozářených dávkou v rozmezí od 6,5 do 16 Gy, byla úmrtnost téměř stoprocentní. Ve druhé kategorii, do které spadalo také dvacet pacientů ozářených dávkou v rozmezí 4,2 do 6,4 Gy, byla úmrtnost cca jedna třetina. Ve třetí kategorii, kde došlo k ozáření pacientů v rozmezí od 2,2 do 4,1 Gy, byla statistika mnohem lepší, neboť zemřela pouze jedna osoba. U pacientů ve čtvrté kategorii, kteří byli ozáření dávkou v rozmezí od 0,8 do 2,1 Gy, nebylo zaznamenáno žádné úmrtí. Celkově zemřelo na akutní nemoc z ozáření během prvních čtyř měsíců po expozici dvacet osm lidí. (Ploky, 2019)

O evakuaci obyvatelstva v Pripjati se rozhodlo 27. dubna ráno, kdy míra radiace vzrostla na 180 až 300 mR (milirentgenů), v některých oblastech poblíž elektrárny se radiace zvýšila až na 600 mR. (Pro názornost, při expozici 1 rentgenu záření gama absorbuje dávku přibližně 1 rad, to je 0,01 Gy. To znamená, že v případě převedení na Gy jde o setiny.) Evakuace byla tedy nařízena na 27. dubna v odpoledních hodinách. K evakuaci posloužilo 1 255 autobusů. Dohromady bylo evakuováno více než 135 000 obyvatel z Pripjati a širokého okolí elektrárny a během následujících měsíců bylo evakuováno dalších 200 000 obyvatel. (Gorbachev, 2011; Ploky, 2019)

Radioaktivní oblak, uvolněný v době exploze, byl vyloučen do atmosféry 9 km vysoko a později se díky vzdušným proudům, roznesl nad mnoho evropských zemí. Nejprve se radioaktivní oblak dostal nad skandinávské země. Již několik hodin po nehodě se ve švédské elektrárně Forsmark rozezněly poplachové signály, které zachytily radioaktivitu na příchozích a odchozích pracovnících. Poté změna směru vzdušných proudů poslala kontaminovaný mrak nad Polsko, Československo, jižní části Německa, Rakouska.

Nakonec jižní a jihovýchodní větry doprovázené dešťovými přeháňkami, vedly ke kontaminaci balkánských zemí. (Gorbachev, 2011; Djurović, 2016)



Obrázek 4: Rozšíření radiace napříč Evropou

Zdroj: Zpracováno dle (The Chernobyl disaster, b.r.)

Havárie v jaderné elektrárně Černobyl způsobila největší nekontrolovatelné uvolňování radioaktivních látek do životního prostředí, jaké kdy bylo zaznamenáno pro jakoukoli civilní operaci. Většina radioaktivního spadu byla rozptýlena na Bělorusko, Ukrajinu a Rusko. Během prvních tří dnů od havárie byl pro obyvatele nejnebezpečnější ¹³¹I a poté ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr a v menší míře také ²⁴¹Pu. (Djurović, 2016, World Nuclear Association, 2019)

Bylo nezbytně nutné odstranit radioaktivitu a dekontaminovat okolí tří dalších reaktorů. V letech 1986–1987 se na této očiště podílelo asi 200 000 lidí, tzv. likvidátorů, z celého Sovětského svazu. Zhruba 20 000 z nich bylo zasaženo dávkou o přibližné velikosti 250 mSv a několik z nich dokonce dávkou o přibližné velikosti 500 mSv. Později se počet likvidátorů zvedl na 600 000, ale většina z nich byla zasažena jen malými dávkami záření. Nejvyššími dávkami bylo zasaženo zhruba 1 000 záchranářů a pracovníků, kteří se podíleli na likvidování nehody během prvního dne. (World Nuclear Association, 2019)

Současná situace

V současnosti je reaktor č. 4 ukryt pod mohutným železo-betonovým sarkofágem. Černobylský sarkofág má rozlohu větší než stadion ve Wembley a jeho výška převyšuje Sochu svobody. Stavba prvního (předešlého) sarkofágu trvala 206 dní a bylo použito 400 000 m³ betonu a 7 300 t kovové konstrukce. Pracovníci zde mohli být pouze 5 až 7 min a poté museli hodit své oblečení do odpadu. Tato stavba sloužila jako provizorní řešení a bylo nutné najít nové, dlouhodobější a lepší východisko, které by vydrželo alespoň 100 let. Deset let po katastrofě se setkali představitelé G7 v Denveru a rozhodli se na stavbu nového sarkofágu přispět 300 miliony dolarů. Stavbou nového sarkofágu bylo pověřeno francouzské konsorcium a v roce 2004 tento projekt schválila ukrajinská vláda. (Borys, 2017, Králová, b.r.)

Segmenty ochranné obálky byly postaveny a předem smontovány v Itálii a na Ukrajinu se přepravovaly pomocí lodí. Aby se minimalizovalo ozáření pracovníků, byla konstrukce sarkofágu postavena 300 m od místa nehody. Celý tento obří kryt, jehož součástí jsou moderní ventilační systémy a dálkově ovládané jeřáby, byl postupně nasunut nad dosluhující sarkofág a jeho finální usazení proběhlo 29. listopadu 2016, 30 let a sedm měsíců po osudné havárii. Konstrukce tohoto sarkofágu je postavena tak, aby mohla sloužit jako ochrana poškozeného reaktoru dalších 100 let. (Borys, 2017, Králová, b.r.)



Obrázek 5: Stavba nového sarkofágu

Zdroj: (New Safe Confinement, b.r.)

1.6.2 Fukushima Dai-ichi (2011) – Japonsko

Jaderná elektrárna Fukušima Daiichi, také nazývána jako Fukušima I, se nachází v Japonsku poblíž měst Futaba a Okuma zhruba 250 km severně od hlavního města Tokia. Její výstavba začala v roce 1967, v roce 1971 byl uveden do provozu její první blok a v roce 1979 byla elektrárna dokončena. Fukušima Daiichi byla první elektrárnou, kterou postavila a provozovala výhradně společnost Tokyo Electric Power Company (TEPCO). Po zemětřesení a následné vlně tsunami došlo na této jaderné elektrárně k havárii. (Fukushima Nuclear Power Station, Japan, ©2020)

Informace o elektrárně

Celkový instalovaný výkon šesti reaktorů BWR měl s celkovou kapacitou 4 696 MWe. První reaktor měl kapacitu 460 MWe, reaktory 2, 3, 4 a 5 dosahovaly kapacity 784 MWe a šestý reaktor dosahoval výkonu 1 100 MWe. Reaktory 1 až 5 byly typu Mark I, zatímco reaktor č. 6 byl Mark II postavený s kontejnmentovými strukturami. Všechny šest reaktorů bylo navrženo americkou společností General Electric v šedesátých a sedmdesátých letech 20. století. (Wagner, 2015; Fukushima Nuclear Power Station, Japan, ©2020)

Průběh havárie

Jaderná havárie v atomové elektrárně Fukušima byla způsobena silným zemětřesením a následnou vlnou tsunami, která zasáhla severovýchodní pobřeží Japonska. Zemětřesení došlo v Japonsku dne 11. března 2011 ve 14:46 hod místního času. Toto zemětřesení je považováno za největší přístrojově zaznamenané zemětřesení v Japonsku a celkově páté největší zemětřesení na světě od roku 1900, kdy je zemětřesení zaznamenáváno moderními přístroji. Toto zemětřesení dosáhlo momentového magnituda 9,0. Po hlavním otřesu následovalo několik menších otřesů, s velikostí největšího otřesu 7,9 Richterovi škály. Zemětřesení vzniklo pod mořskou hladinou s epicentrem 70 km východně od poloostrova Ošikava. Otřesy trvaly 6 min a měly celosvětový dopad. V důsledku silných otřesů půdy došlo k posunu půlů o 16 cm a došlo ke zkrácení dne přibližně o jednu mikrosekundu. Hlavní japonský ostrov Honšú se posunul o 2,4 m východně a část Japonska, která byla nejbližší epicentru, poklesla v délce okolo 400 km o 0,6 m. (Wagner, 2015)

Ačkoliv bylo toto zemětřesení nezvykle silné, nemělo příliš velké následky. Je to dáno tím, že jsou Japonci na zemětřesení připraveni, ať už stavbou odolných budov, nebo přípravou samotných obyvatel. Největší škody a následky způsobila vlna tsunami. První vlna dorazila k severovýchodnímu pobřeží přibližně po hodině. V určitých místech měla vlna výšku až 38 m a celkově zaplavila 561 km² japonského pobřeží. Za posledních 128 let, kdy se provádějí měření, byla tato vlna tsunami považována za jednu z největších. Samotná velikost vlny překvapila jak japonské odborníky, tak i veřejnost. Velikost vlny způsobila katastrofu, která měla za následek velký počet obětí i samotnou havárii jaderné elektrárny Fukušima I. Japonská pobřežní města jsou před vlnou tsunami chráněna pomocí vlnolamů a mají vybudované úkryty na vyvýšených místech pro bezpečný úkryt obyvatel. V případě popisované vlny tsunami se tato opatření ukázala jako nedostatečná mnoho lidí zemřelo na místech, kde měli být původně v bezpečí. (Wagner, 2015)



Obrázek 6: Zaplavení elektrárny vlnou tsunami

Zdroj: (Strickland, 2011)

Zemětřesení a následná vlna tsunami zasáhly severovýchodní pobřeží Japonska, kde v té době bylo v provozu jedenáct reaktorů ve čtyřech jaderných elektrárnách. Všechny se úspěšně automaticky odstavily v době, kdy došlo k samotnému otřesu půdy. Následná inspekce prokázala, že v důsledku zemětřesení nebyly způsobeny žádné významné škody. Elektrárny zasažené zemětřesením a vlnou tsunami byly součástí Tokijské elektrárenské společnosti. Šlo o jaderné elektrárny Fukušima Daiichi se třemi reaktory v provozu, Fukušima Daini se čtyřmi reaktory v provozu, Onagawa se třemi reaktory v provozu a Tokai II s jedním reaktorem v provozu. U Fukušimy Daiichi byly reaktory 4, 5 a 6 odstavené. (World Nuclear Association, 2018)

Pro jadernou elektrárnu, která je zasažena zemětřesením, je nejdůležitější rychlé zastavení štěpné reakce, během níž se uvolňuje nejvíce tepla, a tudíž představuje největší riziko. Během zemětřesení došlo k výpadku vnějšího zdroje střídavého proudu a elektrárny se připojily na náhradní zdroj elektrické energie, kterou zajišťovaly dieselaagregáty. Ty dodávaly elektrickou energii pro čerpadla, která pracovala v chladicích systémech. (Wagner, 2015)

Po necelé hodině dorazila k severovýchodnímu pobřeží vlna tsunami. V oblasti, kde se nacházela elektrárna Fukušima I, byly vystaveny vlnolamy, které měly odolávat vlnám vysokým 6 m. V ten den se k Fukušimě blížila vlna tsunami o výšce 14 m. Ta nepoškodila samotné budovy elektráren, ale zasáhla náhradní zdroje energie a došlo k jejich částečnému nebo úplnému zničení. (Wagner, 2015)

Díky rozpadu radioaktivních jader je i po vypnutí štěpné reakce v palivu stále produkována tepelná energie. Je tedy důležité tento tepelný výkon odvádět a stále chladit reaktor. Ve Fukušimě I bylo chlazení reaktoru zajišťováno cirkulací pomocí čerpadel, která přestala fungovat po zničení dieselaagregátů. Pokud dojde k vypaření vody a odhalení palivových souborů dochází k horšímu odvodu tepla a následnému zvýšení teploty. (Wagner, 2015)

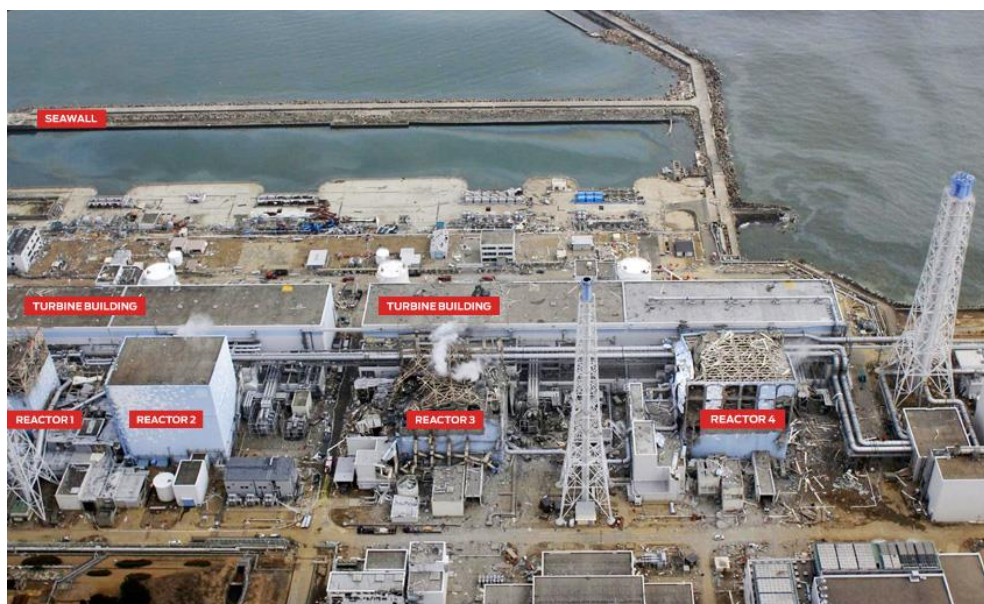
Zirkonové pokrytí palivových proutků funguje za normálního stavu jako jedna z prvních překážek, která brání úniku radioaktivních jader z paliva ven. Problém nastává v okamžiku, kdy palivové soubory nejsou ponořeny a chlazeny vodou. V té chvíli dochází k prudkému nárůstu teploty. Pokud se teplota zvýší nad 800 °C, začne oxidovat svrchní vrstva zirkonového pokrytí palivových proutků a vznikne oxid zirkoničitý a vodík. Současně je také stále produkováno teplo a zrychluje se ohřev samotného paliva. Kontejnment Mark I, užitý u většiny reaktorů ve Fukušimě I, byl poměrně malý a jeho nízký objem nedovoloval udržet koncentraci vodíku na tak nízké úrovni, aby nedošlo k výbuchu. Jako řešení se využívá dusík vyplňující kontejnment. Dusíková atmosféra neobsahuje kyslík, díky tomu nemůže dojít k výbuchu. Problém nastává v okamžiku, kdy je nutné upustit přebytečnou páru z kontejnmentu. Vysoce koncentrovaný vodík se dostane do vnějšího prostředí a smísí se se vzduchem, a tudíž i s kyslíkem. Následně může dojít k výbuchu vodíku, k čemuž došlo v jaderné elektrárně Fukušima I. (Wagner, 2015)

Během havárie bylo zahájeno chlazení jádra pomocí slané vody. Později byla mořská voda změněna na sladkou, aby se zabránilo erozi. Dne 12. března v 11:36 se zastavilo chlazení jádra ve třetím bloku a byl spuštěn systém vysokotlakého vstřikování chladiva, ten však Dne 13. března v 2:42 přestal fungovat a systém chlazení izolace jádra reaktoru se nemohl spustit. Tlak v tlakové a kontejnmentové nádobě prudce vzrostl a dne 14. března v 11:01 došlo k výbuchu vodíku v reaktoru a k následnému poškození budovy č. 3. (Wagner, 2015)

Ve druhém bloku nebyl systém chlazení izolace jádra reaktoru stabilní a jádro reaktoru nebylo náležitě chlazeno. Dne 14. března ve 13:25 přestal fungovat systém chlazení izolace jádra reaktoru. Asi v 16:00 bylo provedeno tlakové uvolňování tlakové nádrže a v 19:57 hasiči zahájili vstřikování mořské vody. Dne 15. března ve 12:02 bylo zahájeno odvětrávání, mezi 6:00 až 6:10 byl slyšet abnormální hluk poblíž tlakové supresivní komory a tlak poklesl. Předpokládalo se, že došlo k uvolnění radioaktivních materiálů z kontejnmentové nádoby a později byla tato domněnka potvrzena. (Baba, 2013)

Ve 4. bloku bylo aktivní jádro reaktoru a všechny palivové soubory v bazénu vyhořelého paliva. Dne 15. března v 6:14 došlo k explozi vodíku, který zničil budovu reaktorovou. (Baba, 2013)

Dále bylo zjištěno, že vysoce radioaktivní voda odtéká do oceánu trhlinou ve 2. bloku. Kromě toho byl také od 6. dubna čerpán dusík do kontejnmentové nádoby prvního bloku, aby se zabránilo jeho explozi. (Baba, 2013)



Obrázek 7: Škody na elektrárně Fukušima I

Zdroj: (Strickland, 2011)

Následky havárie

Japonská agentura pro jadernou bezpečnost odhadla, že dne 6. června bylo množství radioaktivity uvolněné do životního prostředí $1,6 \times 10^{17}$ Bq pro ^{131}I a $1,5 \times 10^{16}$ Bq pro ^{137}Cs , zatímco v Černobyli bylo naměřeno $1,8 \times 10^{18}$ Bq pro ^{137}Cs . Přestože odhadovaná koncentrace radioaktivních emisí ve Fukušimě tvořila zhruba pouze 15 % hodnot, naměřených v Černobyli, je i tato havárie hodnocena 7. stupněm INES. V případě havárie na jaderné elektrárně Fukušima I bylo uvolňování stroncia mnohem nižší, protože radioaktivní materiály měly nižší teplotu. (Baba, 2013)

Ve večerních hodinách dne 11. března, kdy došlo k havarijní situaci na jaderné elektrárně Fukušima I, byla obyvatelům, žijícím v okolí 3–10 km od elektrárny, nařízena evakuace. Obyvatelé této zóny se byli nuceni evakuovat přibližně do jednoho měsíce. Celkově bylo z území o rozloze $1\,100 \text{ km}^2$ evakuováno 120 000 obyvatel. Po nárůstu radiace dne 12. března došlo k rozšíření zóny na 10 km a později i 20 km. Po velkém uvolnění radioaktivity byl dne 15. března pozorován další nárůst radiace a kontaminace potravin nejen v blízkosti jaderné elektrárny Fukušima I, ale také v oblastech vzdálených zhruba 200 km, jako např. v Tokiu. Ministerstvo zdravotnictví a sociální péče, stanovilo dne 17. března prozatímní standardy pro radioaktivitu v potravinách, které jsou téměř stejné jako v zemích EU. (Baba, 2013)

Současná situace

I po více než 8 letech se musí japonská vláda a jaderný průmysl potýkat s technickými, ekonomickými a sociálně politickými problémy způsobenými havárií na jaderné elektrárně Fukušima I. Mezi technické problémy se stále řadí nefunkční reaktory, které byly vyřazeny z provozu, demontáž společné spalínové cesty pro reaktory 1 a 2. Tuto spalínovou cestu tvoří 120 m vysoký komín, kterému hrozí zhroucení kvůli prasklinám v postranních sloupcích. Mezi další technický a mnohem závažnější problém patří kontaminovaná voda, která je kontinuálně vstříkovaná do reaktorů, aby ochladila zbytky paliva. Tato voda se poté upravuje, aby se z ní odstranila většina radionuklidů. Upravená voda se ukládá do nádrže, přičemž její nynější váha je 1,1 milionu t a další den se přidávají další stovky t. Podle společnosti TEPCO objem upravené vody přesáhne kapacitu nádrže do roku 2022. Podvýbor Ministerstva hospodářství, obchodu a průmyslu Japonska doporučil, aby se upravená voda obsahující tritium vypustila do moře, jakmile radioaktivní koncentrace klesne pod předem dohodnutou hodnotu. Dohodnutá norma mezi společností TEPCO a místním sdružením rybářského průmyslu je 1 500 Bq/l, jde o hodnotu, která je pod standardem pitné vody pro tritiovou vodu 10 000 Bq/l stanovenou Světovou zdravotnickou organizací. (Suzuki, 2019)

Mezi ekonomické výzvy se počítá i odhad celkových nákladů na škody způsobené touto havárií. V prosinci 2016 Ministerstvo obchodu, hospodářství a průmyslu Japonska, zveřejnilo informaci o tom, že odhady na likvidaci havárie činí 22 bilionů jenů (188 miliard USD), což je dvakrát vyšší odhad nákladů škod, než předchozí odhad 11 bilionů jenů (96 miliard USD). Novější odhady zvýšily tuto částku o dalších 80 bilionů jenů (736 miliard USD) za 40 let. Podle dohody musí společnost TEPCO zaplatit zhruba 20 bilionů jenů z celkové výše nákladů na odstranění následků havárie, ale zbytek, zhruba 2 biliony jenů, zaplatí japonští daňoví poplatníci. Vláda neposkytla jasné vysvětlení, proč a kolik finančních prostředků bude z daní vynaloženo na pokrytí celkových nákladů k odstranění následků havárie. Energetické společnosti zároveň přenášejí část nákladů na likvidaci nehody na zákazníky pomocí zvýšení sazeb za elektřinu. (Suzuki, 2019)

Dne 19. září 2019 okresní soud v Tokiu rozhodl, že tři bývalí vrcholoví manažeři TEPCO nejsou vinni zanedbáním z nedbalosti, protože nemohli zabránit roztavení trojitého jádra reaktoru, vzhledem k tomu, že nebylo možné předvídat všechny možné scénáře dopadu vlny tsunami. Tento případ odhalil nový fakt, týkající se vln tsunami. Vnitřní studie společnosti TEPCO z roku 2008, založená na zprávě z roku 2002, dospěla k závěru,

že po zemětřesení o velikosti 8,3 RichtEROVY škály by mohla elektrárnu ohrozit vlna tsunami s výškou až 15,7 m, která by byla pro elektrárnu ležící 10 m nad mořem, fatální. S výsledky studie byly výkonné orgány společnosti TEPCO seznámeny, ale k žádným opatřením nebylo přistoupeno. Je tedy zřejmé, že se havárii dalo předejít. (Suzuki, 2019)

1.7 Stupeň 6 – těžká havárie

Během těžké havárie dochází k úniku radioaktivity, kdy unikne 1 000 až 10 000 TBq biologicky významných radioizotopů mimo prostory elektrárny. Ke zmírnění zdravotních následků je nezbytné úplné použití místních havarijních plánů. Příklad: Mayak (1957) (Česká nukleární společnost, b.r.)

