

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
ÚSTAV JADROVÉHO A FYZIKÁLNEHO INŽINIERSTVA**

Ing. Martin Hornáček

Autoreferát dizertačnej práce

**METODIKA HODNOTENIA VYRAĐOVANIA VEĽKÝCH KOMPONENTOV
JADROVÝCH ELEKTRÁRNÍ Z PREVÁDZKY**

na získanie akademického titulu philosophiae doctor

v doktorandskom študijnom programe:

5.2.31 Jadrová energetika

Bratislava, júl 2016

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave jadrového a fyzikálneho inžinierstva, Fakulta elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave

Predkladateľ:

Ing. Martin Hornáček

Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva,
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ:

prof. Ing. Vladimír Nečas, PhD.

Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva,
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti:

RNDr. Peter Gerhart, PhD.

Jadrová a vyrad'ovacia spoločnosť, a.s.,
Tomášikova 22, 821 02 Bratislava

doc. RNDr. Karol Holý, CSc.

Univerzita Komenského v Bratislave,
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky,
Katedra jadrovej fyziky a biofyziky,
Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný:

**Obhajoba dizertačnej práce sa koná 19.8.2016 o 11:00 h
na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19,
Bratislava v zasadačke ÚJFI, blok A, 6. poschodie, miestnosť 616.**

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec

dekan fakulty

Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Obsah

Úvod.....	4
1 Súčasný stav problematiky	4
2 Ciele dizertačnej práce	6
3 Zvolená metóda spracovania.....	7
3.1 Vstupné údaje.....	7
3.2 Problematika správnosti vstupných údajov	10
3.3 Metodika hodnotenia radiačných vplyvov.....	11
3.3.1 Výpočet vonkajšieho ožiarenia.....	11
3.3.2 Výpočet vnútorného ožiarenia	12
3.3.3 Použité výpočtové prostriedky	14
3.4 Scenáre demontáže.....	14
3.4.1 Vstupné predpoklady pre scenáre demontáže	14
3.4.2 Modifikácie scenárov demontáže	15
3.5 Manažment materiálov z demontáže parogenerátora.....	16
3.5.1 Scenáre manažmentu materiálov	16
3.5.2 Činnosti spracovania a úpravy RAO.....	17
4 Výsledky dizertačnej práce s uvedením nových poznatkov	19
4.1 Ožiarenie pri činnostiach súvisiacich s demontážou PG.....	19
4.1.1 Vonkajšie ožiarenie.....	19
4.1.2 Vnútorné ožiarenie	20
4.1.3 Hodnotenie vplyvov na obyvateľstvo a ŽP.....	20
4.2 Ožiarenie pri činnostiach manažmentu RAO	21
4.2.1 Vonkajšie ožiarenie pri činnostiach spracovania a úpravy RAO	21
4.2.2 Vonkajšie ožiarenie pri činnostiach ukladania RAO.....	21
4.3 Celkové zhodnotenie ožiarenia.....	24
4.4 Ekonomické zhodnotenie procesu demontáže PG.....	24
5 Súhrn výsledkov, nových poznatkov, závery pre prax a rozvoj vednej	
disciplíny.....	25
Použitá literatúra	27
Publikované práce doktoranda	31

Úvod

Jadrové elektrárne predstavujú zložitý systém hierarchicky usporiadaných technologických častí a systémov. Demontáž takéhoto komplexu je preto značne náročná. Špecifickou vlastnosťou jadrových elektrární je navyše prítomnosť takých technologických zariadení a systémov, ktorých úroveň aktivity je v dôsledku aktivácie neutrónmi alebo kontaminácie zvýšená oproti úrovni pozadia o niekoľko rádov. Tento fakt v mnohých prípadoch vylučuje možnosť priamej demontáže, resp. ju výrazne limituje. To má za následok nevyhnutnú potrebu vývoja, testovania a implementácie takých metód a technológií, ktoré minimalizujú riziko nepriaznivých účinkov ionizujúceho žiarenia na pracovníkov, obyvateľstvo a životné prostredie.

Zvláštnu skupinu inventáru energetických zariadení predstavujú tzv. veľké komponenty, t.j. také, ktorých demontáž si z dôvodu ich veľkej hmotnosti a rozmerov vyžaduje aplikáciu špeciálnych postupov. Pre jadrové elektrárne je charakteristická prítomnosť veľkých komponentov, ktoré boli v bezprostrednom okolí aktívnej zóny reaktora (tlaková nádoba reaktora a vnútroreaktorové časti – kôš aktívnej zóny, šachta reaktora, dno šachty reaktora, blok ochranných rúr) alebo boli v kontakte s médiom primárneho okruhu (potrubie primárneho okruhu, kompenzátor objemu, parogenerátory). Demontáž týchto komponentov je značne náročná a vyžaduje si dôsledné plánovanie, ktorému predchádza voľba optimálnej stratégie demontáže.

Všeobecne možno realizovať dve stratégie demontáže veľkých komponentov – buď ich fragmentáciu na mieste (s následným umiestnením do transportných kontajnerov alebo obalových súborov) alebo ich demontáž ako jeden kus s následným transportom do špeciálneho skladu, resp. do príslušného úložného systému. Rozhodnutie o danej stratégii je determinované množstvom faktorov, ktoré sú závislé od lokálnych pomerov v rámci jadrovej elektrárne ako aj príslušného štátu.

Problematika demontáže veľkých komponentov predstavuje jednu z najnáročnejších etáp procesu vyradovania jadrových elektrární z prevádzky. Zároveň je však nutnou podmienkou na úspešné splnenie stanovených cieľov a dosiahnutie požadovaného koncového stavu vyradovanej jadrovej elektrárne.

1 Súčasný stav problematiky

Vyradovanie jadrových zariadení (JZ) z prevádzky predstavuje záverečnú časť ich životného cyklu, začínajúceho projektovaním a výberom lokality, výstavbou, uvedením do prevádzky a samotnou prevádzkou JZ [1]. V podmienkach slovenskej legislatívy je vyradovanie definované ako činnosti vykonávané po ukončení prevádzky JZ, ktorých cieľom je uvoľnenie jadrového zariadenia spod radiačnej kontroly (spod kontroly dozorných úradov) – §2, písm. s) zákona č. 541/2004 Z. z. (Atómový zákon) [2]. Medzinárodná agentúra pre atómovú energiu (MAAE) definuje vyradovanie ako súbor administratívnych a technologických činností, ktoré vedú k vyňatiu JZ (alebo jeho časti) spod radiačnej kontroly dozorného orgánu [3]. Uvedená definícia podľa MAAE sa však netýka úložísk, ktoré sa nevyradujú, ale uzatvárajú, predmetom práce sú však výlučne JZ slúžiace na výrobu elektrickej energie.

Nevyhnutnou podmienkou na úspešné vyradenie JZ z prevádzky je dôkladná príprava procesu vyradovania, a to v dostatočnom časovom predstihu, aby sa proces vyradenia

JZ zrealizoval optimálnym spôsobom, s minimalizovanými nákladmi a s minimálnym vplyvom na pracovníkov a ŽP [4].

Je zrejmé, že neoddeliteľnou súčasťou procesu vyradovania jadrových elektrární (JE) z prevádzky sú demontážne činnosti. Zvláštnu skupinu zariadení určených na demontáž tvoria tie, ktorých geometrické rozmery a hmotnosť sú výrazne väčšie než pri ostatných demontovaných zariadeniach. Zároveň prítomnosť zvýšenej úrovne aktivity značne komplikuje proces ich demontáže. Ide predovšetkým o zariadenia primárneho okruhu ako tlaková nádoba reaktora a vnútroreaktorové časti (kôš aktívnej zóny, šachta reaktora, dno šachty reaktora, blok ochranných rúr), kde je dominantným zdrojom ich aktivity aktivácia neutrónmi, ako aj zariadenia, ktorých povrchy boli kontaminované v dôsledku styku s chladivom primárneho okruhu (kompenzátor objemu, parogenerátory).

Základným dokumentom charakterizujúcim proces demontáže veľkých komponentov je dokument OECD z roku 2012 [5]. Všeobecne je tu veľký komponent definovaný ako akákoľvek časť JZ, ktorú možno odstrániť bez rozrezania na menšie časti, je skladovaná, resp. uložená v neštandardnom obalovom súbore a ktorá si vyžaduje osobitné opatrenia príslušného dozorného orgánu z dôvodu svojej hmotnosti, objemu alebo kontaminácie rádionuklidmi. Inak povedané, pri plánovaní a realizácii transportu, skladovania alebo ukladania veľkého komponentu je nevyhnutné modifikovať štandardné postupy [5]. Je zrejmé, že uvedená definícia zahŕňa pomerne široké spektrum komponentov JZ (napr. aj rôzne skladovacie nádrže, plynojemy), spravidla sú však za veľké komponenty (v rámci procesu vyradovania JE z prevádzky) považované tie, ktoré boli vymenované na začiatku kapitoly.

Proces nakladania s veľkými komponentmi možno rozdeliť do nasledujúcich etáp [5]:

- Demontáž
- Transport
- Spracovanie, úprava a skladovanie odpadov (primárnych a sekundárnych)
- Uloženie do úložiska.

Je zrejmé, že proces výberu vhodnej stratégie demontáže veľkých komponentov je značne zložitý, a to vzhľadom na fakt, že je potrebná podrobná znalosť miestnych pomerov a je nevyhnutné vziať do úvahy široké spektrum rôznych faktorov.

Všeobecne možno demontáž veľkých komponentov realizovať 2 spôsobmi:

- Demontáž ako 1 kus (angl. „one-piece removal“),
- Fragmentácia na menšie časti.

Podrobnejšie možno spôsoby demontáže veľkých komponentov rozdeliť nasledovne [6]:

- **Fragmentácia na mieste, skladovanie a uloženie v úložisku** (angl. „cut and dispose“),
- **Demontáž ako 1 kus a transport do spracovateľského centra** (angl. „pack and go“),
- **Demontáž ako 1 kus a skladovanie** (angl. „pack and wait“),
- **Demontáž ako 1 kus a uloženie v úložisku** (angl. „pack and dispose“).

Podľa [7] je v súčasnosti v štádiu vyradovania 40 tlakovodných reaktorov o výkone 150 MW a vyššom (vrátane havarovaného 2. bloku JE Three Mile Island).