1.7.1 Mayak (1957) – Sovětský svaz

Dne 29. září 1957 došlo v bývalém Sovětském svazu k jaderné havárii, která je hodnocena jako třetí nejhorší hned po ukrajinském Černobylu a japonské Fukušimě. Je také známa pod názvem Kyštymská katastrofa/havárie. Havárie se stala v závodě Mayak, kde docházelo ke zpracování radioaktivního materiálu. Závod Mayak se nacházel v Čeljabinské oblasti poblíž města Ozersk zhruba 1 500 km východně od hlavního města Ruska, Moskvy. Odborníci se domnívají, že došlo k explozi z důvodu selhání chlazení jedné z podzemních nádrží s vysoce radioaktivním odpadem. Z důvodu rozsáhlých dopadů havárie na okolí byla tato událost hodnocena 6. stupněm mezinárodní stupnice INES. (Němec, 2015; Česká televize, 2017)

Informace o závodu

Závod v Mayaku byl první, který se zabýval výrobou plutonia určeného k výrobě jaderných zbraní v Sovětském svazu. Jeho výstavba začala v roce 1945 a výroba byla zahájena v červnu 1948, kdy byl zprovozněn první uran-grafitový reaktor určený k výrobě plutonia. Celý závod se skládal z průmyslové zóny o rozloze 90 km². V letech 1948 a 1949 byl Mayak plně funkčním závodem na výrobu plutonia. (Anspaugh, 2002)

Průběh nehody

Informace o příčinách nehody a jejích důsledcích nebyly široké, ale ani vědecké veřejnosti, známy po více než 30 let. Již od začátku provozu bylo v Mayaku skladováno velké množství kapalných radioaktivních odpadů vysoké úrovně v kovových nádržích, které byly instalovány do betonových trezorů. Každá plná nádrž obsahovala 70–80 t radioaktivního odpadu, uloženého ve formě dusičnanových sloučenin. Tyto nádrže byly ochlazovány vodou a obsahovaly zařízení na měření teploty a na ukazování hladiny kapaliny v nádrži. V září roku 1957 došlo k selhání systému regulace teploty v nádrži č. 14. V důsledku toho se zvýšil proces radioaktivního rozpadu, který měl za následek zvýšení teploty, následné odpaření vody a zahřátí depozit dusičnanových solí na 330–350 °C. K tepelné explozi nádrže č. 14 došlo 29. září 1957 v 16:20 místního času. Exploze poškodila vrchní kryty nádrží č. 7 a 13. (Akleyev, 2017)



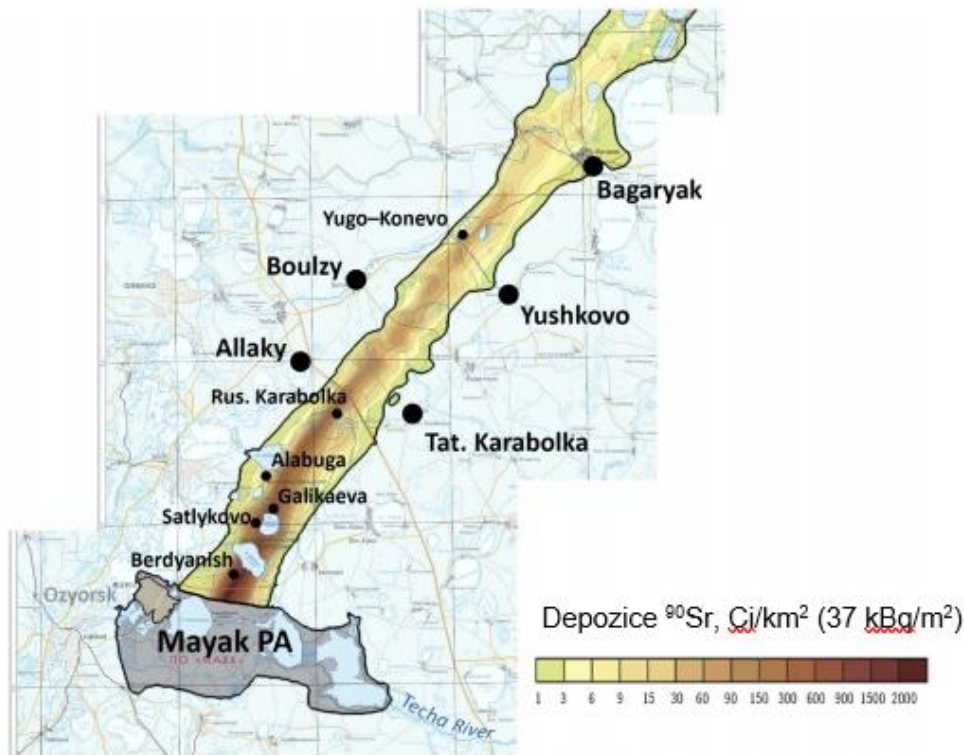
Obrázek 8: Schéma rozložení nádrží

Zdroj: Zpracováno dle (Batorshin, 2013)

Následky havárie

V době exploze činila aktivita odpadů obsažených v nádrži zhruba 740 PBq. Je odhadováno, že 90 % částic z celkové radiace spadlo v blízkosti místa výbuchu (ve vzdálenosti menší než 5 km) ve formě hrubých částic. Po explozi se vytvořil radioaktivní oblak, který se rozptýlil do atmosféry. Zhruba 74 PBq bylo rozptýleno severo-severovýchodním větrem o rychlosti 5–10 m/s. Tato oblast, zasažená radioaktivním oblakem, se označuje jako EURT (Východouralská radiační stopa). Směs

radioaktivního oblaku odpovídala produktům štěpení uranu vytvořeného v jaderném reaktoru po době rozkladu zhruba 1 rok, s vyčerpáním při 137 °C v důsledku zvláštního zpracování radioaktivního odpadu, při kterém bylo získáno ^{137}Cs . (Akleyev, 2017)



Obrázek 9: Mapa východouralské stopy

Zdroj: Zpracováno dle (Akleyev, 2017)

Východouralská radiační stopa vznikla přibližně po 10–11 hodinách po explozi. První údaje o hladinách γ záření podél Východouralské osy ve vzdálenosti do 105 km od epicentra byly získány již 29.–30. září 1957. Byla provedena ochranná opatření, která zahrnovala program nouzových činností, jež byl schválen dne 2. října 1957. Program nouzových opatření zahrnoval evakuaci obyvatelstva z nejbližší osady, kontrolu kvality potravinářských výrobků a krmiv a poskytování nekontaminovaných produktů, stanovení koncentrace ^{90}Sr na jednotku plochy a zřízení hygienicky chráněné zóny. Tato opatření však nebyla přijata včas nebo nebyla v dostatečném rozsahu. (Akleyev, 2017)

Lidé žijící v osadách Berdyanish, Satlykovo a Galikaeva, které byly nejbližší explozi, byli evakuováni 7–14 dní po nehodě z důvodu vnější expozice. Evakuovaní obyvatelé byli přestěhováni, jejich domy a přístavby byly zničeny a hospodářská zvířata byla poražena. (Akleyev, 2017)

Od podzimu roku 1957 byla ve zbytku teritoria zahájena kontrola kvality potravin a krmiv s částečnou náhradou kontaminovaných produktů určených ke snižování absorbované dávky z interních zdrojů expozice. (Akleyev, 2017)

Po výbuchu radioaktivní oblak kontaminoval zhruba 23 000 km² půdy a zasáhl statisíce lidí. Pro srovnání, únik radioaktivity v závodě Mayak byl desetkrát menší než během havárie v Černobylu. (Němec, 2015; Česká televize, 2017)

V roce 1968 prohlásila Sovětská vláda toto území za přírodní rezervaci, do které je kvůli vysokým radiačním dávkám zakázán vstup. Oficiálně se k této nehodě Sovětský svaz přiznal až v roce 1989. (Česká televize, 2017)

1.8 Stupeň 5 – havárie s rizikem vně zařízení

Při tomto stupni havárie dochází k úniku radioaktivních štěpných produktů (100 až 1 000 TBq biologicky významných radioizotopů) mimo prostor elektrárny. Zavádějí se částečné opatření podle místních havarijních plánů (např. evakuace nebo ukrytí), aby se zmenšila pravděpodobnost výskytu zdravotních následků. Aktivní zóna je z velké části poškozena z důvodu tavení nebo mechanického poškození. Příklady: Windscale (1957), Three Mile Island (1979) (Česká nukleární společnost, b.r.)

1.8.1 Three Mile Island (1979) – USA

Havárie se stala dne 28. března 1979 ve 4 ráno na 2. bloku, kdy byl reaktor v provozu na 97 % svého celkového výkonu. Došlo k poměrně malé poruše v sekundárním chladicím okruhu, která měla za následek navýšení teploty v primárním chladiči. Následně došlo k vypnutí reaktoru, ale v době vypínání reaktoru se neuzavřel pojistný ventil. Přístroje nezaznamenaly, že je pojistný ventil otevřený, čímž došlo k vypuštění chladicího média, v reaktoru nedocházelo k dostatečnému chlazení a v důsledku toho došlo k vážnému poškození jádra. Operátorům se nepodařilo správně zareagovat na automatické odstavení reaktoru. Jako hlavní příčiny této havárie byly uvedeny nedostatečné vybavení

kontrolních místností a nedostatečný výcvik pracovníků elektrárny, jak reagovat na mimořádné situace. (World Nuclear Association, 2001)

Informace o elektrárně

Elektrárna Three Mile Island se nachází poblíž města Harrisburgu v Pensylvánii v USA. V elektrárně byly dva tlakové vodní reaktory. Reaktor Three Mile Island 1 měl výkon PWR 800 MWe a byl spuštěn v roce 1974 a reaktor Three Mile Island 2 měl výkon 906 MWe a v době, kdy se stala nehoda byl téměř nový. (World Nuclear Association, 2001)

Průběh havárie

Nehodu spustilo vypadnutí napájecího čerpadla, proto byla automaticky spuštěna rezervní, nebo-li havarijní napájecí čerpadla. Další události byly důsledkem lidských a technických chyb. Jedním z hlavních problémů bylo, že se z důvodu chyby obsluhy nedostala voda do parního generátoru kvůli zavřenému blokovacímu ventilu. Tato chyba byla odstraněna zhruba po 8 min, ale parní generátor zůstal po tuto dobu bez vody, což mělo za následek automatické odstavení turbíny a reaktoru. Kvůli zhoršenému odvodu tepla z primárního okruhu začala narůstat teplota a tlak. Na tento problém reagovalo zařízení upuštěním tlaku přes přepouštěcí ventil na kompenzátoru do barbotážní nádrže. Následně došlo k poklesu tlaku v primárním okruhu, ale přepouštěcí ventil zůstal v otevřené poloze, to znamená, že i dále pokračoval výtoku chladiva z primárního okruhu i v době, kdy měl být zavřen. Zařízení i nadále reagovalo správně a po byl automaticky zapojený vysokotlaký podsystem systému havarijního chlazení aktivní zóny, doplňující vodu do primárního okruhu. Pokud by se do řešení problému nezapojil personál, zařízení by tuto chybu vyřešilo samo. Personál se však stále pokoušel vyřešit počáteční problém a neregistroval problémy, které se staly v primárním okruhu. Neuzavřel blokovací ventil, aby se zamezilo výtoku chladiva, ale ručně odpojil vysokotlaký podsystem systému havarijního chlazení aktivní zóny, z důvodu mylného přesvědčení, že je způsobené falešným zapojením vysokotlakého havarijního chlazení. Personál si myslel, že primární okruh je přeplňován vodou, ale ve skutečnosti zde byl vody nedostatek. Zhruba 10 min po počáteční poruše byla již barbotážní nádrž přeplněna vodou, která se začala rozlévat do prostoru kontejnmentu skrz prasklou pojišťovací

membránu. Hladina v kompenzátoru vzrůstala z důvodu počínajícího varu v aktivní zóně a vytlačovala vodu pomocí vznikajících parních bublin do objemu kompenzátoru. Tyto bubliny se dostaly až před hlavní cirkulační čerpadla, čímž došlo ke kavitaci a rázům a v důsledku tomu musela být odstavena. Vzhledem k existujícím bublinám byla přirozená cirkulace nepatrná a došlo k separaci vody a páry v aktivní zóně. Její hlavní část byla zahalena parou, proto byl primární okruh nedostatečně chlazen a přehříval se. Zhruba za další půl hodinu se zvýšila radioaktivita v primárním okruhu i v kontejnmentu. Teprve poté začal provozní personál provádět nápravná opatření tím, že zavřel blokovací ventil z kompenzátoru objemu a zapnul vysokotlakový systém havarijního chlazení. Personál nechápal situaci, která vznikla a střídavě vypouštěl a napouštěl vodu do primárního okruhu. Po uskutečnění několika cyklů došlo v kontejnmentu k mírným explozím, které dokazovaly přítomnost vodíku. Vznikla obava z nebezpečí exploze vodíku v primárním okruhu a byla nařízena evakuace. Mezitím se na místo nehody dostavili pracovníci státního dozoru nad jadernou bezpečností, kteří přebrali kontrolu nad reaktorem. Provoz hlavních cirkulačních čerpadel byl po čase obnoven a pracovníkům se podařilo dostat reaktor pod kontrolu. Z kontejnmentu unikl velmi malý obsah radioaktivních látek a pozdější analýzy ukázaly, že jediným zdravotním následkem pro obyvatelstvo byl psychický šok, který byl umocněn informacemi v hromadných sdělovacích prostředcích. (Klik, 1995)

Současný stav

Tato havárie vyvolala v USA odpor vůči jadernému průmyslu a zastavila jeho rozvoj po desítky let. Zbývající reaktor umístěný v 1. bloku musel čelit novým výzvám a levnější konkurenci v rychle se měnící energetické společnosti. První blok jaderné elektrárny umístěné na ostrově Three Mile Island byl uzavřen 30. září 2019. (40 Years After A Partial Nuclear Meltdown, A New Push To Keep Three Mile Island Open, 2019; McKay, 2019)

1.8.2 Windscale (1957) – Velká Británie

Největší jaderná havárie ve Velké Británii se udála v závodě Windscale v hrabství West Cumbria dne 8. října 1957. Zdejší reaktor sloužil k vojenským účelům pro výrobu plutonia. Havárie vznikla kvůli nedostatečné pozornosti obsluhy. V aktivní zóně reaktoru

1. bloku se přehřálo několik palivových souborů a vlivem tohoto přehřátí vznikl požár, který se podařilo uhasit až po čtyřech dnech. (Dienstbier, 2010)

Při požáru se uvolnily radioaktivní látky a komínem se rozptýlily nad Anglií, Walesem a severní Evropou. Během havárie nedošlo k žádnému zranění, ale byl vyhlášen zákaz konzumace mléka na ploše 520 km², který skončil po 44 dnech od jeho vyhlášení. Tato havárie byla zařazena do 5. kategorie hodnocení INES a způsobila uvolnění radioaktivních materiálů, především ¹³¹I, do okolního životního prostředí. Odhaduje se, že únikem radioaktivních látek bylo způsobeno zhruba 24 případů rakoviny štítné žlázy. Množství uniklého radioaktivního materiálu, byl 1 000krát menší než při havárii v Černobylu. (Dienstbier, 2010; Leatherdale, 2014)

Po nehodě byly utěsněny výstupní vzduchové kanály a byly odstraněny palivové soubory. Druhý reaktor, který nebyl poškozen ohněm, byl také odstaven. Elektrárna byla dekontaminovaná a její zbylé části se postupně přejmenovaly na závod Sellafield. (The world's worst nuclear power disasters, 2013)

1.9 Stupeň 4 – havárie bez rizika vně zařízení

Při tomto stupni havárie unikne mimo prostory elektrárny unikne malé množství radioaktivity. Pro nejzasaženější skupinu obyvatel individuální dávka v řádech mSv (hranice limitů, které jsou předepsané pro veřejnost). Není nutné zavádět havarijní opatření mimo elektrárnu kromě kontroly potravin. Aktivní zóna reaktoru je částečně poškozena díky tavení nebo mechanickému poškození. Je zde riziko ozáření pracovníků, které může vést k okamžitým zdravotním následkům. Příklad: Jaslovské Bohunice (1977), Tokaimura (1999) (Česká nukleární společnost, b.r.)

1.9.1 A-1 Jaslovské Bohunice (1977) – Československo

Havárie v jaderné elektrárně A-1 Jaslovské Bohunice se stala dne 22. února 1977. K havárii došlo po výměně souboru v reaktoru. Během přípravy čerstvého palivového souboru pracovníci elektrárny zpozorovali roztržený sáček se silikagelem, který se používá k absorpci vlhkosti v průběhu skladování čerstvého paliva. Silikagel se jim povedlo z větší části, ale jeho část zůstala uvnitř palivového souboru v takzvaných distančních mřížkách. Po zavedení souboru do reaktoru, tak chladivo nemohlo volně

proudit, lokální přehřátí souboru způsobilo roztavení palivových proutků a došlo k částečnému natavení těžkovodní nádoby. Těžká voda se kvůli tomu dostala do primárního okruhu a kontaminovala ho štěpnými produkty. Kvůli netěsnostem na parogenerátoru se štěpné produkty dostaly i do sekundárního okruhu a kontaminovaly jej. (Písek, 2015)

1.9.2 Tokaimura (1999) – Japonsko

První závažná jaderná havárie v japonské historii se stala dne 30. září 1999 během přestavby jaderné elektrárny Tokaimura sloužící k úpravě uranového paliva. (The world's worst nuclear power disasters, 2013)

Proces obohacování uranu se nejprve provádí přeměnou uranu na sloučeninu nazývanou hexafluorid uranu, který je za normálních podmínek plynná látka. V dalším kroku se hexafluorid uranu přeměňuje na oxid uranu, což se provádí v nádržích s vodným roztokem dusičnanu uranylu. Podle zavedeného vnitřního postupu měl být oxid uranu připravený v nádrži převeden do roztoku čistého dusičnanu uranylu a homogenizován proplachováním pomocí plynného dusíku. Následně byla směs nalita do srážecí nádrže ochlazované vodou, aby se odvedlo zbytkové teplo, které je generované exotermní reakcí. Z důvodu zabránění štěpné reakce bylo stanoveno, že do srážkové nádrže může být přeneseno maximálně 2,4 kg. Tento postup byl ale v listopadu 1996 bez povolení příslušných regulačních orgánů změněn a tím bylo umožněno zpracovávat rozpuštěný oxid uranu v kbelících z nerezové oceli, které nesplňovaly příslušná opatření. Roztok 16 l oxidu uranu, který byl obohacený na 18,8 % ^{235}U , byl rozdělen do čtyř kbelíků z nerezové oceli, které byly následně nality do srážkové nádrže. (Tokaimura Nuclear Accident, Japan, 2018)

V den nehody 30. září, dosáhl objem roztoku oxidu uranu 40 l, což odpovídá 16 kg uranu. Toto množství bylo mnohem větší, než povolovala samotná norma. Tím bylo dosaženo kritické hmotnosti, která je potřebná k zahájení jaderné štěpné reakce, doprovázené emisí neutronů a gama zářením. (Tokaimura Nuclear Accident, Japan, 2018)

Nehodou byli přímo postiženi tři pracovníci, kteří se podíleli na přípravě vzorku. Tito zaměstnanci museli být hospitalizováni, dva z nich zemřeli. Jeden po 12 týdnech od nehody a druhý po 7 měsících (první pracovník byl vystaven dávce ozáření 17 Sv

a jeho kolega byl vystaven dávce ozáření 10 Sv). Ozáření bylo dále bylo vystaveno ozáření dalších 56 pracovníků, z nichž nejméně 21 osob bylo vystaveno vysokým dávkám a muselo být sledováno pod lékařským ošetřením. 161 obyvatel žijících 350 m od zařízení muselo být evakuováno. Dalším 310 000 obyvatel, kteří bydleli ve vzdálenosti 10 km od elektrárny, bylo doporučeno, aby neopouštěli svá obydlí, dokud nebude situace znovu pod kontrolou. Toto doporučení trvalo 18 h. Nehoda v jaderné elektrárně Tokaimura byla ohodnocena 4. stupněm podle stupnice INES. (Tokaimura Nuclear Accident, Japan, 2018)

1.10 Stupeň 3 – vážná nehoda

Během tohoto stupně dojde k úniku radioaktivity mimo prostor elektrárny nad povolené limity. Následkem toho je individuální dávka pro nejvíce zasaženou skupinu obyvatel, které se nachází v okolí elektrárny, řádově desetiny mSv. Mimo prostory elektrárny nejsou nutná žádná zvláštní opatření. Z důvodu selhání zařízení nebo kvůli jeho poruše hrozí vysoké úrovně radioaktivity anebo zamoření uvnitř samotné elektrárny.

U personálu dochází k nadměrnému ozáření (jednotlivé dávky překračují limit 50 mSv – limit pro pracovníky) Příklady: Paks (2003) (Česká nukleární společnost, b.r.)

1.10.1 Paks-2 (2003) – Maďarsko

Nehoda v maďarském reaktoru Paks-2 se stala dne 10. dubna 2003. Incident vznikl během čištění palivových souborů v reaktoru. (Amon, 2003)

Ve 22:30 byl zpozorován náhlý nárůst koncentrace uvolněných radioaktivních plynů z ventilačního komínu. Zjistilo se, že radioaktivní plyn vychází z čistícího systému. Pracovníci se domnívali, že radioaktivita unikla z důvodu nedostatečného chlazení palivových souborů uvnitř systému. Dne 11. dubna se zaměstnanci elektrárny pokusili otevřít víko čistící nádoby, ale došlo ke zlomení kabelu jeřábu a víko zůstalo napůl otevřené. Kvůli tomuto poškození unikaly radioaktivní plyny z nádoby a dostaly se do životního prostředí. (Amon, 2003)

Bylo zjištěno, že radioaktivita mimo elektrárnu byla o 10 % vyšší než obvykle. Dne 16. dubna, po odstranění víka čistící nádoby, se zjistilo, že většina článků byla vážně

poškozena. Závažně bylo poničeno 30 palivových souborů. Zdálo se, že uranové pelety uložené uvnitř těchto článků vypadly a klesly na dno čistícího systému. Poškození mohlo být způsobeno náhlým proudem studené vody, který se dostal do systému, a kvůli tepelnému namáhání mohl narušit plášť palivového souboru. Rozsah poškození palivových souborů byl důvodem, proč byla tato nehoda klasifikována stupněm 3 na stupnici INES. (Amon, 2003)

1.11 Stupeň 2 – nehoda

Jde o technické poruchy nebo odchylky, které přímo nebo bezprostředně neovlivňují bezpečnost elektrárny, ale mohou vést k následnému přehodnocení a přepracování bezpečnostních opatření. Příklad: Forsmark (2006) (Česká nukleární společnost, b.r.)

1.11.1 Forsmark (2006) – Švédsko

Nehoda se stala ve Švédsku v roce 2006 na jaderné elektrárně Forsmark, kde došlo k chybě v elektrickém okruhu a následkem toho byla přerušena dodávka elektřiny. Po tomto výpadku měly začít vyrábět elektřinu diesellové agregátory, k čemuž ale nedošlo k tomu. Během této kritické situace přestaly pracovat přístroje nacházející se v regulační místnosti a pracovníci elektrárny nemohli řídit štěpnou reakci. Tento výpadek elektrického proudu trval 23 min a poté se opět podařilo získat nad elektrárnou kontrolu. (Greenpeace, © 2014)

1.12 Stupeň 1 – anomálie

Jde o funkční nebo provozní odchylky od úrovně povolených limitů. Nepředstavují riziko, ale odhalují a poukazují na nedostatky bezpečnostních opatření. Mohou vzniknout v důsledku selhání záření, chybou obsluhy nebo nesprávným provozním postupem. (Česká nukleární společnost, b.r.)

1.12.1 Temelín (2015) – Česká republika

Na jaderné elektrárně Temelín byl v roce 2015 významnou událostí únik primárního chladiva do sekundárního okruhu na 2. bloku. Tato událost nastala při přípravě na uvedení

bloku zpět do provozu po plánované odstávce kvůli výměně paliva. (Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2015)

Dne 26. 6. 2015 během náhřevu bloku před zahájením dosahování kritického stavu byl odhalen rozdíl mezi doplňováním a odpouštěním chladiva primárního okruhu v objemu cca 2 m³/h. Příčinou byl únik primárního chladiva do sekundárního okruhu přes generátor č. 4. Ihned poté se začalo s ochlazováním bloku pomocným kondenzátorem, došlo k výměně poškozeného potrubí odvodu primárních kolektorů a k proplachům všech parogenerátorů. Okamžitě po nálezů zvýšené úrovně aktivity v sekundárním okruhu byl proveden monitoring stavu radiační situace v pracovních prostorách. V omezeném prostoru na strojovně byl naměřen mírně zvýšený dávkový příkon 0,25 μSv/h. Došlo k přijetí některých preventivních opatření, kam patřilo dočasné omezení vstupu do strojovny a u vybraných pracovníků bylo uskutečněno kontrolní měření vnitřní kontaminace, která však u žádného pracovníka zjištěna nebyla. Během monitorování dalších prostorů byla zjištěna měřitelná plošná aktivita na některých místech střechy obestavby bloku v okolí, kde vyúsťuje přepouštěcí stanice do atmosféry do maximální hodnoty 6 Bq/cm². Tato událost neměla z pohledu radiační ochrany vliv na okolí elektrárny a byla vyhodnocena jako mimořádná událost prvního stupně. (Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2015)

1.13 Stupeň 0 – odchylka

Jedná se o situace, během kterých nejsou překročeny provozní limity a podmínky, a situace jsou bezpečně zvládnuty vhodnými postupy. Tyto události se dějí při běžných provozních situacích, nepředstavují žádné riziko a stávají se ve všech průmyslových zařízeních. Přesto se v jaderném průmyslu pečlivě evidují a řeší. (Česká nukleární společnost, b.r.)

1.13.1 Dukovany (2018) – Česká republika

Během odstávky 2. bloku byla při plánované kontrole svarových spojů superhavarijního napájení parogenerátoru objevena trhлина umístěná v heterogenním svarovém spoji u jednoho monitorovaného parogenerátoru. Z tohoto důvodu došlo k rozhodnutí provést totožnou kontrolu stejného svaru u všech ostatních parogenerátorů. O problému byl informován Státní úřad pro jadernou bezpečnost, který na jednání předložil předběžný

návrh řešení. Podle plnění bezpečnostních funkcí bylo stanoveno ohrožení funkce chlazení parogenerátoru s možným vlivem na chlazení reaktoru a z tohoto důvodu byla událost hodnocena stupněm 0 podle stupnice INES. (Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2018)

2 Cíl práce a hypotézy

Cílem diplomové práce bylo:

- Posoudit a porovnat informovanost studentů v Českých Budějovicích a studentů RSHU (Russian State Hydrometeorological University) v Petrohradě (Ruská federace).

Hypotézy:

- Studenti RSHU budou mít statisticky významně vyšší znalosti o haváriích na jaderných zařízeních než studenti vysokých škol v Českých Budějovicích.
- Studenti ZSF JU budou mít statisticky významně vyšší znalosti o haváriích na jaderných zařízeních než studenti ostatních vysokých škol v Českých Budějovicích.

3 Metodika

V teoretické části diplomové práce byly zpracovány informace, čerpané z odborné literatury, z legislativních norem a z internetových zdrojů, které se týkají havárií na jaderných zařízeních. Výzkumná část byla zpracována pomocí dotazníkového šetření, které bylo provedeno na čtyřech vysokých školách, kde se ho zúčastnilo vždy 50 studentů. Na Zdravotně sociální fakultě Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích (ZSF JU) se dotazníkového šetření zúčastnili studenti z navazujícího magisterského programu Civilní nouzová připravenost a studenti bakalářského oboru Radiologický asistent a Ochrana obyvatelstva se zaměřením na CBRNE (chemické, biologické, radiologické a jaderné noxy a výbušniny). Na Vysoké škole evropských a regionálních studií v Českých Budějovicích (VŠERS) se dotazníkového šetření zúčastnili studenti všech tří ročníků bakalářského studijního oboru Bezpečnostně právní činnost a z Vysoké školy technické a ekonomické v Českých Budějovicích (VŠTE) se dotazníkového šetření zúčastnili studenti bakalářského oboru Strojírenství a Pozemních staveb. V rámci letní stáže autorky na Russian State Hydrobiological University (RSHU) v dotazníkovém šetření odpovídali studenti bakalářského programu meteorologie a ekologie a studenti navazujícího magisterského programu ekologie. Dotazník obsahoval 15 otázek. (viz Příloha A). V úvodní otázce studenti odpovídali, na které vysoké škole studují. Následných 14 uzavřených otázek, které se vztahovaly k haváriím na jaderných zařízeních, bylo složeno vždy ze čtyř možností, kdy pouze jedna odpověď byla správná. Celkem bylo vytvořeno 200 dotazníků, které byly rozdány osobně nebo za pomoci vyučujících a po jejich vyplnění se zodpovězené dotazníky vybraly zpět. Díky tomu byla jejich návratnost 100 %. Pro objektivní statistické zpracování výsledků dotazníkového šetření bylo porovnáváno vždy 50 dotazníků z každého odpovídajícího výběrového statistického souboru.

3.1 Metody deskriptivní statistiky

První část statistického šetření se zabývala deskriptivní (popisnou) statistikou, kam se řadí formulace statistického šetření, škálování, měření a elementární statistické zpracování. Díky deskriptivní statistice bylo možné zpracovat velké množství informací do tabulek a grafů. (Záškodný et al., 2016)

Formulace statistické šetření

K formulaci statistického šetření bylo nezbytné vymežit následující pojmy. (Záškodný et al., 2016)

- Hromadný náhodný jev HNJ
- Statistická jednotka SJ
- Statistický znak SZ
- Hodnoty statistického znaku HSZ
- Základní statistický soubor a jeho rozsah ZSS
- Náhodný výběr NV
- Výběrový statistický soubor a jeho rozsah VSS

Škálování a měření

Škálování je výstižné vyjádření hodnot statistického znaku pomocí prvků škály. Škálování bylo provedeno prostřednictvím Sturgesova pravidla. Měření je proces, během kterého je každé statistické jednotce VSS přiřazován jeden z prvků škály. Výsledkem měření bylo zjištění, kolikrát (n_i krát) byl naměřen prvek škály (x_i). Součet všech hodnot (n_i), nazývaných absolutní četnosti, musel být roven rozsahu (n) ve výběrovém statistickém souboru. Možné výsledky měření x_i bylo možné hodnotit podle toho, jak velká je pravděpodobnost, že při měření nastanou. Relativní četnost (n_i/n), jejíž součet musel být roven 1, je dána statistickou pravděpodobností (p) výsledku x_i . Kumulativní četnosti $\sum(n_i/n)$ ukázaly pravděpodobnost, že byl naměřen výsledek, který je menší nebo roven x_i . (Záškodný et al., 2016)

Elementární statistické zpracování

Výsledky, které byly získány měřením, byly přiřazeny k jednotlivým škálám, zapsány do tabulky a následně vyjádřeny graficky a za pomoci empirických parametrů. Tabulka se skládala z následujících údajů. (Záškodný et al., 2016)

- Sloupec x_i prvky škály
- Sloupec n_i absolutní četnosti prvků škály
- Sloupec n_i/n relativní četnosti prvků škály

- Sloupec $\sum n_i/n$ kumulativní četnosti
- Sloupec $x_i n_i$ pomocný součin pro výpočet empirických parametrů

Podle této tabulky byly sestrojeny polygony kumulativních a absolutních četností. Podle vyjádření empirických parametrů byly použity parametr polohy (O_1) a parametr proměnlivosti (C_2). (Záškodný et al., 2016)

3.2 Metody matematické statistiky

Druhá část statistického šetření se skládala z metod matematické statistiky, pomocí které byly získané výsledky metody deskriptivní statistiky zpracovány a díky nimž bylo možné získat závěr o jevu, který byl sledován. Metoda matematické statistiky využívá teorii pravděpodobnosti. (Záškodný et al., 2016) V diplomové práci bylo využito parametrické testování.

Parametrické testování hypotéz

Parametrické testování hypotéz se zakládá na stanovení nulové hypotézy H_0 a alternativní hypotézy H_a . (Záškodný et al., 2016) V této práci bylo testování provedeno pomocí dvouvýběrového t-testu. Následně byla vypočítána experimentální hodnota t_{exp} , která byla porovnána s aparátem kritického oboru W .

$$t_{\text{exp}} = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\sqrt{(n_1 - 1)S^2_{x_1} + (n_2 - 1)S^2_{x_2}}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 * n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}$$

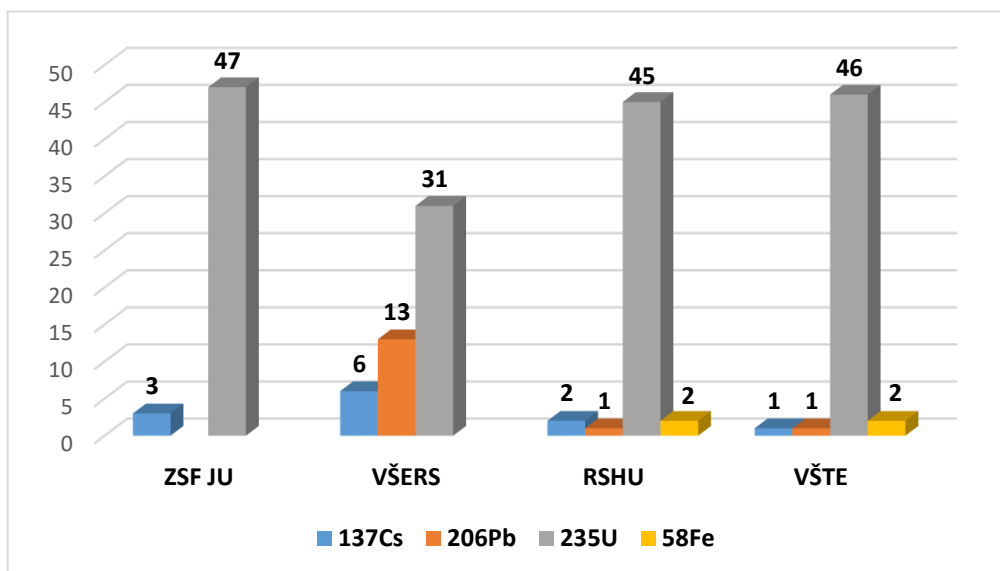
$$W = (-\infty; -t_{n_1+n_2-2} \left(\frac{\alpha}{2}\right)) \cup \left(t_{n_1+n_2-2} \left(\frac{\alpha}{2}\right); \infty\right)$$

4 Výsledky

V této kapitole jsou uvedeny výsledky dotazníkového šetření a jejich statistického zpracování. Jsou zde postupně uvedeny jednotlivé otázky i s nabízenými možnostmi, kde je vždy zvýrazněna správná odpověď. U jednotlivých otázek se vždy nachází i příslušný graf. První otázka byla informativního charakteru a sloužila k rozdělení jednotlivých dotazníků.

2) Který izotop je běžně používán ke štěpení v jaderných reaktorech?

- ^{137}Cs
- ^{206}Pb
- ^{235}U
- ^{58}Fe



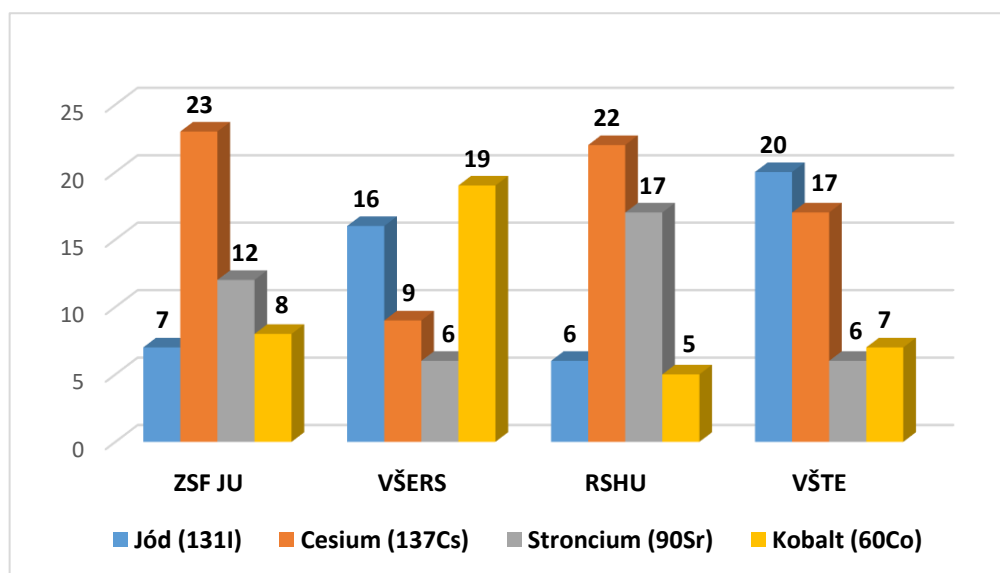
Obrázek 10: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 2 v závislosti na vysokých školách

Zdroj: vlastní výzkum

Na obrázku 10 je znázorněno početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 2 u jednotlivých studentů, kteří se dotazníkového šetření zúčastnili. Správnou odpověď zvolilo 47 respondentů ze ZSF JU, 31 respondentů z VŠERS, 45 respondentů z RSHU a 46 respondentů z VŠTE. Chybně odpověděli 3 respondenti ze ZSF JU, 19 respondentů z VŠERS, 5 respondentů z RSHU a 4 respondenti z VŠTE.

3) Který radionuklid je nejvýznamnější z hlediska dlouhodobé kontaminace životního prostředí.

- Jód (^{131}I)
- **Cesium (^{137}Cs)**
- Stroncium (^{90}Sr)
- Kobalt (^{60}Co)



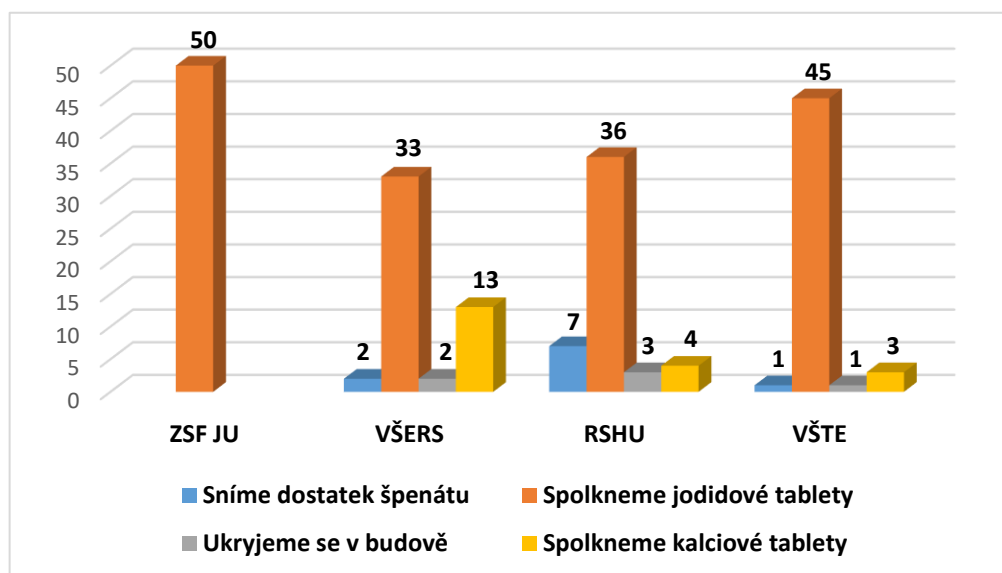
Obrázek 11: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 3 v závislosti na vysokých školách

Zdroj: vlastní výzkum

Na obrázku 11 je zobrazeno početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 3 u jednotlivých studentů, kteří na dotazníkovém šetření spolupracovali. Správně odpovědělo 23 respondentů ze ZSF JU, 9 respondentů z VŠERS, 22 respondentů z RSHU a 17 respondentů z VŠTE. Nesprávnou odpověď zvolilo 27 respondentů ze ZSF JU, 41 respondentů z VŠERS, 28 respondentů RSHU a 33 respondentů z VŠTE.