V súčasnosti existujú **praktické skúsenosti** z demontáže a fragmentácie PG, ktoré možno zhrnúť nasledovne:

- **Nemecká JE Gundremmingen** (3 sekundárne PG) [8],
- **Nemecká JE Greifswald**, ktorej PG boli demontované ako 1 kus a sú skladované. Demontáž niektorých PG síce bola uskutočnená, avšak išlo len o nízko kontaminované zariadenia [9], [10].
- **Španielska JE José Cabrera** [11],
- **Americká JE Rancho Seco** [12].

Zároveň bolo vykonaných viacero **podrobných analýz** týkajúcich sa stanovenia ožiarenia počas demontáže kontaminovaných zariadení:

- **Talianska JE Enrico Fermi** (analýza zameraná na stanovenie vnútorného ožiarenia počas rezania častí PG, potrubí a kompenzátora objemu) [13].
- **Litovská JE Ignalina** (analýzy týkajúce sa výpočtu vonkajšieho a vnútorného ožiarenia počas rezania rôznych technologických zariadení) [14]-[16].

Napriek pomerne značnému množstvu dokumentov možno identifikovať nasledovné problémy:

- Niektoré dokumenty poskytujú výlučne informácie všeobecného charakteru.
- Skúsenosti a analýzy sa týkajú komponentov odlišného typu (napr. PG vertikálnej konštrukcie alebo iné špecifické zariadenia).

Je teda zrejmé, že v prípade horizontálnych PG nie je možné informácie, poskytované uvedenými dokumentmi, aplikovať v dostatočnej miere.

2 Ciele dizertačnej práce

Cieľom dizertačnej práce je prispieť k riešeniu problematiky demontáže veľkých komponentov v procese vyradovania jadrových elektrární z prevádzky, a to vytvorením a zhodnotením metodiky demontáže pre parogenerátory JE s reaktorom typu VVER 440. S prihliadnutím na vykonanú analýzu súčasného stavu problematiky sa v dizertačnej práci predpokladá splnenie nasledovných cieľov:

1. Analýza procesu vyradovania jadrových elektrární z prevádzky s dôrazom na problematiku demontáže veľkých komponentov.
2. Návrh a vypracovanie scenárov demontáže parogenerátora použitého v JE s reaktorom typu VVER 440.
3. Vytvorenie metodiky hodnotenia radiačných vplyvov procesu demontáže parogenerátora.
4. Komplexné posúdenie procesu demontáže z pohľadu dávkového zaťaženia pracovníkov pre jednotlivé scenáre demontáže a manažment vznikajúcich rádioaktívnych odpadov.
5. Stanovenie vplyvov činností procesu demontáže parogenerátora na obyvateľstvo a životné prostredie.
6. Zhodnotenie scenárov manažmentu rádioaktívnych odpadov z pohľadu koncového stavu materiálov a ekonomického hľadiska.

3 Zvolená metóda spracovania

Predkladaná dizertačná práca komplexne hodnotí vyradovanie parogenerátora použitého v JE s reaktorom typu VVER 440, a to nielen z pohľadu samotného procesu demontáže, ale aj z pohľadu manažmentu vznikajúcich rádioaktívnych odpadov (RAO), vplyvov na obyvateľstvo a ŽP ako aj z ekonomického hľadiska.

Vytvorenie metodiky hodnotenia vyradovania predmetného komponentu si vyžaduje analýzu množstva faktorov a využitie špecializovaných výpočtových prostriedkov. V nasledujúcich podkapitolách sú charakterizované jednotlivé aspekty a kroky, ktoré vo svojej následnosti tvoria metodiku v súlade so stanovenými cieľmi dizertačnej práce.

3.1 Vstupné údaje

Prvým krokom pri tvorbe metodiky je identifikácia vstupných údajov potrebných na jej realizáciu. V rámci predmetu dizertačnej práce sú tieto údaje nasledovné:

- Charakteristika parogenerátora z pohľadu geometrických rozmerov a materiálového zloženia.
- Údaje týkajúce sa inventáru aktivity a nuklidového zloženia jednotlivých častí PG – tzv. zdrojový člen.
- Údaje týkajúce sa zvolenej, resp. navrhovanej stratégie, ako sú miestne pomery, počet pracovníkov, ich vzdialenosti od jednotlivých zdrojov žiarenia, dĺžka trvania jednotlivých činností.
- Údaje týkajúce sa manažmentu vznikajúcich RAO (spracovanie, úprava, transport, skladovanie, resp. ukladanie)
- Údaje potrebné pre výpočet vnútorného ožiarenia.
- Údaje potrebné pre zhodnotenie vplyvov na obyvateľstvo a ŽP.
- Ostatné údaje, predovšetkým limity (pre lisovanie, pre ukladanie do príslušného úložného systému či pre uvoľnenie do ŽP).
- Údaje potrebné pre zhodnotenie procesu demontáže a ukladania RAO z ekonomického hľadiska (napr. hodinové sadzby pracovníkov).

Charakteristika parogenerátora

Predmetný komponent je súčasťou primárneho okruhu JE a zabezpečuje prenos tepla z chladiva primárneho okruhu na vodu sekundárneho okruhu, pričom dochádza k tvorbe pary. Z pohľadu predmetu dizertačnej práce hodnotiacej radiačné vplyvy je parogenerátor (PG) tvorený nasledovnými časťami:

- Plášť parogenerátora – celková dĺžka 12,88 m, stredná hrúbka steny 8,52 cm, vonkajší priemer 3,38 m, celková hmotnosť 113,4 t.
 - 2 kolektory – výška 4,21 m, vonkajší priemer 0,97 m, stredná hrúbka steny 13,86 cm, každý o hmotnosti 12,7 t.
 - Teplovýmenné rúrky – 5536 kusov [17], dĺžka 9,69 m, celková hmotnosť 34,7 t.
- Uvažovaná celková hmotnosť parogenerátora je 173 t.

Vzhľadom na históriu prevádzky JE V1, počas ktorej bola miera netesnosti teplovýmenných rúrok PG zanedbateľná, sú za kontaminované časti považované teplovýmenné rúrky a kolektory.

Údaje boli prevzaté z dostupnej technickej dokumentácie (výkresy).

Z hľadiska materiálových vlastností je plášť PG z uhlíkovej ocele 22K; materiál kolektorov a teplovýmenných rúrok je austenitická vysokolegovaná oceľ s 0,08% uhlíka, 18% chrómu, 10% niklu a menej než 1% titánu [17].

Zdrojový člen

Zdrojový člen je reprezentovaný kontamináciou vnútorných povrchov teplovýmenných rúrok a kolektorov aktivovanými koróznymi produktmi. Z kvalitatívneho hľadiska ide o 29 rádionuklidov, ktoré boli získané v rámci rádiologickej charakterizácie pre 1. a 2. blok JE V1. V Tab. 3.1 sú podiely jednotlivých nuklidov získané ako priemerná hodnota podielu pre obidva bloky.

Vzhľadom na plánovanú dobu realizácie 2. etapy vyradovania JE V1 (2015 – 2025) [18], boli podiely jednotlivých rádionuklidov stanovené pre roky 2015, 2020 a 2025.

Z tabuľky je zrejmé, že najväčší podiel majú aktivačné produkty, prítomnosť štiepných produktov je výrazne limitovaná.

Kvantitatívne hľadisko je reprezentované aktivitou teplovýmenných rúrok a kolektorov a je uvedené v

Tab. 3.2. Uvedené údaje predstavujú odhadované hodnoty pre výpočet parametrov vyradovania.

Stratégia demontáže

Z dokumentu [18] je zrejmé, že v prípade tzv. veľkých komponentov (a teda aj PG) sa bude aplikovať stratégia demontáže na mieste s následným spracovaním, úpravou a skladovaním, resp. uložením vznikajúcich RAO. Samotná demontáž tak môže prebiehať:

- **Priamo v boxe PG** (po tom, čo sa pôvodný PG z boxu vytiahne a na jeho mieste sa vytvorí rezacie pracovisko, do ktorého sa budú postupne presúvať všetky zvyšné PG) – diaľková demontáž.
- **Mimo boxu PG** – tzv. ručná demontáž.

Postup demontáže závisí od množstva faktorov, pričom je vhodné vziať do úvahy aj skúsenosti z iných projektov vyradovania. V prípade JE Greifswald boli analyzované 2 postupy demontáže PG [9], [10], [19]:

- **Pozdĺžne rezanie**
- **Priečne rezanie.**

Kombináciou uvedených faktorov je možné vytvoriť scenáre demontáže.

Tab. 3.1 Uvažovaný nuklidový vektor pre PG JE V1

Nuklid	T _{1/2} [roky]	Relatívny podiel		
		Rok		
		2015	2020	2025
¹⁴ C	5,73E+03	5,19E-05	8,62E-05	1,14E-04
⁴¹ Ca	1,03E+05	1,99E-03	3,30E-03	4,37E-03
⁵⁴ Mn	8,55E-01	1,26E-03	3,62E-05	8,31E-07
⁵⁵ Fe	2,73E+00	3,76E-01	1,75E-01	6,53E-02
⁵⁷ Co	7,45E-01	9,21E-06	1,46E-07	1,84E-09
⁵⁹ Ni	7,60E+04	4,46E-03	7,42E-03	9,82E-03
⁶⁰ Co	5,27E+00	2,33E-01	2,00E-01	1,37E-01
⁶³ Ni	1,00E+02	3,44E-01	5,52E-01	7,06E-01
⁶⁵ Zn	6,68E-01	2,19E-05	2,04E-07	1,51E-09
⁷⁹ Se	6,50E+04	8,52E-04	1,42E-03	1,87E-03
⁹⁰ Sr	2,87E+01	1,69E-03	2,50E-03	2,93E-03
⁹³ Mo	3,50E+03	1,33E-02	2,21E-02	2,93E-02
⁹³ Zr	1,50E+06	1,28E-03	2,12E-03	2,81E-03
⁹⁴ Nb	2,03E+04	1,61E-03	2,68E-03	3,54E-03
¹⁰⁷ Pd	6,50E+06	1,42E-03	2,36E-03	3,13E-03
^{110m} Ag	6,82E-01	1,93E-04	2,00E-06	1,65E-08
¹²⁵ Sb	2,76E+00	1,15E-03	5,44E-04	2,05E-04
¹²⁶ Sn	1,00E+05	1,56E-03	2,60E-03	3,44E-03
¹²⁹ I	1,60E+07	4,27E-05	7,10E-05	9,39E-05
¹³⁵ Cs	2,30E+06	3,55E-03	5,90E-03	7,81E-03
¹³⁷ Cs	3,02E+01	1,51E-03	2,24E-03	2,65E-03
¹⁴⁴ Ce	7,81E-01	7,54E-05	1,48E-06	2,32E-08
¹⁵¹ Sm	9,00E+01	5,29E-03	8,47E-03	1,08E-02
²³⁸ Pu	8,77E+01	3,44E-05	5,49E-05	6,99E-05
²³⁹ Pu	2,41E+04	2,65E-05	4,41E-05	5,84E-05
²⁴⁰ Pu	6,56E+03	2,65E-05	4,41E-05	5,83E-05
²⁴¹ Pu	1,44E+01	6,25E-03	8,17E-03	8,50E-03
²⁴¹ Am	4,32E+02	1,23E-04	2,02E-04	2,65E-04
²⁴⁴ Cm	1,81E+01	3,24E-05	4,45E-05	4,86E-05