4) Kterým způsobem se chráníme proti akumulaci radioaktivního jódu ve štítné žláze?

- Sníme dostatek špenátu
- **Spolkneme jodidové tablety**
- Ukryjeme se budově
- Spolkneme kalciové tablety



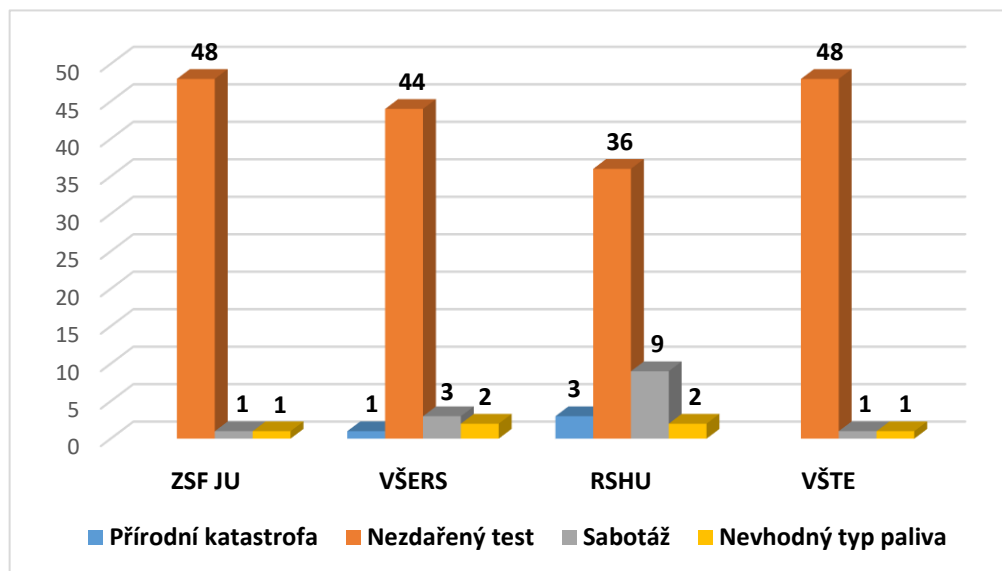
Obrázek 12: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 4 v závislosti na vysokých školách

Zdroj: vlastní výzkum

Na obrázku 12 je zaznamenáno početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č.4 u jednotlivých studentů, kteří se do dotazníkového šetření zapojili. Pro správnou variantu se rozhodlo 50 respondentů ze ZSF JU, 33 respondentů z VŠERS, 36 respondentů z RSHU a 45 respondentů z VŠTE. Chybně odpovědělo 17 respondentů z VŠERS, 14 respondentů z RSHU a 5 respondentů z VŠTE.

5) Jaká byla příčina havárie jaderné elektrárny Černobyl?

- Přírodní katastrofa
- **Nezdařený test**
- Sabotáž
- Nevhodný typ paliva



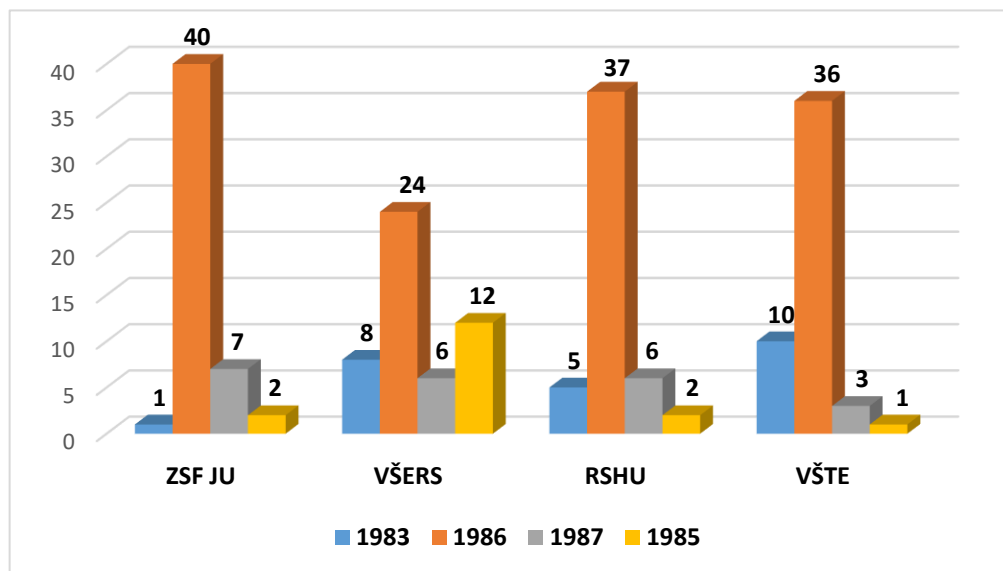
Obrázek 13: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 5 v závislosti na vysokých školách

Zdroj: vlastní výzkum

Na obrázku 13 je znázorněno početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 5 u jednotlivých studentů, kteří se dotazníkového šetření zúčastnili. Správnou odpověď zvolilo 48 respondentů ze ZSF JU, 44 respondentů v VŠERS, 36 respondentů z RSHU a 48 respondentů z VŠTE. Nesprávně odpověděli 2 respondenti ze ZSF JU, 6 respondentů z VŠERS, 14 respondentů z RSHU a 2 respondenti z VŠTE.

6) Ve kterém roce se stala jaderná havárie v Černobylu?

- 1983
- **1986**
- 1987
- 1985



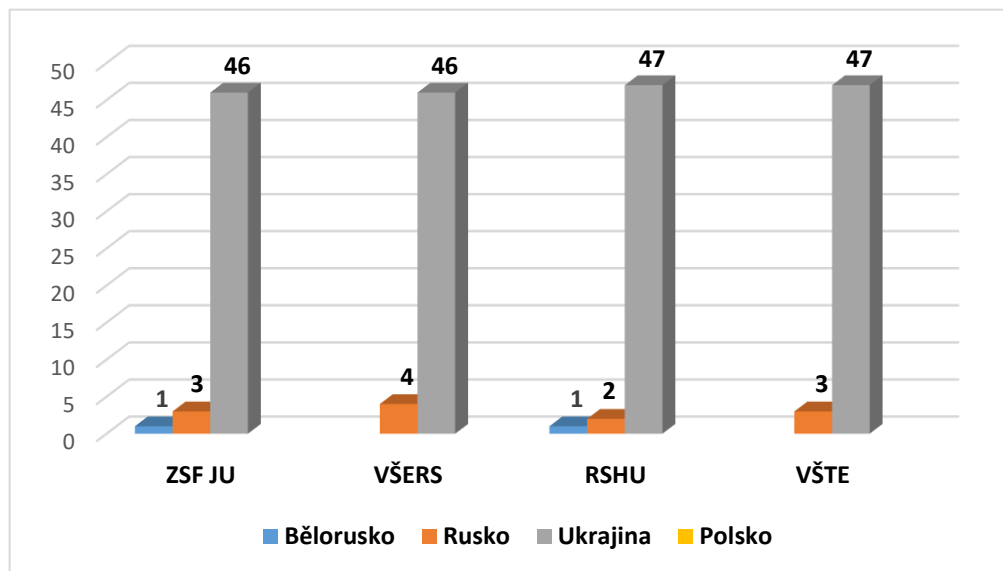
Obrázek 14: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 6 v závislosti na vysokých školách

Zdroj: vlastní výzkum

Na obrázku 14 je vyobrazeno početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 6 u jednotlivých studentů, kteří se rozhodli pro účast na dotazníkovém šetření. Pro správnou odpověď se rozhodlo 40 respondentů ze ZSF JU, 24 respondentů z VŠERS, 37 respondentů z RSHU a 36 respondentů z VŠTE. Chybnou odpověď zvolilo 10 respondentů ze ZSF JU, 26 respondentů z VŠERS, 13 respondentů z RSHU a 14 respondentů z VŠTE.

7) Ve které zemi se nachází jaderná elektrárna Černobyl?

- Bělorusko
- Rusko
- Ukrajina**
- Polsko



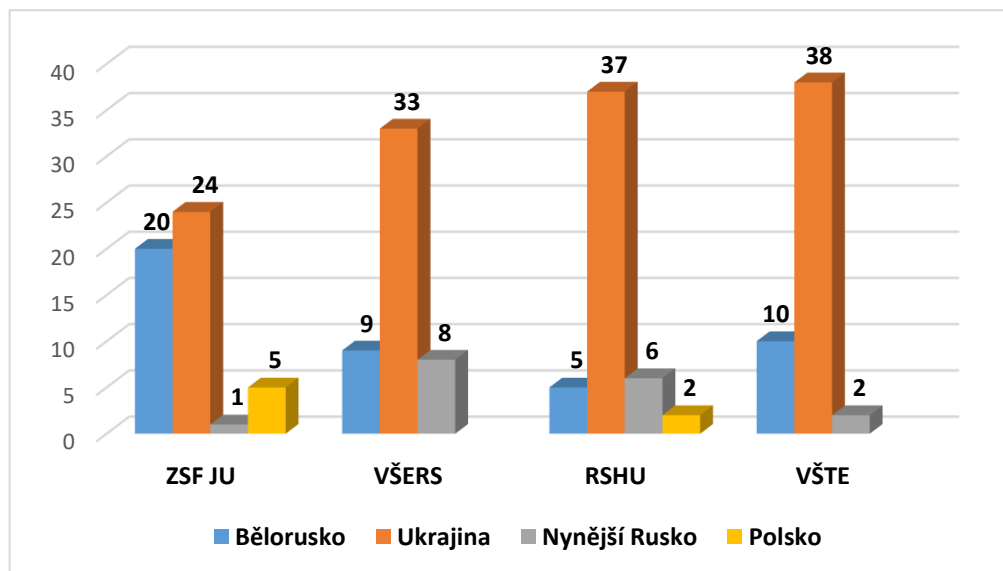
Obrázek 15: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 7 v závislosti na vysokých školách

Zdroj: vlastní výzkum

Na obrázku 15 je zaznamenáno početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 7 u jednotlivých studentů, kteří se do dotazníkového šetření zapojili. Správně odpovědělo 46 respondentů ze ZSF JU, 46 respondentů z VŠERS, 47 respondentů z RSHU a 47 respondentů z VŠTE. Nesprávně odpověděli 4 respondenti ze ZSF JU, 4 respondenti z VŠERS, 3 respondenti z RSHU a 3 respondenti z VŠTE.

8) Která země byla nejvíce zasažena radioaktivním spadem po havárii v Černobylu?

- Bělorusko
- Ukrajina
- Nynější Rusko
- Polsko



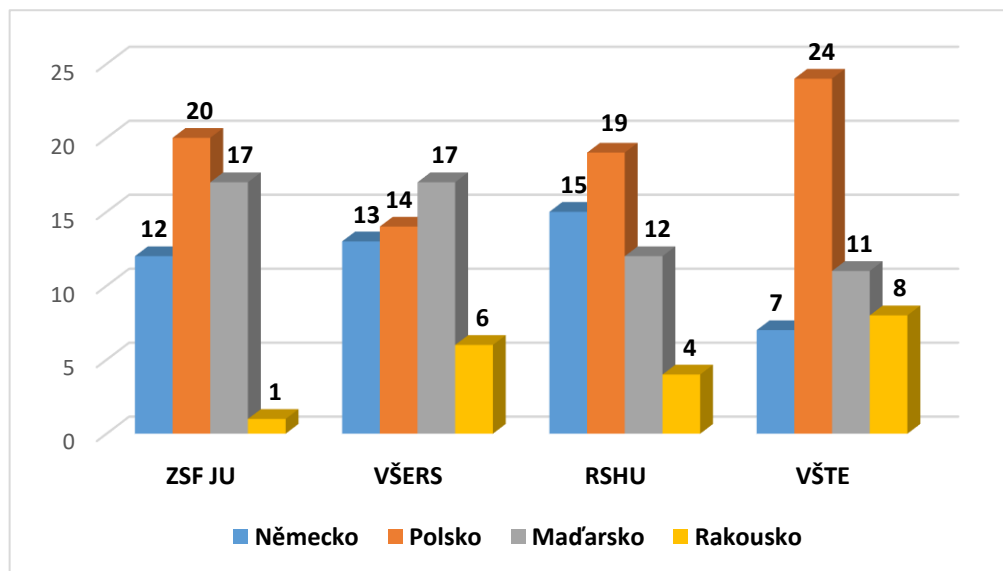
Obrázek 16: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 8 v závislosti na vysokých školách

Zdroj: vlastní výzkum

Na obrázku 16 je zobrazeno početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 8 u jednotlivých studentů, kteří na dotazníkovém šetření spolupracovali. Správnou odpověď zvolilo 20 respondentů ze ZSF JU, 9 respondentů z VŠERS, 5 respondentů z RSHU a 10 respondentů z VŠTE. Chybnou odpověď zvolilo 30 respondentů ze ZSF JU, 41 respondentů z VŠERS, 45 respondentů z RSHU a 40 respondentů z VŠTE.

9) Ve kterém státě střední Evropy došlo v roce 2003 k havárii na jaderné elektrárně.

- Německo
- Polsko
- **Maďarsko**
- Rakousko



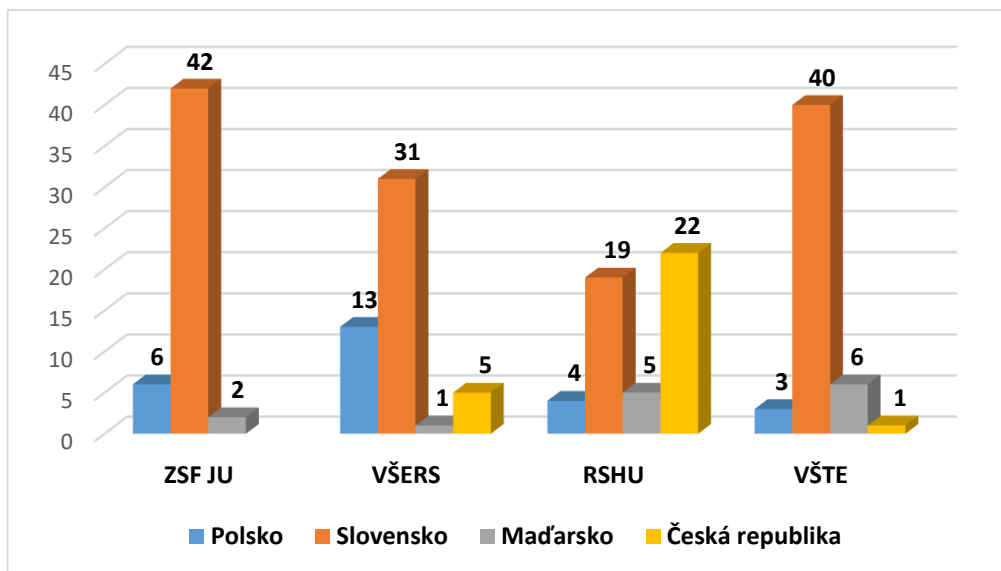
Obrázek 17: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 9 v závislosti na vysokých školách

Zdroj: vlastní výzkum

Na obrázku 17 je znázorněno početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 9 u jednotlivých studentů, kteří se dotazníkového šetření zúčastnili. Správnou odpověď vědělo 17 respondentů ze ZSF JU, 17 respondentů z VŠERS, 12 respondentů z RSHU a 11 respondentů z VŠTE. Nesprávně odpovědělo 33 respondentů ze ZSF JU, 33 respondentů z VŠERS, 38 respondentů z RSHU a 39 respondentů z VŠTE.

10) Ve kterém státě se nachází jaderná elektrárna Jaslovské Bohunice?

- Polsko
- **Slovensko**
- Maďarsko
- Česká republika



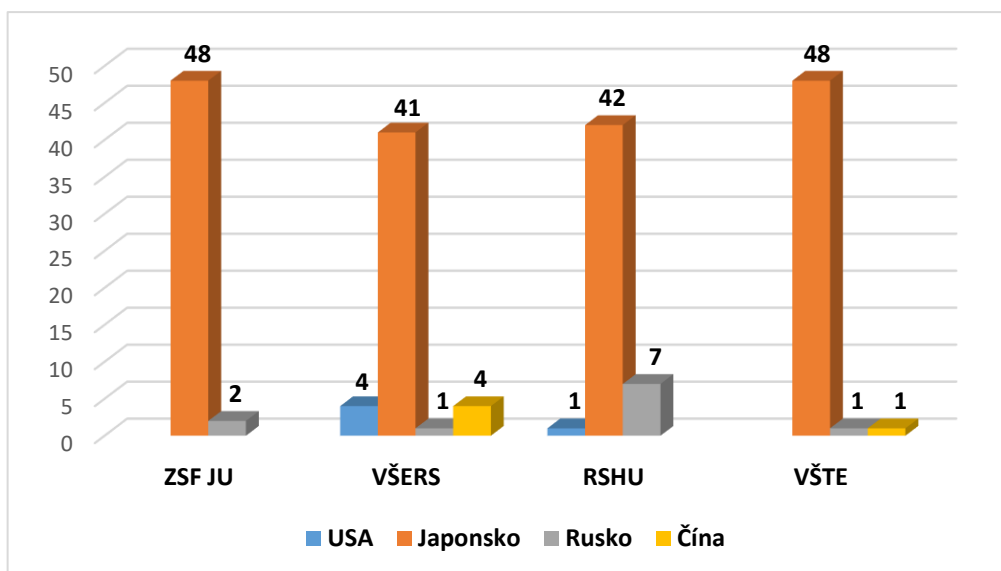
Obrázek 18: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 10 v závislosti na vysokých školách

Zdroj: vlastní výzkum

Na obrázku 18 je zaznamenáno početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 10 u jednotlivých studentů, kteří se do dotazníkového šetření zapojili. Pro správnou odpověď se rozhodlo 42 respondentů ze ZSF JU, 31 respondentů z VŠERS, 19 respondentů z RSHU a 40 respondentů z VŠTE. Chybnou odpověď zvolilo 8 respondentů ze ZSF JU, 19 respondentů z VŠERS, 31 respondentů z RSHU a 10 respondentů z VŠTE.

11) Ve které zemi došlo k druhé největší jaderné havárii v moderní historii?

- USA
- **Japonsko**
- Rusko
- Čína



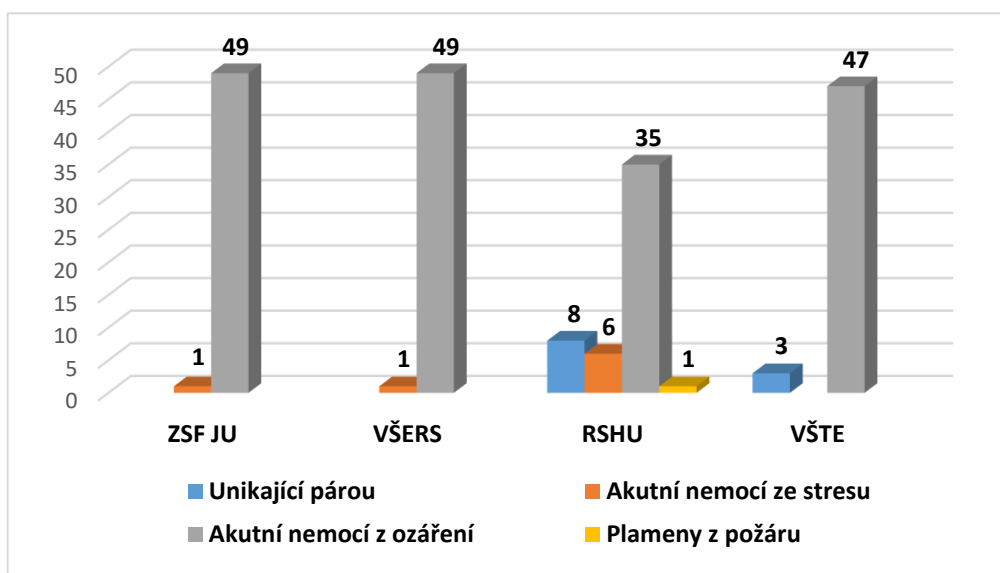
Obrázek 19: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 11 v závislosti na vysokých školách

Zdroj: vlastní výzkum

Na obrázku 19 je vyobrazeno početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 11 u jednotlivých studentů, kteří dotazníkové šetření absolvovali. Správně odpovědělo 48 respondentů ze ZSF JU, 41 respondentů z VŠERS, 42 respondentů z RSHU a 48 respondentů z VŠTE. Pro nesprávnou odpověď se rozhodli 2 respondenti ze ZSF JU, 9 respondentů z VŠERS, 8 respondentů z RSHU a 2 respondenti z VŠTE.