Tab. 3.2 Uvažované aktivity kontaminovaných častí PG (všetkých nuklidov)

Komponent	Aktivita [Bq]		
	Rok		
	2015	2020	2025
Teplovýmenné rúrky	7,40E+11	4,45E+11	3,37E+11
1 kolektor	7,20E+08	4,33E+08	3,27E+08
Spolu	7,41E+11	4,46E+11	3,38E+11

3.2 Problematika správnosti vstupných údajov

Správnosť (presnosť) vstupných údajov má značný vplyv na relevantnosť výsledkov jednotlivých analýz. Z kap. 3.1 je zrejmé, že viacero vstupných parametrov je odhadovaných, t.j. iba približných. Celkovo možno identifikovať nasledovné problémy týkajúce sa presnosti:

- **Odhad zdrojového člena** – údaje o aktivite jednotlivých častí sú približné. Nuklidový vektor (Tab. 3.1) je v rámci rádiologickej charakterizácie rovnaký pre všetky zariadenia primárneho okruhu (s výnimkou TNR a vnútroreaktorových častí). Tento predpoklad úplne nekorešponduje s reálnou situáciou, keďže miera a charakter kontaminácie závisí jednak od fyzikálno-chemických vlastností materiálov a nuklidov (napr. príľnavosť a rozpustnosť) ako aj od geometrických vlastností (napr. kolená, zúženia prierezu potrubí a pod. [20]). Všeobecne preto miera kontaminácie teplovýmenných rúrok a kolektorov PG ako aj nuklidové zloženie môžu byť rôzne, a to tak v porovnaní s celým primárnym okruhom, ako aj v porovnaní s ostatnými PG. Taktiež jednotlivé časti PG nemusia byť rovnomerne kontaminované.
- **Parametre pracovnej skupiny** vykonávajúcej jednotlivé činnosti. Ide predovšetkým o počet pracovníkov, charakter ich práce (napr. demontážne činnosti, dozimetrické merania a pod.), ich vzdialenosť od kontaminovaných častí a dĺžka trvania ich práce (prácnosť).
- **Množstvo, druh a inventár aktivity sekundárnych RAO z dekontaminácie** pri analýze činností manažmentu RAO. Tieto hodnoty sa výrazne líšia prípad od prípadu a od komponentu (napr. nie je správne predpokladať, že celkové množstvo sekundárnych RAO z dekontaminácie primárneho okruhu je proporcionálne rozdelené medzi jednotlivé technologické zariadenia) [21], [22]. Navyše údaje získané z realizovaných projektov dekontaminácie (napr. objemy použitých dekontaminačných roztokov, hmotnosť odstránenej tuhej zložky) sú často obchodným tajomstvom.
- **Ostatné vstupné parametre** ako napr. účinnosť filtrov (respirátorov, resp. vzduchotechnických filtrov) či tzv. distribučné faktory stanovujúce distribúciu rádionuklidov do aerosólov (v prípade aplikácie technológií tepelného delenia).
- **Obmedzenia použitého výpočtového prostriedku**, t.j. nemožnosť vytvorenia modelu, ktorý je úplne totožný s reálnou situáciou (napr. modelovanie 5536 kusov U rúrok parogenerátora).

Aby bolo možné dosiahnuť relevantné výsledky, je potrebné uvedené problémy odstrániť, resp. minimalizovať ich vplyv. To je možné dvoma spôsobmi:

- **Vytvorenie metodiky** umožňujúcej rýchly prepočet výsledkov v prípade, že sa vstupné údaje spresnia (napr. meraním a odberom vzoriek z teplovýmenných rúrok PG dôjde k spresneniu nuklidového vektora a/alebo úrovne aktivity).
- **Aplikácia tzv. konzervatívneho prístupu**, aby výsledky výpočtov neboli podhodnotené v porovnaní s reálnou situáciou (napr. v prípade demontáže sa uvažuje s menšou vzdialenosťou pracovníkov).

3.3 Metodika hodnotenia radiačných vplyvov

Reflektujú faktory uvedené v predchádzajúcej kapitole bola vytvorená metodika pozostávajúca z nasledovnej postupnosti krokov:

1. Definovanie rozsiahleho súboru parametrov (v súlade s kap. 3.1).
2. Vytvorenie možných scenárov demontáže, resp. ukladania.
3. Tvorba geometrického, rádiologického a materiálového modelu pre vytvorené scenáre. Ako zdrojový člen sa uvažuje ^{60}Co s aktivitou 1 Bq. Tento nuklid je jedným z najčastejších aktivačných produktov v JE s tlakovodnými reaktormi so štandardnou prevádzkou [20]. Zároveň je ľahko merateľný, a to použitím γ -spektrometrie [20], [23].
4. Výpočet príkonov efektívnej dávky a spracovanie výsledkov – súbor tzv. *konverzných koeficientov* [(mSv/h)/1Bq $_{\text{Co-60}}$].
5. Výpočet príkonov efektívnej dávky a kolektívnej efektívnej dávky využitím konverzných koeficientov a variabilných parametrov (nuklidové vektory, aktivita, parametre pracovnej skupiny).
6. Výpočet vnútorného ožiarenia pre daných pracovníkov.
7. Stanovenie vplyvu demontážnych činností na obyvateľstvo a ŽP.
8. Celkové porovnanie a zhodnotenie uvažovaných scenárov.

Poznámka: Body 6 a 7 sa týkajú len scenárov demontáže.

Vnútorné ožiarenie, ako aj vplyv na obyvateľstvo a ŽP, vychádzajú buď z konzervatívne stanovených alebo z variabilných parametrov. Je však potrebné poznamenať, že výpočet vnútorného ožiarenia si nevyžaduje využitie špecializovaných výpočtových prostriedkov a stanovené vplyvy na obyvateľstvo a ŽP sú o niekoľko rádov nižšie v porovnaní s vonkajším ožiarением. Očakávané nepresnosti je tak možné jednoducho skorigovať, resp. budú zanedbateľné.

3.3.1 Výpočet vonkajšieho ožiarenia

V súlade s prezentovanou metodikou bolo vonkajšie ožiarenie stanovené využitím prostriedkov VISIPLAN 3D ALARA a MATLAB nasledovným spôsobom:

1. Vytvorenie výpočtového modelu v prostriedku VISIPLAN 3D ALARA s aktivitou každého uvažovaného zdroja ^{60}Co s aktivitou 1 Bq a vytvorenie množín bodov, v ktorých sa má stanoviť príkon efektívnej dávky (tzv. trajektórie).
2. Spracovanie získaných údajov (príspevky od každého zdroja k príkonu efektívnej dávky). Tieto údaje predstavujú vstupné dáta pre ďalšie výpočty – v rovnici (1) znázornené ako f (skalár). Tieto vypočítané hodnoty možno interpretovať ako faktory určujúce vzťah medzi príkonom efektívnej dávky a aktivitou ^{60}Co .
3. Stanovenie tzv. konverzného vektora vytvoreného ako podiel expozičnej konštanty gama i-teho nuklidu k expozičnej konštante gama nuklidu $^{60}\text{Co} - \Gamma_i / \Gamma_{\text{Co}}$. Hodnoty konštánt gama boli prevzaté z [24]. Konverzný vektor je v rovnici (1) uvedený ako **konv**.
4. Zadanie nuklidového vektora – v rovnici (1) označený ako **podiel**.
5. Zadanie celkovej aktivity nuklidov – v rovnici (1) označená *aktivita*.

Výsledná hodnota príkonu efektívnej dávky je potom daná súčinom jednotlivých zložiek. Tento výpočet je účelné realizovať v prostriedku pracujúcom s maticami, napr. MATLAB. Výpočet podľa syntaxu prostriedku MATLAB je potom nasledovný:

$$\text{príkon efektívnej dávky} = \text{sum}(\text{podiel} * \text{aktivita} .* \text{konv}) * f, \quad (1)$$

kde

sum predstavuje súčet,

symbol *.** predstavuje vynásobenie prvku v n-tom riadku prvého vektora s prvkom v n-tom riadku druhého vektora.

Výhodou tohto postupu je to, že variabilným vstupným parametrom je vektor podielu a hodnota aktivity. V prípade zmeny uvedených 2 parametrov je nutná len zmena príslušných vektorov a výpočet podľa vzťahu (1). Nie je tak nutné opätovné zadávanie zdrojového člena v prostredí VISIPLAN 3D ALARA a opakovanie výpočtu (čo môže byť v závislosti od zložitosti modelu pomerne náročné).

3.3.2 Výpočet vnútorného ožiarenia

Stanovenie vnútorného ožiarenia bolo realizované v súlade s dokumentom MAAE [25], Európskej komisie [26] ako aj Nariadením vlády SR č. 345/2006 [27]. Podľa týchto dokumentov je možné stanoviť:

- Inhaláciu
- Ingesciu
- Kontamináciu kože
- Vonkajšie ožiarenie.

Vzhľadom na uvažované podmienky demontáže PG (špeciálne oblečenie pri práci v kontrolovanom pásme) je možné kontamináciu kože zanedbať.

Dokumenty [25] a [26] uvádzajú aj postup výpočtu vonkajšieho ožiarenia, ktorý však reflektuje iba vybrané scenáre. V rámci práce preto bolo vonkajšie ožiarenie stanovené podľa postupu uvedeného v kap. 3.3.1.