12) Čím byly ohroženy zasahující jednotky hasičů a ostatní pracovníci jaderné elektrárny Černobyl při likvidaci následků jaderné havárie?

- Unikající párou
- Akutní nemocí ze stresu
- **Akutní nemocí z ozáření**
- Plameny z požáru



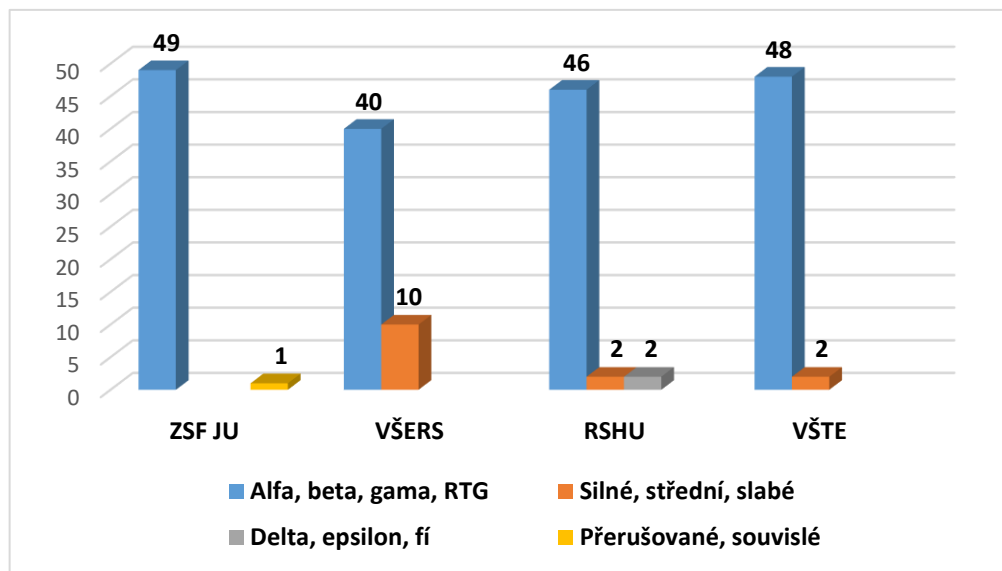
Obrázek 20: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 12 v závislosti na vysokých školách

Zdroj: vlastní výzkum

Na obrázku 20 je zobrazeno početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 12 u jednotlivých studentů, kteří na dotazníkovém šetření spolupracovali. Pro správnou odpověď se rozhodlo 49 respondentů ze ZSF JU, 49 respondentů z VŠERS, 35 respondentů z RSHU a 47 respondentů z VŠTE. Chybně odpověděl 1 respondent ze ZSF JU, 1 respondent z VŠERS, 15 respondentů z RSHU a 3 respondenti z VŠTE.

13) Které znáte druhy ionizujícího záření?

- Alfa, beta, gama, RTG
- Silné, střední, slabé
- Delta, epsilon, fi
- Přerušované, souvislé



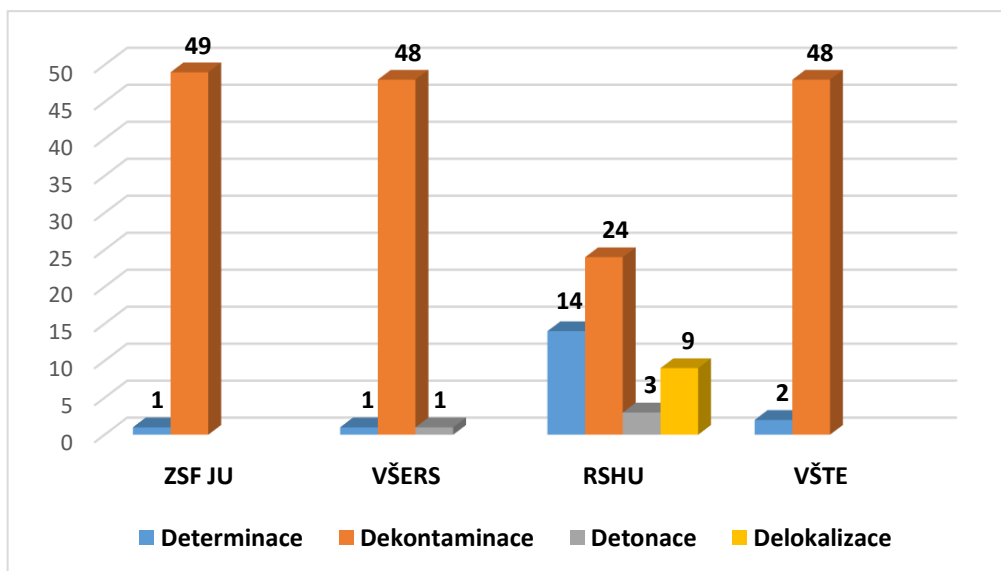
Obrázek 21: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 13 v závislosti na vysokých školách

Zdroj: vlastní výzkum

Na obrázku 21 je znázorněno početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 13 u jednotlivých studentů, kteří se dotazníkového šetření zúčastnili. Správnou odpověď zvolilo 49 respondentů ze ZSF JU, 40 respondentů z VŠERS, 46 respondentů z RSHU a 48 respondentů z VŠTE. Nesprávnou odpověď zvolil 1 respondent z ZSF JU, 10 respondentů z VŠERS, 4 respondenti z RSHU a 2 respondenti z VŠTE.

14) Jak se nazývá proces, kterým se odstraňují radioaktivní látky z povrchu těla?

- Determinace
- **Dekontaminace**
- Detonace
- Delokalizace



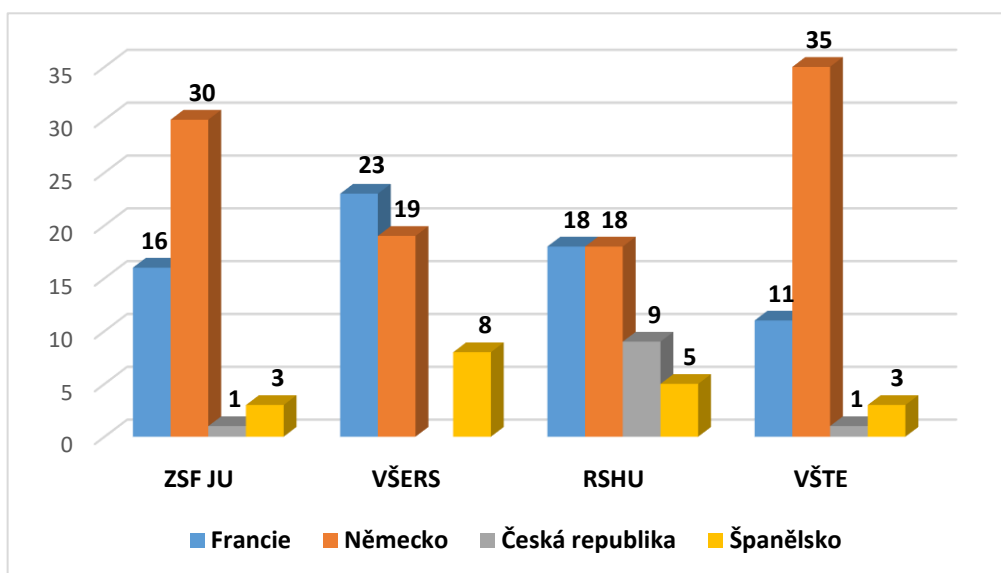
Obrázek 22: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 14 v závislosti na vysokých školách

Zdroj: vlastní výzkum

Na obrázku 22 je zaznamenáno početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 14 u jednotlivých studentů, kteří se rozhodli pro účast v dotazníkovém šetření. Správně odpovědělo 49 respondentů ze ZSF JU, 48 respondentů z VŠERS, 24 respondentů z RSHU a 48 respondentů z VŠTE. Pro chybnou odpověď se rozhodl 1 respondent ze ZSF JU, 2 respondenti z VŠERS, 26 respondentů z RSHU a 2 respondenti z VŠTE.

15) Která z níže vypsanych zemí, se po havárii v jaderné elektrárně Fukušima zavázala, že postupně uzavře všechny své jaderné elektrárny?

- Francie
- **Německo**
- Česká republika
- Španělsko



Obrázek 23: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 15 v závislosti na vysokých školách

Zdroj. Vlastní výzkum

Na obrázku 23 je zobrazeno početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku 15 u jednotlivých studentů, kteří se dotazníkového šetření zapojili. Pro správnou odpověď se rozhodlo 30 respondentů ze ZSF JU, 19 respondentů z VŠERS, 18 respondentů z RSHU a 35 respondentů z VŠTE. Nesprávně odpovědělo 20 respondentů ze ZSF JU, 31 respondentů z VŠERS, 32 respondentů z RSHU a 15 respondentů z VŠTE.

4.1 Statistické zpracování výsledků – studenti RSHU a studenti vysokých škol v Českých Budějovicích

V tabulce 1 je znázorněné statistické zpracování výsledků, které byly potřeba k následnému výpočtu.

Tabulka 1: Statistické zpracování výsledků studentů RSHU a studentů vysokých škol v ČB

	Studenti RSHU	Studenti vysokých škol v ČB
HNJ	Míra znalostí studentů v otázkách souvisejících s haváriemi na jaderných zařízeních	
SJ	Studenti RSHU	Studenti vysokých škol v Českých Budějovicích
SZ	Počet správných odpovědí	
HSZ	0–14 odpovědí	
ZSS	200 studentů	
VSS	50 studentů	50 náhodně vybraných studentů ze 150

Zdroj: vlastní výzkum

Sturgesovým pravidlem bylo určeno 7 prvků škály, které jsou vypsány v tabulce 2. Sturgesovo pravidlo, kde $k = 1 + 3,3 \log_{10}n$, k určuje počet prvků škály n značí počet statistických jednotek. Výpočet škál: $k = 1 + 3,3 \log_{10}50 = 6,60 \doteq 7$

Tabulka 2: Škálování výsledků měření studentů RSHU a studentů vysokých škol v ČB

Prvek škály	Počet správných odpovědí	Počet respondentů se správnou odpovědí	
		Studenti RSHU	Studenti vysokých škol v ČB
1	2 a méně	0	0
2	3 až 4	1	0
3	5 až 6	8	4
4	7 až 8	15	5
5	9 až 10	18	15
6	11 až 12	8	22
7	13 a více	0	4

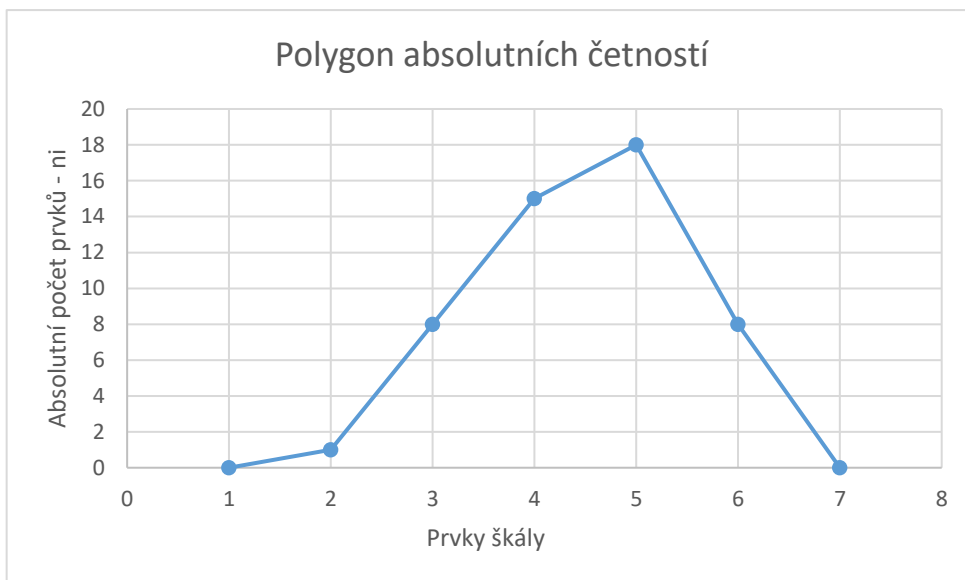
Zdroj: vlastní výzkum

Výsledky elementárního statistického zpracování jsou zapsány v tabulkách 3 a 4. Na základě těchto tabulek byly vytvořeny polygony příslušných četností. V tabulce 5 jsou uvedeny výsledky vypočítaných empirických parametrů.

Tabulka 3: Výsledky měření – studenti RSHU

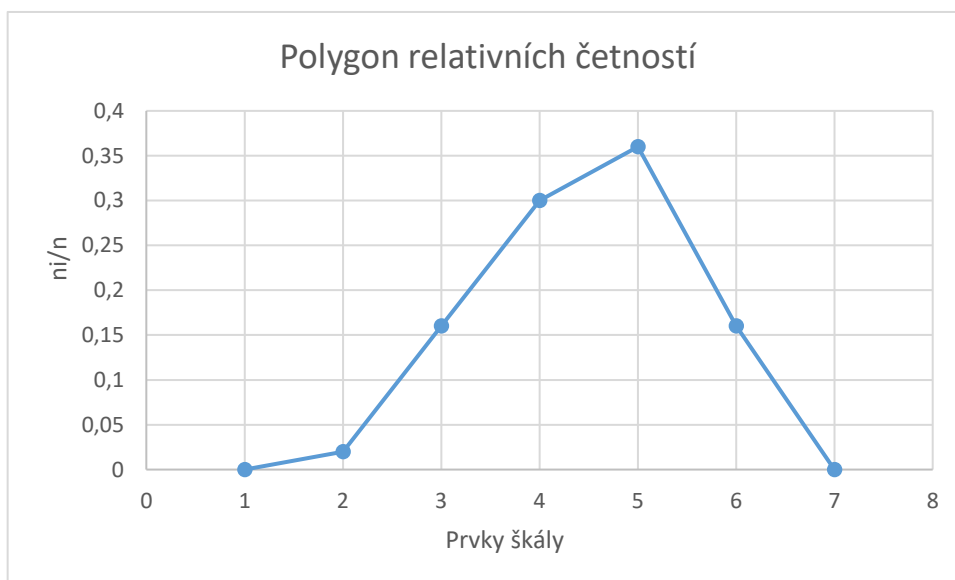
Elementární statistické zpracování – studenti RSHU					
x_i	n_i	$\sum n_i$	n_i/n	$\sum n_i/n$	$x_i n_i$
1	0	0	0	0	0
2	1	1	0,02	0,02	2
3	8	9	0,16	0,18	24
4	15	24	0,3	0,48	60
5	18	42	0,36	0,84	90
6	8	50	0,16	1	48
7	0	50	0	1	0
Σ	50		1		224

Zdroj: Vlastní výzkum



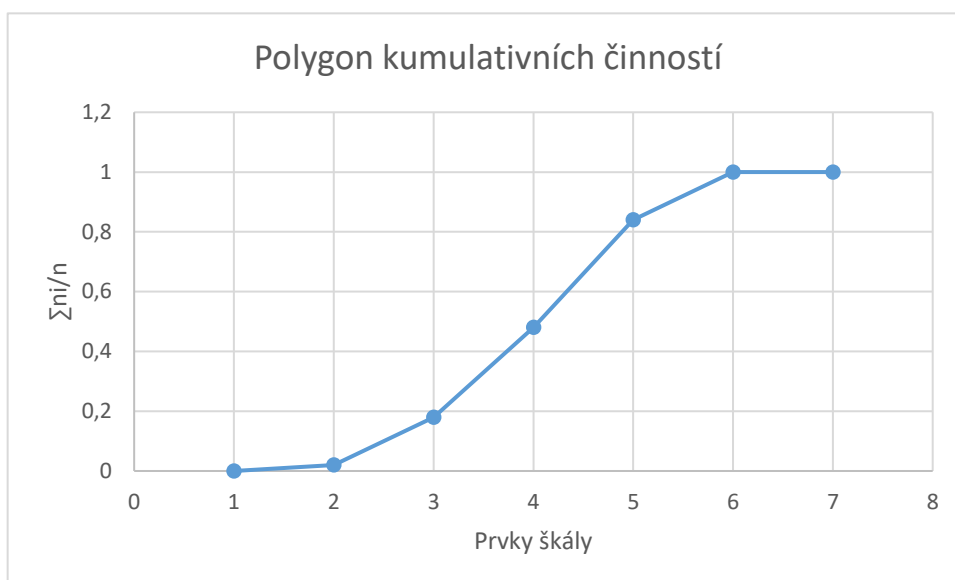
Obrázek 24: Empirické rozdělení absolutních četností – studenti RSHU

Zdroj: vlastní výzkum



Obrázek 25: Empirické rozdělení relativních četností – studenti RSHU

Zdroj: vlastní výzkum



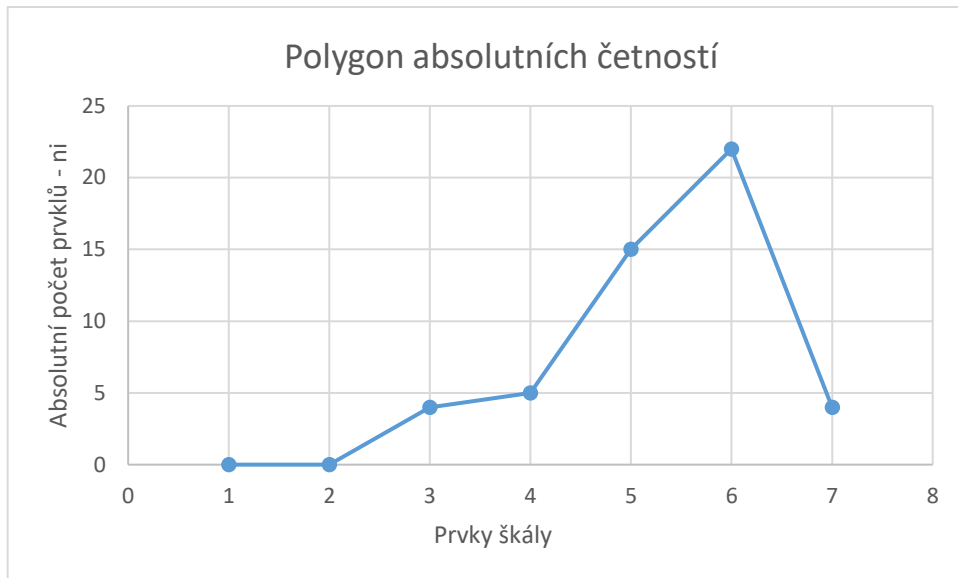
Obrázek 26: Empirické rozdělení kumulativních četností – studenti RSHU