Problematika distribúcie rádioaktívnych kontaminantov do aerosólov je značne zložitá a závisí od množstva faktorov (napr. druh použitej technológie tepelného rezania, materiálové zloženie komponentu) [13]. V oboch prípadoch uvažovaných expozičných ciest (inhalácia a ingescia) boli distribučné faktory prevzaté z dokumentu [28], ktorý sa zaoberá pretavovaním kovových RAO. Je dôvodné predpokladať, že v mieste rezania použitím technológie tepelného delenia dochádza k taveniu materiálu, preto bola v práci využitá uvedená analógia. Dokument [28] uvádza intervaly distribučných koeficientov pre jednotlivé chemické prvky, v rámci konzervatívneho prístupu boli vždy uvažované najvyššie hodnoty.

V rámci konzervatívneho prístupu sa vo všetkých prípadoch uvažujú najnepriaznivejšie hodnoty (napr. najvyššia uvažovaná prášnosť).

Inhalácia

Radiačný vplyv inhalácie je možné stanoviť ako [25], [26]:

$$E_{inh} = e_{inh} \cdot t_e \cdot f_d \cdot f_c \cdot C_{prach} V \cdot e^{-\lambda \cdot t_1} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda \cdot t_2}}{\lambda \cdot t_2}, \quad (2)$$

kde je

E_{inh}	obdržaná efektívna dávka prostredníctvom inhalácie v kalendárnom roku na jednotku mernej aktivity obsiahnutej v materiáli [(Sv/r)/(Bq/g)];
e_{inh}	dávkový konverzný faktor pre inhaláciu [Sv/Bq];
t_e	dobu ožiarenia počas kalendárneho roka [s];
f_d	faktor riedenia [-];
f_c	faktor koncentrácie [-];
C_{prach}	koncentrácia prachu vo vzduchu [g/m ³];
V	objem vdýchnutého vzduchu za hodinu [m ³ /h];
λ	konštanta rádioaktívnej premeny pre daný rádionuklid [1/s];
t_1	dobu pred začiatkom uvažovaného scenára (počas ktorej prebieha rádioaktívna premena) [s];
t_2	dobu trvania scenára (počas ktorej prebieha rádioaktívna premena) [s].

V rámci konzervatívneho prístupu sa neuvažoval čas, počas ktorého dôjde k poklesu aktivity rádioaktívnou premenou ($t_1 = 0$, $t_2 = 0$).

Ingescia

Radiačný vplyv ingescie je možné stanoviť ako [25], [26]:

$$E_{ing} = e_{ing} \cdot q \cdot f_d \cdot f_c \cdot f_t \cdot e^{-\lambda \cdot t_1} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda \cdot t_2}}{\lambda \cdot t_2}, \quad (3)$$

kde je

E_{ing}	obdržaná efektívna dávka prostredníctvom ingescie v kalendárnom roku na jednotku mernej aktivity obsiahnutej v materiáli [(Sv/r)/(Bq/g)];
e_{ing}	dávkový konverzný faktor pre ingesciu [Sv/Bq];
q	množstvo prijatého rádionuklidu za rok [g/r], hodnota je 50 g/r, avšak táto hodnota predpokladá, že daná činnosť je realizovaná celý rok, čo v prípade demontáže PG nie je pravda. Z tohto dôvodu bola hodnota podelená číslom 1600 (pracovná doba ročne je maximálne 2000 hodín, z toho 400 hodín (1,6 h/deň) sa uvažujú prestávky, vstupy a výstupy z kontrolovaného pásma) a prenášobená príslušnou dobou trvania danej činnosti;
f_d	faktor riedenia [-];
f_c	faktor koncentrácie [-];
f_t	translokačný faktor [-];
λ	konštanta rádioaktívnej premeny pre daný rádionuklid [1/s];
t_1	dobu pred začiatkom uvažovaného scenára (počas ktorej prebieha rádioaktívna premena) [s];
t_2	dobu trvania scenára (počas ktorej prebieha rádioaktívna premena) [s].

Analogicky ako v prípade inhalácie sa rámci konzervatívneho prístupu neuvažovala doba, počas ktorej dôjde k poklesu aktivity rádioaktívnou premenou ($t_1 = 0$, $t_2 = 0$).

3.3.3 Použité výpočtové prostriedky

Dosiahnutie stanovených cieľov dizertačnej práce si vyžadovalo využitie špecializovaných výpočtových prostriedkov. Vonkajšie ožiarenie bolo stanovené využitím výpočtového prostriedku VISIPLAN 3D ALARA [29] a prostriedku MATLAB [30]. Výpočet vnútorného ožiarenia bol realizovaný v prostriedku MATLAB. Hodnotenie vplyvov na obyvateľstvo a ŽP sa uskutočnilo pomocou prostriedku ESTE AI [31], ekonomické hľadisko procesu demontáže a ukladania RAO bolo zhodnotené prostriedkom OMEGA [32].

3.4 Scenáre demontáže

Kombináciou faktorov uvedených v kap. 3.1 boli vytvorené 3 scenáre demontáže parogenerátora:

- **Scenár D1** – pozdĺžna demontáž PG
- **Scenár D2** – priečna demontáž PG
- **Scenár D3** – diaľková demontáž v boxe PG.