Zdroj: vlastní výzkum

Tabulka 4: Výsledky měření – studenti vysokých škol v Českých Budějovicích

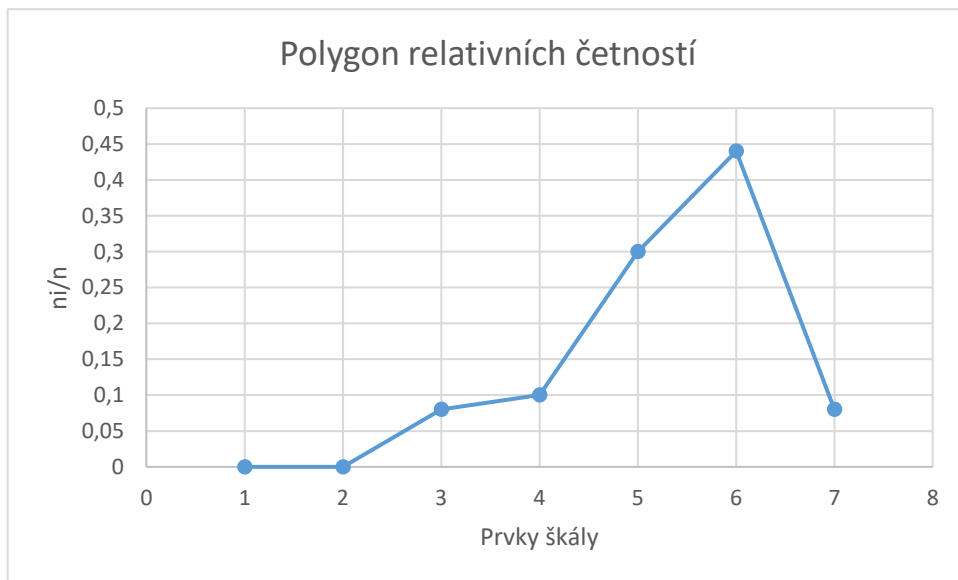
Elementární statistické zpracování – studenti vysokých škol v ČB					
x_i	n_i	Σn_i	n_i/n	$\Sigma n_i/n$	$x_i \cdot n_i$
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	4	4	0,08	0,08	12
4	5	9	0,09	0,17	20
5	15	24	0,3	0,47	75
6	22	46	0,44	0,91	132
7	4	50	0,08	1	28
Σ	50		1		267

Zdroj: Vlastní výzkum



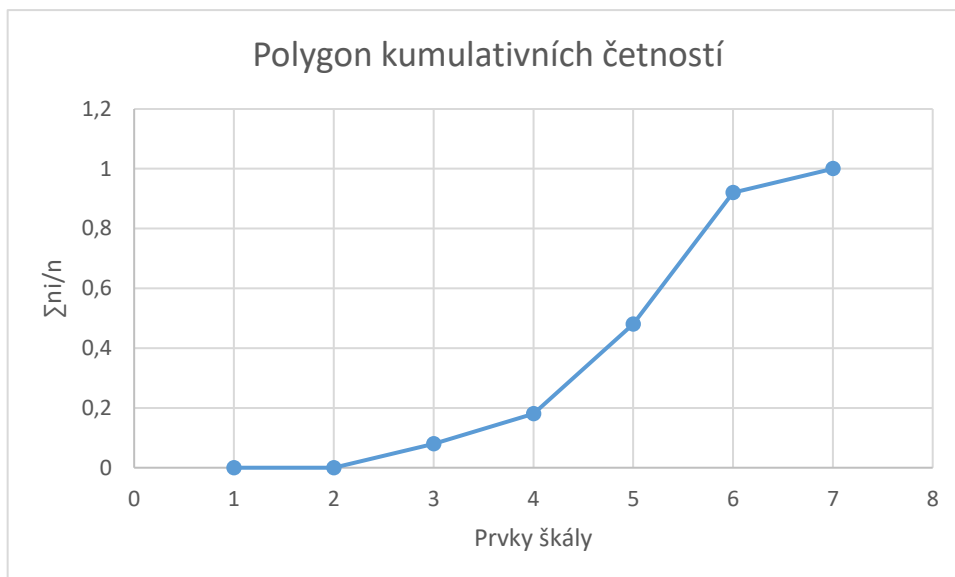
Obrázek 27: Empirické rozdělení absolutních četností – studenti vysokých škol v ČR

Zdroj: vlastní výzkum



Obrázek 28: Empirické rozdělení relativních četností – studenti vysokých škol v ČR

Zdroj: vlastní výzkum



Obrázek 29: Empirické rozdělení kumulativních četností – studenti vysokých škol v ČB

Zdroj: vlastní výzkum

Tabulka 5: Vypočítané empirické parametry – studenti RSHU a studenti vysokých škol v Českých Budějovicích

Parametr	Značení	Studenti RSHU	Studenti vysokých škol v ČB
Aritmetický průměr	O_1	4,48	5,34
Empirický rozptyl	C_2	1,0096	1,0644
Směrodatná odchylka	S_x	1,0048	1,0317

Zdroj: vlastní výzkum

K parametrickému testování byl zvolen dvouvýběrový t-test. Byly stanoveny dvě hypotézy, a to nulová hypotéza H_0 a alternativní hypotéza H_a . Vzhledem k tomu, že aritmetický průměr znalostí studentů RSHU je nižší než aritmetický průměr znalostí studentů vysokých škol v Českých Budějovicích, bude testováno, zda jsou jejich znalosti statisticky významně nižší.

- H_0 : Znalosti studentů RSHU a studentů vysokých škol v Českých Budějovicích o haváriích na jaderných zařízeních budou srovnatelné.
- H_a : Znalosti studentů RSHU o haváriích na jaderných zařízeních budou statisticky významně nižší než znalosti studentů vysokých škol v Českých Budějovicích.

K výpočtu parametrického testování bylo nutné použít vypočtené empirické parametry a označit je příslušnými indexy, viz tabulka 6. Parametry, které charakterizovaly studenty RSHU, byly označeny indexem 1. Parametry představující studenty vysokých škol v Českých Budějovicích, byly označeny indexem 2.

Tabulka 6: Empirické parametry výběrových souborů pro parametrické testování

VSS ₁ – studenti RSHU	VSS ₂ – studenti vysokých škol v ČB
$n_1 = 50$	$n_2 = 50$
$\mu_1 = 4,48$	$\mu_2 = 5,34$
$Sx_1 = 1,0048$	$Sx_2 = 1,0317$

Zdroj: vlastní výzkum

Výpočet dvouvýběrového t-testu dle vzorce:

$$t_{\text{exp}} = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\sqrt{(n_1 - 1) \cdot S^2_{x_1} + (n_2 - 1) \cdot S^2_{x_2}}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 \cdot (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}$$

$$t_{\text{exp}} = -4,22$$

$$W = (-\infty; -tn_1 + n_2 - 2 \left(\frac{\alpha}{2}\right)) \cup (tn_1 + n_2 - 2 \left(\frac{\alpha}{2}\right); \infty)$$

$$W = (-\infty; -1,96) \cup (1,96; \infty)$$

$$t_{\text{exp}} \in$$

Hodnota výsledku t_{exp} náleží do oboru kritických hodnot W . Na jejím základě lze přijmout alternativní hypotézu: „Znalosti studentů RSHU o haváriích na jaderných zařízeních budou statisticky významně nižší než znalosti studentů vysokých škol v Českých Budějovicích.“ Nulová hypotéza se zamítne.

4.2 Statistické zpracování výsledků – studenti ZSF JU a studenti VŠERS a VŠTE

V tabulce 7 je znázorněné statistické zpracování výsledků, které byly potřeba k následnému výpočtu.

Tabulka 7: Statistické zpracování výsledků studentů ZSF JU a studentů VŠERS a VŠTE

	Studenti ZSF JU	Studenti VŠERS a VŠTE
HNJ	Míra znalostí studentů v otázkách souvisejících s haváriemi na jaderných zařízeních	
SJ	Studenti ZSF JU	Studenti VŠERS a VŠTE
SZ	Počet správných odpovědí	
HSZ	0–14 odpovědí	
ZSS	150 studentů	
VSS	50 studentů	50 náhodně vybraných studentů ze 100

Zdroj: vlastní výzkum

Sturgesovým pravidlem bylo určeno 7 prvků škály, které jsou vypsány v tabulce 8. Sturgesovo pravidlo, kde $k = 1 + 3,3 \log_{10}n$, k určuje počet prvků škály n značí počet statistických jednotek. Výpočet škál: $k = 1 + 3,3 \log_{10}50 = 6,60 \doteq 7$

Tabulka 8: Škálování výsledků měření studentů ZSF JU a studentů VŠERS a VŠTE

Prvek škály	Počet správných odpovědí	Počet respondentů se správnou odpovědí	
		Studenti ZSF JU	Studenti VŠERS a VŠTE
1	2 a méně	0	0
2	3 až 4	0	0
3	5 až 6	1	2
4	7 až 8	1	11
5	9 až 10	12	14
6	11 až 12	27	22
7	13 a více	9	1

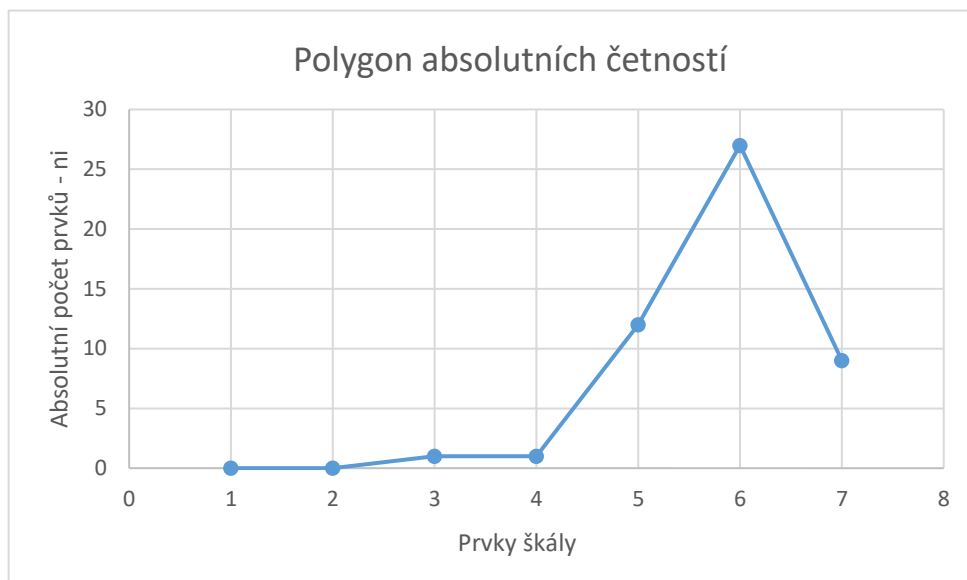
Zdroj: vlastní výzkum

Výsledky elementárního statistického zpracování jsou zapsány v tabulkách 9 a 10. Na základě těchto tabulek byly vytvořeny polygony příslušných četností. V tabulce 11 jsou uvedeny výsledky vypočítaných empirických parametrů.

Tabulka 9: Výsledky měření – studenti ZSF JU

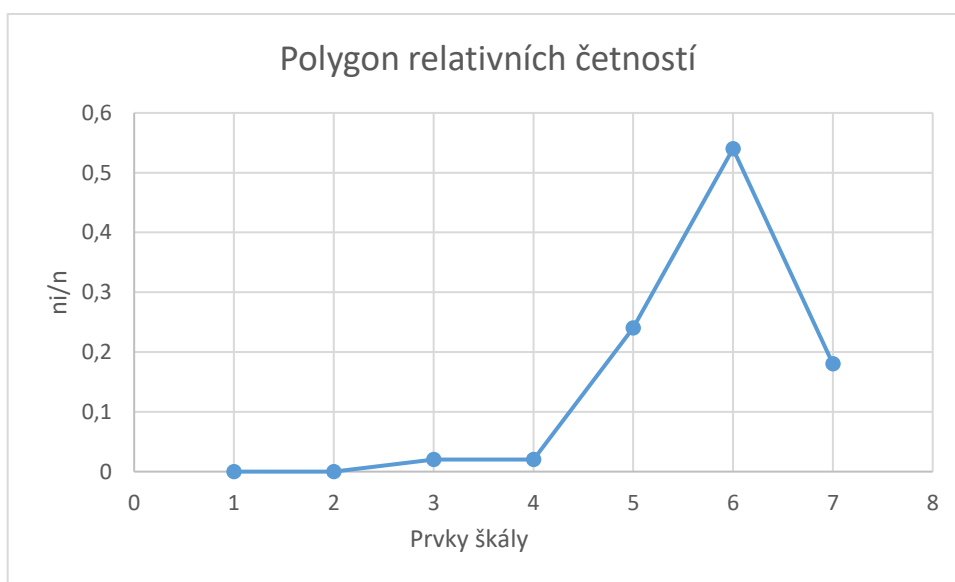
Elementární statistické zpracování – studenti ZSF JU					
x_i	n_i	$\sum n_i$	n_i/n	$\sum n_i/n$	$x_i \cdot n_i$
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	1	1	0,02	0,02	3
4	1	2	0,02	0,04	4
5	12	14	0,24	0,28	60
6	27	41	0,54	0,82	162
7	9	50	0,18	1	63
Σ	50		1		292

Zdroj: vlastní výzkum



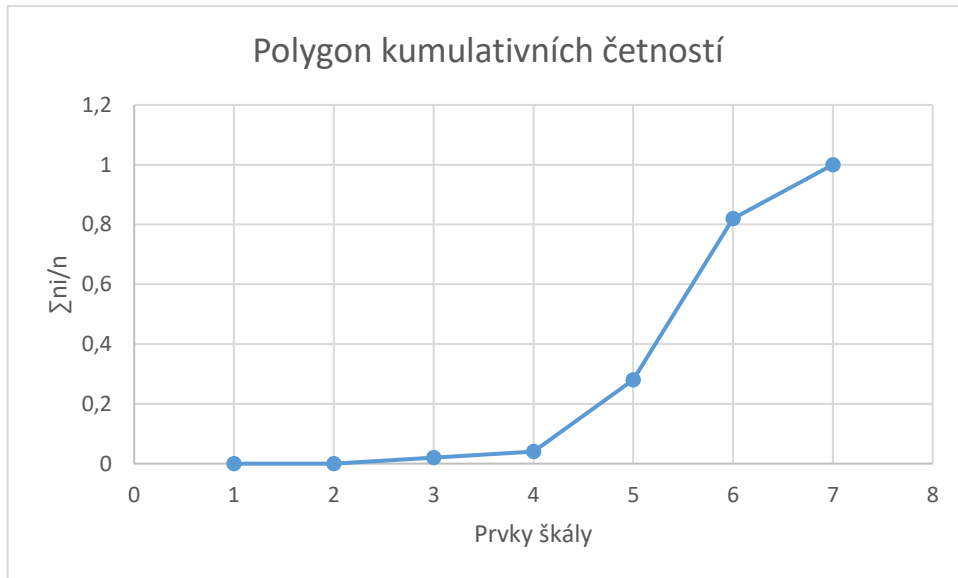
Obrázek 30: Empirické rozdělení absolutních četností – studenti ZSF JU

Zdroj: vlastní výzkum



Obrázek 31: Empirické rozdělení relativních četností – studenti ZSF JU

Zdroj: vlastní výzkum



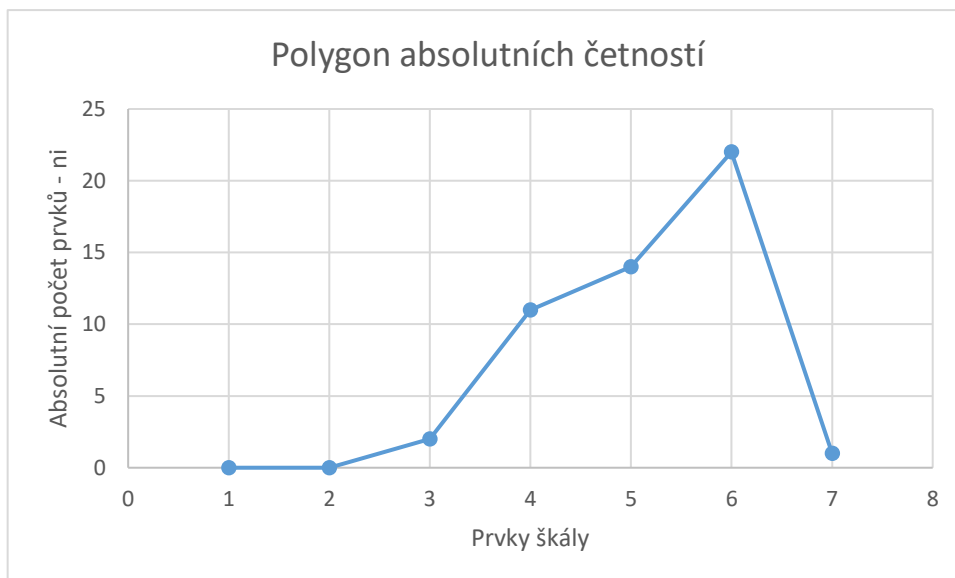
Obrázek 32: Empirické rozdělení kumulativních četností – studenti ZSF JU

Zdroj: vlastní výzkum

Tabulka 10: Výsledky měření – studenti VŠERS a VŠTE

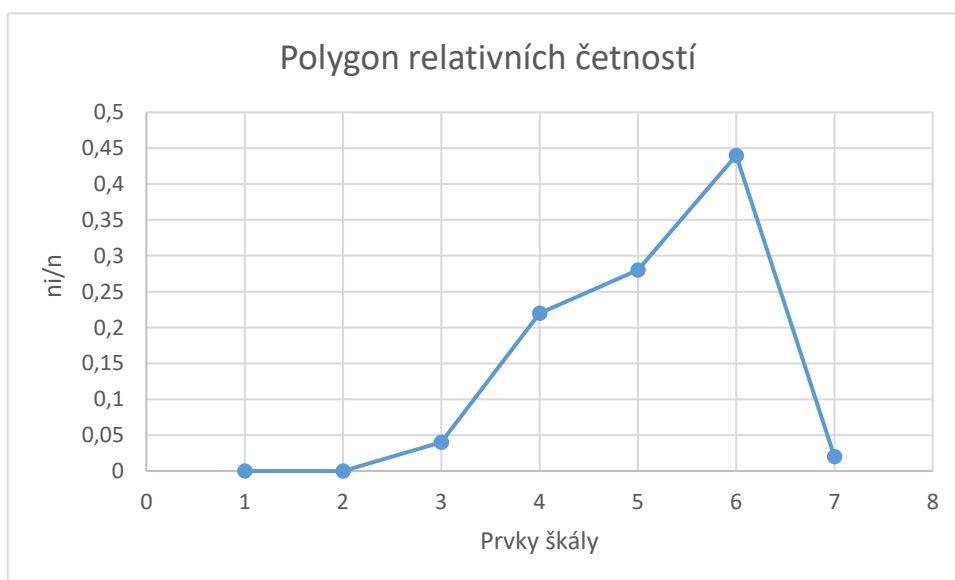
Elementární statistické zpracování – studenti VŠERS a VŠTE					
x_i	n_i	Σn_i	n_i/n	$\Sigma n_i/n$	$x_i \cdot n_i$
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	2	2	0,04	0,04	6
4	11	13	0,22	0,26	44
5	14	27	0,28	0,54	70
6	22	49	0,44	0,98	132
7	1	50	0,02	1	7
Σ	50		1		259

Zdroj: vlastní výzkum



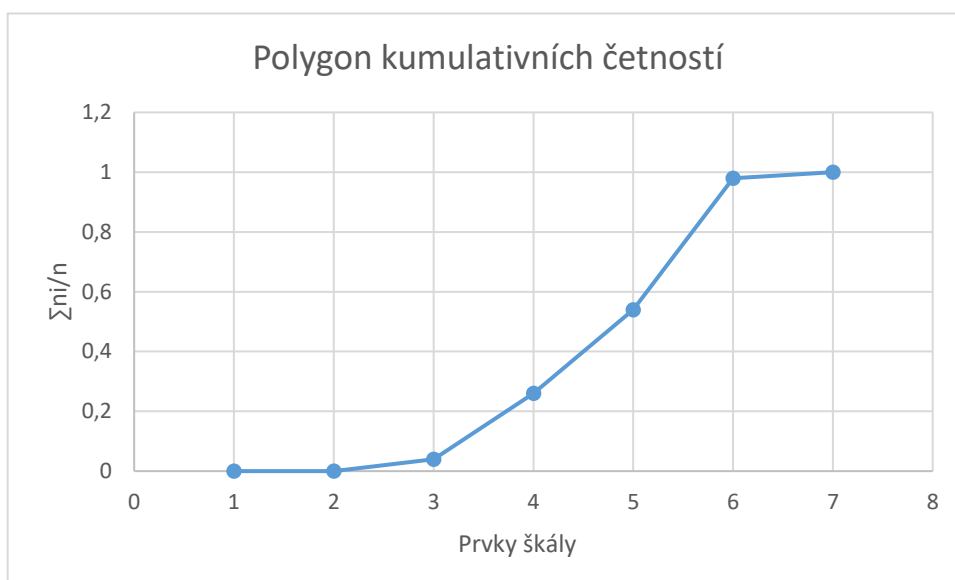
Obrázek 33: Empirické rozdělení absolutních četností – studenti VŠERS a VŠTE

Zdroj: vlastní výzkum



Obrázek 34: Empirické rozdělení relativních četností – studenti VŠERS a VŠTE

Zdroj: vlastní výzkum



Obrázek 35: Empirické rozdělení kumulativních četností – studenti VŠERS a VŠTE

Zdroj: vlastní výzkum

Tabulka 11: Vypočítané empirické parametry – studenti ZSF JU a studenti VŠERS a VŠTE

Parametr	Značení	Studenti ZSF JU	Studenti VŠERS a VŠTE
Aritmetický průměr	O_1	5,84	5,18
Empirický rozptyl	C_2	0,6544	0,8676
Směrodatná odchylka	S_x	0,809	0,9315

Zdroj: vlastní výzkum

K parametrickému testování byl zvolen dvouvýběrový t-test. Byly stanoveny dvě hypotézy, a to nulová hypotéza H_0 a alternativní hypotéza H_a .

- H_0 : Znalosti studentů ZSF JU a studentů ostatních vysokých škol o haváriích na jaderných zařízeních budou srovnatelné.
- H_a : Studenti ZSF JU budou mít statisticky významně vyšší znalosti o haváriích na jaderných zařízeních než studenti ostatních vysokých škol v Českých Budějovicích.

K vypočtení parametrického testování bylo nutné použít vypočtené empirické parametry a označit je příslušnými indexy, viz tabulka 12. Parametry, které charakterizovaly studenty ZSF JU, byly označeny indexem 1. Parametry představující studenty VŠERS a VŠTE, byly označeny indexem 2.

Tabulka 12: Empirické parametry výběrových souborů pro parametrické testování

VSS ₁ – studenti ZSF JU	VSS ₂ – VŠERS a VŠTE
$n_1 = 50$	$n_2 = 50$
$\mu_1 = 5,84$	$\mu_2 = 5,18$
$s_{x1} = 0,809$	$s_{x2} = 0,9315$

Zdroj: vlastní výzkum

Výpočet dvou výběrového t-testu dle vzorce:

$$t_{\text{exp}} = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\sqrt{(n_1 - 1) \cdot s^2_{x1} + (n_2 - 1) \cdot s^2_{x2}}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 \cdot (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}$$

$$t_{\text{exp}} = \mathbf{3,78}$$

$$W = (-\infty; -t_{n_1+n_2-2} \left(\frac{\alpha}{2}\right)) \cup (t_{n_1+n_2-2} \left(\frac{\alpha}{2}\right); \infty)$$

$$W = (-\infty; -1,96) \cup (1,96; \infty)$$

$$t_{\text{exp}} \in W$$

Hodnota výsledku t_{exp} náleží do oboru kritických hodnot W . Na jejím základě lze přijmout alternativní hypotézu: „Studenti ZSF JU budou mít statisticky významně vyšší znalosti o haváriích na jaderných zařízeních než studenti ostatních vysokých škol v Českých Budějovicích.“ Nulová hypotéza se zamítne.

5 Diskuse

Za účelem zjištění a porovnání míry informovanosti studentů vysokých škol o haváriích na jaderných zařízeních ve vybraných lokalitách bylo provedeno dotazníkové šetření. Toto šetření mělo také potvrdit nebo vyvrátit stanovené hypotézy. Dotazník byl sestaven tak, aby obsahoval co nejvíce informací o haváriích na jaderných elektrárnách, od těch nejnámějších a nejzávažnějších, až po ty méně závažné. Základní statistický soubor tvořilo 150 až 200 studentů. Výzkumný statistický soubor byl vždy složen z 50 studentů. Dotazník byl předložen k vyplnění studentů na třech vysokých školách v Českých Budějovicích, a to studentů Zdravotně sociální fakulty Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích, Vysoké školy evropských a regionálních studií a Vysoké školy technické a ekonomické v Českých Budějovicích. V rámci letní měsíční stáže autorky byl také dotazník také předložen studentům RSHU v Petrohradě.

5.1 Diskuse k otázkám uvedeným v dotazníku

Dotazník obsahoval 15 otázek. První otázka byla informativního charakteru. Další 14 otázek vždy obsahovalo 4 možné odpovědi, z nichž pouze jedna byla vždy správná.

První otázka byla informativního charakteru a zjišťovala, na které vysoké škole daný student studuje. Počet respondentů byl na každé škole stejný, vždy 50 studentů.

Otázka č. 2 zjišťovala, zda studenti vědí, který izotop je běžně používán ke štěpení v jaderných reaktorech. Správná odpověď byla ^{235}U . Nejlepšího výsledku dosáhli studenti ZSF JU (94 % správných odpovědí), následováni studenty VŠTE (92 % správných odpovědí) a RSHU (90 % správných odpovědí). Nejhoršího výsledku dosáhli studenti VŠERS (pouze 62 % správných odpovědí). S výjimkou studentů VŠERS byly odpovědi na tuto otázku velmi vyrovnané. Podle mého názoru je to proto, že jde o poměrně známou informaci.

Třetí otázka se dotazovala, zda studenti vědí, který radionuklid je nejvýznamnější z hlediska dlouhodobé kontaminace životního prostředí. Zde byla správná odpověď cesium (^{137}Cs). Nejlépe odpovědělo 46 % studentů ZSF JU, následováno 44 % studentů RSHU. O něco hůře si vedlo 34 % studentů VŠTE a nejhoršího výsledku dosáhlo 18 % studentů VŠERS. Nejčastější chybná odpověď byla jód (^{131}I). Tuto odpověď zvolilo 14 % studentů ZSF JU, 32 % studentů VŠERS, 12 % studentů RSHU a 40 % studentů

VŠTE. Tato otázka byla hodnocená jako třetí nejobtížnější. Podle mého názoru je důvodem to, že většina studentů nemá dostatečné vědomosti o poločasech rozpadu radionuklidů.

Otázka č. 4 ověřovala, zda studenti vědí, jak se chránit před akumulací radioaktivního jódu ve štítné žláze. Správná odpověď byla spolknout jodidové tablety. Nejlepšího výsledku dosáhli studenti ZSF JU (100 % správných odpovědí – jediný případ stoprocentní úspěšnosti v dotazníku), následováni studenty VŠTE (90 % správných odpovědí). O něco hůře odpověděli studenti RSHU (72 % správných odpovědí) a studenti VŠERS (66 % správných odpovědí) Celkem na tuto otázku odpovědělo správně 82 % respondentů a chybně odpovědělo 18% respondentů. Podobnou otázku položil ve své diplomové práci respondentům Marek Pražák (2016). Ptal se, na který lidský orgán se v největší míře váže radioaktivní jód a dostal 34 % správných a 66 % chybných odpovědí. Je zde tedy patrný velký rozdíl v odpovědích u obou prací. Je to možná proto, že většina respondentů ví, že má spolknout jodidové tablety, ale nevědí, který orgán tyto tablety pomáhají chránit.

Následující otázka, v pořadí pátá, se týkala příčiny havárie jaderné elektrárny v Černobylu. Správná odpověď byla nezdařený test. Tuto možnost zvolilo 96 % studentů ZSF JU a VŠTE, 88 % studentů VŠERS a 72 % studentů RSHU. Nejčastější chybnou odpovědí byla sabotáž. Celkem na tuto otázku odpovědělo správně 88 % respondentů a chybně 12 % respondentů. Podobnou otázku položil ve své diplomové práci respondentům Marek Pražák (2016) a dostal 58 % správných a 42 % chybných odpovědí. Podobně se ptala ve své diplomové práci Tetyana Royik (2019) a dostala 21 % správných a 79 % chybných odpovědí. Myslím si, že na těchto odpovědích má velký podíl medializace této katastrofy a také seriál Černobyl odvysílaný v minulém roce.

Otázka č. 6 zjišťovala, ve kterém roce se stala jaderná havárie v Černobylu. Správná odpověď byla rok 1986. Nejlépe odpovědělo 80 % studentů ZSF JU, následováno 74 % studentů RSHU. O něco hůře si vedlo 72 % studentů VŠTE a nejhoršího výsledku dosáhlo 48 % studentů VŠERS. Nejčastější chybnou odpovědí byl rok 1983. Celkem na tuto otázku správně odpovědělo 69 % respondentů a chybně 31 % respondentů. Podobnou otázku položil ve své diplomové práci respondentům Marek Pražák (2016) a dostal 82 % správných a 18 % chybných odpovědí. Podobně se ptala ve své diplomové práci Tetyana Royik (2019) a dostala 89 % správných a 11 % chybných odpovědí. Nejlépe

si tedy vedli respondenti v diplomových pracích z let 2019 a 2016. Myslím si, že důvodem může být skutečnost, že respondenti byli nejrůznějších věkových kategorií, někteří z nich mohli danou katastrofu zažít, a tudíž si jí i lépe pamatují.

Sedmá otázka se zaměřila na zemi, ve které se nachází jaderná elektrárna Černobyl. Správná odpověď byla Ukrajina. Nejlepšího výsledku dosáhli studenti RSHU a VŠTE (94 % správných odpovědí) těsně následováni studenty ZSF JU a VŠERS (92 % správných odpovědí). V této otázce bylo dosaženo celkově nejlepších výsledků. Celkem na tuto otázku správně odpovědělo 93 % respondentů a chybně 7 % respondentů. Podobnou otázku položil ve své diplomové práci respondentům Marek Pražák (2016) a dostal 71 % správných a 29 % chybných odpovědí. Podobně se ptala ve své diplomové práci Tetyana Royik (2019) a dostala 91 % správných a 9 % chybných odpovědí. Dle mého názoru je důvodem medializace této katastrofy a turistika s ní spojená.

Otázka č. 8 ověřovala, zda studenti vědí, která země byla po havárii v Černobylu nejvíce zasažená radioaktivním spadem. Správná odpověď byla Bělorusko. Tuto možnost zvolilo 40 % studentů ZSF JU, 20 % studentů VŠTE, 18 % studentů VŠERS a 10 % studentů RSHU. Nejčastější chybnou odpovědí byla Ukrajina. Podle mého názoru, byla tato otázka poměrně obtížná, i když na první pohled vypadala snadná. Studenti si neuvědomili, že se jedná o zasažení radioaktivním spadem, který zasáhl spíše okolní státy než samotné ohnisko katastrofy.

Otázka č. 9 se zabývala havárií ve střední Evropě, která se stala v roce 2003. Správná odpověď byla Maďarsko. Nejlépe odpovědělo 34 % studentů ZSF JU a VŠERS. O něco hůře si vedlo 24 % studentů RSHU a 22 % studentů VŠERS. Nejčastější chybnou odpovědí bylo Polsko. Tato otázka se jeví jako druhá nejobtížnější. Domnívám se, že to je proto, že o ní na veřejnost neproniklo mnoho informací.

Desátá otázka se dotazovala, zda studenti vědí, ve kterém státě se nachází jaderná elektrárna Jaslovské Bohunice. Správná odpověď byla Slovensko. Tuto možnost zvolilo 84 % studentů ZSF JU, 80 % studentů VŠTE, 62 % studentů VŠERS a 38 % studentů RSHU, u kterých bylo možno tento výsledek očekávat.

Jedenáctá otázka se týkala země, ve které došlo k druhé největší jaderné havárii v moderní historii. Správná odpověď byla Japonsko. Nejlépe odpovědělo 96 % studentů ZSF JU a VŠTE. O něco hůře odpovídalo 84 % studentů RSHU a 82 % studentů VŠERS. Celkem na tuto otázku správně odpovědělo 90 % respondentů a chybně

10 % respondentů. Podobnou otázku položila ve své diplomové práci respondentům Tereza Černá (2017) a dostala 95 % správných a 5 % chybných odpovědí. Domnívám se, že vysoký počet správných odpovědí poukazuje na to, že jde o poměrně nedávnou událost.

Otázka č. 12 zjišťovala, zda studenti vědí, čím byly ohroženy zasahující jednotky hasičů a ostatní pracovníci jaderné elektrárny Černobyl při likvidaci následků jaderné havárie. Správná odpověď byla akutní nemoc z ozáření. Nejlepšího výsledku dosáhli studenti ZSF JU a VŠERS (98 % správných odpovědí). O něco hůře odpovídali studenti VŠTE (94 % správných odpovědí). Nejhoršího výsledku dosáhli studenti RSHU (70 % správných odpovědí). Podle mého názoru je to opět způsobeno nedávným velkým mediálním zájmem o Černobyl.

Třináctá otázka se dotazovala na jednotlivé druhy ionizujícího záření. Správná odpověď byla Alfa, beta, gama, RTG. Nejlepšího výsledku dosáhli studenti ZSF JU (98 % správných odpovědí), následováni studenty VŠTE (96 % správných odpovědí). O něco hůře odpovídali studenti RSHU (92 % správných odpovědí). Nejhoršího výsledku dosáhli studenti VŠERS (80 % správných odpovědí). V této otázce bylo dosaženo druhých nejlepších výsledků. Domnívám se, že důvodem je to, že jde o všeobecně známou informaci.

Otázka č. 14 ověřovala, zda studenti vědí, jak se nazývá proces, kterým se odstraňují radioaktivní látky z povrchu těla. Správná odpověď byla dekontaminace. Nejlépe odpovědělo 98 % studentů ZSF JU, následováno 96 % studentů VŠERS a VŠTE. Nejhoršího výsledku dosáhlo 48 % studentů VŠERS.

Poslední otázka, v pořadí patnáctá, se týkala země, která se po havárii v jaderné elektrárně Fukušima zavázala, že postupně uzavře všechny své jaderné elektrárny. Správná odpověď byla Německo. Tuto možnost zvolilo 70 % studentů VŠTE, 60 % studentů ZSF JU, 38 % studentů VŠERS a 36 % studentů RSHU. Nejčastější chybnou odpovědí byla Francie. Domnívám se, že malý počet správných odpovědí byla zaviněna tím, že Francie i Německo byly v médiích spojovány se zavíráním jaderných elektráren.

5.2 Diskuse ke statistickému šetření

V první části statistického zpracování výsledků byly porovnány výsledky dotazníkového šetření studentů RSHU a studentů tří vysokých škol v Českých Budějovicích (ZSF JU, VŠERS a VŠTE). Bylo zjištěno, že aritmetický průměr znalostí studentů RSHU je 4,48 a aritmetický průměr studentů ZSF JU, VŠERS a VŠTE je 5,34. Z toho tedy vyplývá, že studenti vysokých škol v Českých Budějovicích mají vyšší znalosti než studenti RSHU. Stanovenou hypotézu „Studenti RSHU budou mít statisticky významně vyšší znalosti o haváriích na jaderných zařízeních než studenti vysokých škol v Českých Budějovicích“ je tedy možné zamítnout. Na základě provedení dvouvýběrového t-testu je možné naopak prohlásit, že studenti RSHU mají statisticky významně nižší znalosti než studenti ostatních vysokých škol v Českých Budějovicích.

V druhé části statistického zpracování výsledků byly porovnány výsledky dotazníkového šetření studentů ZSF JU a studentů ostatních vysokých škol v Českých Budějovicích (VŠERS a VŠTE). Bylo zjištěno, že aritmetický průměr znalostí studentů ZSF JU je 5,84 a aritmetický průměr studentů VŠERS a VŠTE je 5,18. I zde byla stanovena hypotéza: „Studenti ZSF JU budou mít statisticky významně vyšší znalosti o haváriích na jaderných zařízeních než studenti ostatních vysokých škol v Českých Budějovicích.“ Daná hypotéza byla ověřena pomocí metod deskriptivní a matematické statistiky. K testování byl zvolen dvouvýběrový t-test, jehož prostřednictvím byla stanovená hypotéza potvrzena. Je tudíž možné prohlásit, že studenti ZSF JU mají statisticky významně vyšší znalosti než studenti ostatních vysokých škol v Českých Budějovicích.

6 Závěr

Diplomová práce se zabývala tématem: „Porovnání informovanosti studentů vysokých škol o haváriích na jaderných zařízeních ve vybraných lokalitách“. V teoretické části byly shrnuty informace o ionizujícím záření, jaderných elektrárnách a jednotlivých jaderných haváriích seřazených podle stupnice INES.

Ve výzkumné části práce bylo vyhodnoceno dotazníkové šetření prostřednictvím základních metod deskriptivní a matematické statistiky. Cílem diplomové práce bylo posoudit a porovnat informovanost studentů třech vysokých škol v Českých Budějovicích (ZSF JU, VŠERS a VŠTE) a studentů RSHU v Petrohradě (Ruská federace). Pro splnění daného cíle byly stanoveny dvě hypotézy.

První hypotéza, která předpokládala, že studenti RSHU budou mít statisticky významně vyšší znalosti o haváriích na jaderných zařízeních než studenti vysokých škol v Českých Budějovicích, byla na základě výsledků dvouvýběrového t-testu vyvrácena. Naopak je možné konstatovat, že studenti RSHU mají statisticky významně nižší znalosti než studenti výše zmíněných vysokých škol v Českých Budějovicích.

Druhá hypotéza, která předpokládala, že studenti ZSF JU budou mít statisticky významně vyšší znalosti o haváriích na jaderných zařízeních než studenti ostatních vysokých škol v Českých Budějovicích, byla na základě výsledků dvouvýběrového t-testu potvrzena. Díky tomuto zjištění je možné konstatovat, že studenti ZSF JU mají statisticky významně vyšší znalosti o haváriích na jaderných zařízeních než studenti ostatních vysokých škol v Českých Budějovicích.

Na základě zjištěných výsledků lze tvrdit, že cíl, který si diplomová práce stanovila, byl splněn. Diplomová práce prokázala dobrou úroveň informovanosti studentů tří vysokých škol v Českých Budějovicích a studentů RSHU v Petrohradě o haváriích na jaderných zařízeních ve vybraných lokalitách.

7 Seznam literatury

40 Years After A Partial Nuclear Meltdown, A New Push To Keep Three Mile Island Open, 2019. *Npr.org* [online]. March 28, 2019 [cit. 2020-01-13]. Dostupné z: <https://www.npr.org/2019/03/28/707000226/40-years-after-a-partial-nuclear-meltdown-a-new-push-to-keep-three-mile-island-o?t=1578941668438>

AFEWORK, Bethel, Jordan HANANIA, Kailyn STENHOUSE a Jason DONEV, 2019. Nuclear power plant. *Energy education* [online]. [cit. 2019-09-24]. Dostupné z: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Nuclear_power_plant

AKLEYEV, Alexander, L Yu KRESTININA, M O DEGTEVA a E I TOLSTYKH, 2017. Consequences of the radiation accident at the Mayak production association in 1957. *Journal of Radiological Protection* [online]. 31 August 2017, **37**(3) [cit. 2020-02-27]. DOI: 10.1088/1361-6498/aa7f8d. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6498/aa7f8d/pdf>

AMON, Ada, 2003. Serious incident at Hungarian Paks-2 reactor. *Wise international* [online]. 25/04/2003 [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: <https://www.wiseinternational.org/nuclear-monitor/586/serious-incident-hungarian-paks-2-reactor>

ANSPAUGH, Lynn, Marina O DEGTEVA a Evgeny VASILENKO, 2002. *Mayak Production Association: Introduction* [online]. 9 March 2002 [cit. 2020-02-26]. DOI: 10.1007/s00411-002-0148-5. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/11358022_Mayak_Production_Association_Introduction

BABA, M., 2013. Fukushima accident: What happened? *Radiation Measurements* [online]. 3 April 2012, (55), 17-21 [cit. 2020-01-03].

BATORSHIN, G.Sh. a Y.G. Mokrov MOKROV, 2013. *EXPERIENCE IN ELIMINATING THE CONSEQUENCES OF THE 1957 ACCIDENT AT THE MAYAK PRODUCTION ASSOCIATION: International Experts' Meeting on Decommissioning and Remediation After a Nuclear Accident* [online]. [cit. 2020-02-27]. Dostupné z: <https://www-pub.iaea.org/iaeameetings/IEM4/Session2/Mokrov.pdf>

BERESFORD, N.a., S. FESENKO, A. KONOPLEV, L. SKUTERUD, J.t. SMITH a G. VOIGT, 2016. Thirty years after the Chernobyl accident: What lessons have we learnt? *Journal of Environmental Radioactivity* [online]. **157**, 77-89 [cit. 2019-10-23]. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.02.003. ISSN 0265931X.

BIEN DO, Xuan, 2019. Fukushima Nuclear Disaster displacement: How far people moved and determinants of evacuation destinations. *International Journal of Disaster Risk Reduction* [online]. February 2019, (33), 235-252 [cit. 2020-01-05]. DOI: 10.1016/j.ijdr.2018.10.009. ISSN 2212-4209. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212420918304163?via%3Dihub>

Biologické účinky ionizujícího záření, ©2000-2019. *Státní ústav radiacní ochrany* [online]. [cit. 2019-09-16]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/biologicke-ucinky-ionizujiciho-zareni>

BORYS, Christian, 2017. A vast new tomb for the most dangerous waste in the world. *BBC: Future* [online]. 3rd January 2017 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <https://www.bbc.com/future/article/20170101-a-new-tomb-for-the-most-dangerous-disaster-site-in-the-world>

COHEN-UNGER, Susan a EVRENSEL, Ayhan (eds.). *Ionizující záření: účinky a zdroje* [online]. Program OSN pro ochranu životního prostředí, 2016. ISBN 978-92-807-3600-7. [Cit. 24.4.2019]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/dokumenty/Radiation_Czech_27_Dec_2016_Web.pdf7

ČERNÁ, Tereza, 2017. *Informovanost obyvatelstva o jaderné havárii ve Fukušimě v Kraji Vysočina*. České Budějovice, 97 s. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zdravotně sociální fakulta, Ústav radiologie, toxikologie a ochrany obyvatelstva. Vedoucí práce Renata Havránková.

ČESKÁ NUKLEÁRNÍ SPOLEČNOST, b.r. Mezinárodní stupnice pro hodnocení jaderných událostí. *Svět energie* [online]. Česká nukleární společnost [cit. 2019-10-25]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/data/web/vzdelavaci-program-cez/tiskoviny/mezinarodni-stupnice-jadernych-udalosti.pdf>

ČESKÁ TELEVIZE, 2016. Co se dělo v Černobylu před 30 lety – havárie minutu po minutě. *ČT 24* [online]. 26.4.2016 [cit. 2019-11-06]. Dostupné z:

<https://ct24.ceskatelevize.cz/svet/1765772-co-se-delo-v-cernobyly-pred-30-lety-havarie-minutu-po-minute>

ČESKÁ TELEVIZE, 2017. 60 let od třetí největší jaderné havárie. Výbuch na Urale Sovětský svaz tajil. *ČT 24* [online]. 29. 9. 2017 [cit. 2020-01-22]. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/svet/2257033-60-let-od-treti-nejvetsi-jaderne-havarie-vybuch-na-urale-sovetsky-svaz-tajil?fbclid=IwAR3n9-l8zfRcEWdPosz-ETqi5X-2QCQDeQC-12zgIpkEYebV9QsrAE4G7w8>

DIENSTBIER, Zdeňek, 2010. *Hirošima a zrod atomového věku*. Praha: Mladá fronta. ISBN 978-80-204-2224-8.

DJUROVIĆ, Branka, Slavica RADJEN, Mirjana RADENKOVIĆ, Tamara DRAGOVIĆ, Željka TATOMIROVIĆ, Negovan IVANKOVIĆ, Djordje VUKMIROVIĆ a Sanja DUGONJIĆ, 2016. Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: What have we learned and what have we done? *Vojnosanitetski Pregled: Military Medical* [online]. **73**(5), 484-490 [cit. 2019-10-23]. DOI: 10.2298/VSP160317061D. ISSN 00428450.

FAKULTNÍ NEMOCNICE V MOTOLE, ©2012. Obecné informace o radioaktivitě a radiační ochraně. *Fakultní nemocnice v Motole* [online]. [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: <http://www.fnmotol.cz/kliniky-a-oddeleni/cast-pro-dospELE/klinika-nuklearni-mediciny-a-endokrinologie-uk-2-l/oddeleni-radiologicke-fyziky/obecne-informace-o-radioaktivite-a-radiacni-ochran/>

Fukushima Nuclear Power Station, Japan, ©2020. *Power Technology* [online]. [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://www.power-technology.com/projects/fukushima-daiichi/>

GORBACHEV, Mikhail, 2011. Chernobyl 25 years later: Many lessons learned. *Bulletin of the Atomic Scientists* [online]. **67**(2), 77-80 [cit. 2019-10-23]. DOI: 10.1177/0096340211399746. ISSN 00963402.

GREENPEACE, ©2014. Jaderné havárie. *Greenpeace* [online]. [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: https://www.greenpeace.org/archive-czech/cz/Kampan/klima_a_energetika/jaderna-energetika/jaderne-havarie/

HAVRÁNKOVÁ, Renata a kolektiv, 2020. *Klinická radiobiologie*. Grada. ISBN 978-80-247-4098-0.

HAVRÁNKOVÁ, Renata, Zuzana FREITINGER-SKALICKÁ, Jiří HAVRÁNEK, Friedo ZÖLZER a Pavel KUNA, 2018. *Základy radiobiologie*. České Budějovice. ISBN 978-80-7394-696-8.

IAEA, ©1998–2019. International Nuclear and Radiological Event Scale (INES). *International Atomic Energy Agency* [online]. [cit. 2019-10-25]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/resources/databases/international-nuclear-and-radiological-event-scale>

IAEA, 2020. Power Reactor Information system. *IAEA* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>

INES The International Nuclear and Radiological Event Scale: User's Manual, 2013. Austria.

KLIK, František a Jaroslav DALIBA, 1995. *Jaderná energetika*. Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-01-01280-8.

KRÁLOVÁ, Magda, b.r. Černobyl. *Techmania Science Centre: Eduportál* [online]. [cit. 2019-11-06]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/atomy-castice/jaderna-elektrarna/cernobyl>

KRÁLOVÁ, Magda, Radioaktivní veličiny a jednotky. *Techmania Science Centre: Eduportál* [online]. [cit. 2019-09-16]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/atomy-castice/detekce-ionizujiciho-zareni/radioaktivni-veliciny-jednotky>

KURUC, Josef, 2007. *Minulosť a súčasné trendy jadrovej chémie: Thirtieth anniversary of reactor accident in A-1 nuclear power plant Jaslovske Bohunice*. Bratislava: Omega, 413 s. ISBN 978-80-969290-9-2. Dostupné také z: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/38/059/38059373.pdf

LEATHERDALE, Duncan, 2014. Windscale Piles: Cockcroft's Follies avoided nuclear disaster. *BBC* [online]. 4 November 2014 [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: <https://www.bbc.com/news/uk-england-cumbria-29803990>

MCKAY, Tom, 2019. RIP Three Mile Island Nuclear Power Plant, 1974-2019. *Gizmodo* [online]. 5/09/19 [cit. 2020-01-13]. Dostupné z:

<https://earther.gizmodo.com/rip-three-mile-island-nuclear-power-plant-1974-2019-1834631030>

MEZINÁRODNÍ AGENTURA PRO ATOMOVOU ENERGIÍ, 1992. *INES: Mezinárodní agentura pro atomovou energii*. Vídeň. Dostupné také z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/BN02-1_ines.pdf

NĚMEC, Vít, 2015. *Jaderné katastrofy v počátcích atomového věku: 1946-1967*. Liberec. Dostupné také z: https://147.230.18.117/bitstream/handle/15240/58120/V_33415_Pb.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta přírodovědně-humanitní a pedagogická. Vedoucí práce Michal Ulvr.

New Safe Confinement, b.r. *The Chernobyl Gallery* [online]. [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: <http://www.chernobylgallery.com/chernobyl-disaster/new-safe-confinement/>

PÍSEK, Václav, 2015. Jaslovské Bohunice A1. *Atom info* [online]. 30.4.2015 [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2015/04/jaslovske-bohunice-a1/>

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

PRAŽÁK, Marek, 2016. *Znalosti obyvatelstva vybraného regionu o následcích havárie na jaderné elektrárně v Černobyli*. České Budějovice, 100 s. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zdravotně sociální fakulta, Ústav radiologie, toxikologie a ochrany obyvatelstva. Vedoucí práce Renata Havránková.

Publikace ICRP 103. 2009. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost. Publikace ICRP *Radiační ochrana: pro vybrané pracovníky*, 2019. Brno. Dostupné také z: https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/skoleni/skoldohprac/zoz_ro.pdf

REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA, ©2006-2020. *Jaderná fyzika. Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2020-09-16]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/796-jaderna-fyzika>

ROYIK, Tetyana, 2019. *Informovanost obyvatelstva Kraje Vysočina o havárii jaderné elektrárny Černobyl*. České Budějovice, 89 s. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v

Českých Budějovicích, Zdravotně sociální fakulta, Ústav radiologie, toxikologie a ochrany obyvatelstva. Vedoucí práce Renata Havránková.

Sarcophagus, b.r. *The Chernobyl Gallery* [online]. [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: <http://www.chernobylgallery.com/chernobyl-disaster/sarcophagus/>

SKUPINA ČEZ, ©2016. Jaderný energetický reaktor. *Svět energie: Vzdělávací portál ČEZ* [online]. [cit. 2019-10-18]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny-2/jaderne-elektrarny/jaderny-energeticky-reaktor>

SKUPINA ČEZ, ©2016. Typy reaktorů. *Svět energie* [online]. [cit. 2019-09-18]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/jaderne-elektrarny/typy-reaktoru>

SKUPINA ČEZ, ©2020. Historie a současnost EDU. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2019-09-24]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/edu/historie-a-soucasnost>

STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST, 1996. *10 let od havárie jaderného reaktoru v Černobylu - důsledky a poučení*. Praha. Dostupné také z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/10let_od_Cernobylu.pdf

STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST, 2008. Stupnice INES. *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. [cit. 2019-10-25]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/ines/stupnice-ines/>

STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST, 2015. *Zpráva o výsledcích činnosti SÚJB při výkonu státního dozoru na jadernou bezpečnost jaderných zařízení a radiační ochranou za rok 2015: Část I*. Dostupné také z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/zpravy/vyrocní_zpravy/ceske/VZ_SUJB_2015_FIN_cast_I.pdf

STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST, 2018. *Zpráva o výsledcích činnosti státního úřadu pro jadernou bezpečnost a o monitorování radiační situace na území České republiky za rok 2018: Část I*. Dostupné také z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/zpravy/vyrocní_zpravy/ceske/2018/cast_I.pdf

STRICKLAND, Eliza, 2011. 24 Hours at Fukushima: A blow-by-blow account of the worst nuclear accident since Chernobyl. *IEEE Spectrum* [online]. 31 Oct 2011 [cit. 2020-01-10]. Dostupné z: <https://spectrum.ieee.org/energy/nuclear/24-hours-at-fukushima>

SÚKOPOVÁ, Lucie, 2012. Deterministické a stochastické účinky ozáření. *Lucie Súkopová* [online]. 20.8.2012 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <http://www.sukupova.cz/deterministicke-a-stochasticke-ucinky-ozareni/>

SUZUKI, Tatsujiro, 2019. An update from Fukushima, and the challenges that remain there. *Bulletin of the Atomic Scientists* [online]. November 11, 2019 [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://thebulletin.org/2019/11/an-update-from-fukushima-and-the-challenges-that-remain-there/>

ŠVEC, Jiří, 2005. *Radioaktivita a ionizující záření: Doplnující učební text pro předměty Bakalářská fyzika, Aplikovaná fyzika, Ochrana před zářením*. Ostrava. ISBN 80-86634-62-0.

The Chernobyl disaster, b.r. *BBC News* [online]. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <http://news.bbc.co.uk/2/shared/spl/hi/guides/456900/456957/html/nn3page1.stm>

The world's worst nuclear power disasters, 2013. *Power Technology* [online]. 6 October 2013 [cit. 2019-11-05]. Dostupné z: <https://www.power-technology.com/features/feature-world-worst-nuclear-power-disasters-chernobyl/>

Tokaimura Nuclear Accident, Japan, 2018. *Nuclear Energy* [online]. [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://nuclear-energy.net/nuclear-accidents/tokaimura.html>

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

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2001. Three Mile Island Accident. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/three-mile-island-accident.aspx>

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2018. Fukushima Daiichi Accident. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/fukushima-accident.aspx>

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2019. Chernobyl Accident 1986. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2019-11-11]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/1986-1987-accident.aspx>

nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/chernobyl-accident.aspx

Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon, 2016. Částka 102, s. 3938-4060. ISSN 1211–1244.

ZÁŠKODNÝ, Přemysl a kol., 2016. *Základy statistiky: (s aplikací na zdravotnictví)*. Praha. ISBN 978-80-904948-2-4.

8 Seznam zkratk

AGR	Advanced Gas Reactor
ANO	Akutní nemoc z ozáření
BWR	Boiling Water Reactor
CANDU	Canadian Deuterium Uranium
CBRNE	Chemické, biologické, radiologické a jaderné noxy a výbušniny
EURT	Východouralská radiační stopa
GCR	Gas Cooled Reactor
HNJ	Hromadný náhodný jev
HSZ	Hodnoty statistického znaku
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
INES	The International Nuclear Event Scale
NV	Náhodný výběr
OECD/NEA	Organisation for Economic Co-operation and Development/The Nuclear Energy Agency
PWR	Pressurized light-Water moderated and cooled Reactor
RBMK	Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanalnyj
RSHU	Russian State Hydrometeorological University
SJ	Statistická jednotka
SSSR	Sovětský svaz socialistických republik
SZ	Statistický znak
TEPCO	Tokyo Electric Power Company

USA	Spojené státy americké
VSS	Výběrový statistický soubor a jeho rozsah
VŠERS	Vysoká škola evropských a regionálních studií
VŠTE	Vysoká škola technická a ekonomická
VVER	Vodo – Vodjanoj Energetičeskij Reaktor
ZSF JU	Zdravotně sociální fakulta Jihočeské univerzity
ZSS	Základní statistický soubor a jeho rozsah

9 Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma jaderné elektrárny Temelín.....	16
Obrázek 2: Stupnice INES	21
Obrázek 3: Fotografie poničeného reaktoru	26
Obrázek 4: Rozšíření radiace napříč Evropou	28
Obrázek 5: Stavba nového sarkofágu	29
Obrázek 6: Zaplavení elektrárny vlnou tsunami.....	31
Obrázek 7: Škody na elektrárně Fukušima I.....	34
Obrázek 8: Schéma rozložení nádrží	37
Obrázek 9: Mapa východouralské stopy.....	38
Obrázek 10: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 2 v závislosti na vysokých školách	52
Obrázek 11: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 3 v závislosti na vysokých školách	53
Obrázek 12: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 4 v závislosti na vysokých školách	54
Obrázek 13: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 5 v závislosti na vysokých školách	55
Obrázek 14: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 6 v závislosti na vysokých školách	56
Obrázek 15: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 7 v závislosti na vysokých školách	57
Obrázek 16: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 8 v závislosti na vysokých školách	58
Obrázek 17: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 9 v závislosti na vysokých školách	59
Obrázek 18: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 10 v závislosti na vysokých školách	60
Obrázek 19: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 11 v závislosti na vysokých školách	61
Obrázek 20: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 12 v závislosti na vysokých školách	62

Obrázek 21: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 13 v závislosti na vysokých školách	63
Obrázek 22: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 14 v závislosti na vysokých školách	64
Obrázek 23: Početní zastoupení správných a chybných odpovědí na otázku č. 15 v závislosti na vysokých školách	65
Obrázek 24: Empirické rozdělení absolutních četností – studenti RSHU	68
Obrázek 25: Empirické rozdělení relativních četností – studenti RSHU	68
Obrázek 26: Empirické rozdělení kumulativních četností – studenti RSHU	69
Obrázek 27: Empirické rozdělení absolutních četností – studenti vysokých škol v ČB	70
Obrázek 28: Empirické rozdělení relativních četností – studenti vysokých škol v ČB..	70
Obrázek 29: Empirické rozdělení kumulativních četností – studenti vysokých škol v ČB	71
Obrázek 30: Empirické rozdělení absolutních četností – studenti ZSF JU	75
Obrázek 31: Empirické rozdělení relativních četností – studenti ZSF JU.....	75
Obrázek 32: Empirické rozdělení kumulativních četností – studenti ZSF JU.....	76
Obrázek 33: Empirické rozdělení absolutních četností – studenti VŠERS a VŠTE	77
Obrázek 34: Empirické rozdělení relativních četností – studenti VŠERS a VŠTE.....	77
Obrázek 35: Empirické rozdělení kumulativních četností – studenti VŠERS a VŠTE..	78

10 Seznam tabulek

Tabulka 1: Statistické zpracování výsledků studentů RSHU a studentů vysokých škol v ČB	66
Tabulka 2: Škálování výsledků měření studentů RSHU a studentů vysokých škol v ČB	67
Tabulka 3: Výsledky měření – studenti RSHU	67
Tabulka 4: Výsledky měření – studenti vysokých škol v Českých Budějovicích	69
Tabulka 5: Vypočítané empirické parametry – studenti RSHU a studenti vysokých škol v Českých Budějovicích	71
Tabulka 6: Empirické parametry výběrových souborů pro parametrické testování	72
Tabulka 7: Statistické zpracování výsledků studentů ZSF JU a studentů VŠERS a VŠTE	73
Tabulka 8: Škálování výsledků měření studentů ZSF JU a studentů VŠERS a VŠTE ..	74
Tabulka 9: Výsledky měření – studenti ZSF JU	74
Tabulka 10: Výsledky měření – studenti VŠERS a VŠTE	76
Tabulka 11: Vypočítané empirické parametry – studenti ZSF JU a studenti VŠERS a VŠTE	78
Tabulka 12: Empirické parametry výběrových souborů pro parametrické testování	79

11 Seznam příloh

Příloha A – dotazník

Přílohy

Příloha A

Dotazník

Dobrý den, jsem studentka 2. ročníku oboru Civilní nouzová připravenost na Zdravotně sociální fakultě Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích. Píši diplomovou práci s názvem: Porovnání informovanosti studentů vysokých škol o haváriích na jaderných zařízeních ve vybraných lokalitách. Chtěla bych Vás poprosit o vyplnění tohoto dotazníku. Tento dotazník je anonymní, data a informace, které jsou v něm obsaženy budou použity pouze v této diplomové práci. Vyplnění tohoto dotazníku je dobrovolné a zabere Vám nanejvýše 5 minut Vašeho času. (Jen jedna odpověď je vždy správná.)

1. Na kterou vysokou školu chodíte?

- ZSF JU
- VŠERS
- RSHU
- VŠTE

2. Který izotop je běžně používán ke štěpení v jaderných reaktorech?

- ^{137}Cs
- ^{206}Pb
- ^{235}U
- ^{58}Fe

3. Který radionuklid je nejvýznamnější z hlediska dlouhodobé kontaminace životního prostředí?

- Jód (^{131}I)
- Cesium (^{137}Cs)
- Stroncium (^{90}Sr)
- Kobalt (^{60}Co)

4. Kterým způsobem se chráníme proti akumulaci radioaktivního jódu ve štítné žláze?

- Sníme dostatek špenátu
- Spolkneme jodidové tablety
- Ukryjeme se v budově
- Spolkneme kalciové tablety

- 5. Jaká byla příčina havárie jaderné elektrárny Černobyl?**
- Přírodní katastrofa
 - Nezdařený test
 - Sabotáž
 - Nevhodný typ paliva
- 6. Ve kterém roce se stala jaderná havárie v Černobylu?**
- 1983
 - 1986
 - 1987
 - 1985
- 7. Ve které zemi se nachází jaderná elektrárna Černobyl?**
- Bělorusko
 - Rusko
 - Ukrajina
 - Polsko
- 8. Která země byla nejvíce zasažena radioaktivním spadem po havárii v Černobylu?**
- Bělorusko
 - Ukrajina
 - Nynější Rusko
 - Polsko
- 9. Ve kterém státě střední Evropy došlo v roce 2003 k havárii na jaderné elektrárně?**
- Německo
 - Polsko
 - Maďarsko
 - Rakousko
- 10. Ve kterém státě se nachází jaderná elektrárna Jaslovské Bohunice?**
- Polsko
 - Slovensko
 - Maďarsko
 - Česká republika
- 11. Ve které zemi došlo k druhé největší jaderné havárii v moderní historii?**
- USA

- Japonsko
- Rusko
- Čína

12. Čím byly ohroženy zasahující jednotky hasičů a ostatní pracovníci jaderné elektrárny Černobyl při likvidaci následků jaderné havárie?

- Unikající párou
- Akutní nemocí ze stresu
- Akutní nemocí z ozáření
- Plameny z požáru

13. Které znáte druhy ionizujícího záření?

- Alfa, beta, gama, RTG
- Silné, střední, slabé
- Delta, epsilon, fi
- Přerušované, souvislé

14. Jak se nazývá proces, kterým se odstraňují radioaktivní látky z povrchu těla?

- Determinace
- Dekontaminace
- Detonace
- Delokalizace

15. Která z níže vypsanych zemí, se po havárii v jaderné elektrárně Fukušima zavázala, že postupně uzavře všechny své jaderné elektrárny?

- Francie
- Německo
- Česká republika
- Španělsko