Zároveň sa uvažujú aj prípravné činnosti pred začiatkom demontáže PG za účelom vytvorenia podmienok pre realizáciu samotnej demontáže PG (odstránenie izolácie, odrezanie kolektorov od potrubia primárneho okruhu, odrezanie hlavného parného kolektora).

3.4.1 Vstupné predpoklady pre scenáre demontáže

Nasledujúca časť charakterizuje faktory, ktoré je nevyhnutné zohľadniť pri tvorbe jednotlivých scenárov demontáže.

V rámci scenárov demontáže D1 a D2 uvažovaná pracovná skupina pozostáva z 5 členov a je nasledovná:

- **Rezač a pomocník** vykonávajú demontážne činnosti. Uvažovaná vzdialenosť od rezaného komponentu je 30 cm, časový koeficient zohľadňujúci čas pobytu každého pracovníka je 1 (t.j. sú prítomní počas celej doby trvania danej činnosti).
- **Majster** zabezpečuje organizáciu pracovníkov a kontrolu doby pobytu pracovníkov, jeho uvažovaná vzdialenosť od komponentu je 1 m, časový koeficient je 0,8.
- **Technik** má na starosti dozor nad spôsobom rezania, kontroluje kvalitu a rýchlosť rezu. Uvažovaná vzdialenosť je 1 m od komponentu, časový koeficient je 0,8.
- **Technik radiačnej bezpečnosti** monitorujúci radiačnú situáciu (meranie dávkových prikonov), uvažovaná vzdialenosť od komponentu je 1 m, časový koeficient je 0,3.

Vzhľadom na charakter Scenára D3 (diaľková demontáž v boxe PG) sa uvažuje len s 1 skupinou pracovníkov.

Doba trvania jednotlivých činností

Časová náročnosť procesu rezania je funkciou množstva parametrov (materiálové a geometrické parametre rezaného komponentu, druh technológie rezania). Uvažované

doby trvania jednotlivých činností a prácností čiastočne vychádzajú z údajov rezacieho zariadenia v lokalite JE Greifswald). Podľa [33] je rýchlosť rezania v intervale od 15 do 80 mm/min. V rámci konzervatívneho prístupu sa uvažuje s najnižšou rýchlosťou.

Vplyv technológie demontáže

Z pohľadu predmetu dizertačnej práce sú z hľadiska aplikácie rôznych demontážnych technológií kľúčové predovšetkým 2 faktory:

- **Časová náročnosť** (rýchlosť rezania) – uvažované hodnoty sú pre rezanie pásovou pilou. V prípade aplikácie technológií tepelného delenia môže dôjsť k skráteniu času rezania, výsledky budú preto konzervatívne.
- **Tvorba aerosólov** – táto je relevantná v prípade aplikácie technológií tepelného delenia, čo je zohľadnené tak z hľadiska vnútorného ožiarenia (kap. 4.1.2), ako aj vplyvov na obyvateľstvo a ŽP (kap. 4.1.3).

3.4.2 Modifikácie scenárov demontáže

Demontáž PG sa v rámci scenárov D1 a D2 uvažuje tak s tieniacou stenou ako aj bez nej. Tieniaca stena zo železa má dĺžku 10,7 m, výšku 3,5 m a hrúbku 5 cm.

V rámci scenára D3 sa uvažuje s fragmentáciou jednotlivých segmentov a kolektorov mimo zóny primárneho rezania. V prípade, že by bolo možné vykonať fragmentáciu priamo v boxe PG, boli by vyťahované priamo sudy s fragmentovanými časťami. Uvažujú sa **sudy MEVA** (objem 200 l) s **350 kg fragmentov**. Vnútorné rozmery suda sú: priemer 570 mm, výška 783,77 mm. Hrúbka steny a veka je 1,2 mm [34].

Vyťahovanie sudov je modelované podobne ako v prípade vyťahovania ostatných segmentov (v počiatočnej polohe, v polovici výšky boxu a na úrovni podlahy reaktorovej sály), zohľadňuje sa tiež postupné zmenšovanie PG. Uvažovaná rýchlosť vyberania sudov je vzhľadom na nižšiu náročnosť procesu 2 cm/s. Vzhľadom na hmotnosti častí PG (kap.3.1) je potrebných **99 sudov na teplovýmenné rúrky a 73 sudov na kolektory**.

Celkovo sú tak uvažované nasledovné scenáre:

- **Scenár D1**
 - Scenár D1.1 – pozdĺžna demontáž s tieniacou stenou
 - Scenár D1.2 – pozdĺžna demontáž bez tieniacej steny
- **Scenár D2**
 - Scenár D2.1 – priečna demontáž s tieniacou stenou
 - Scenár D2.2 – priečna demontáž bez tieniacej steny
- **Scenár D3**
 - Scenár D3.1 – diaľková demontáž s fragmentáciou mimo boxu PG
 - Scenár D3.2 – diaľková demontáž s fragmentáciou v boxe PG.

3.5 Manažment materiálov z demontáže parogenerátora

Dôsledkom demontážnych činností je produkcia množstva materiálov, ktoré je možné rozdeliť nasledovne:

- Materiály uvoľniteľné do ŽP (napr. plášť PG)
- Materiály neuvoľniteľné do ŽP – rádioaktívne odpady
 - a) Veľmi nízkoaktívne RAO (VNAO)
 - b) Nízkoaktívne RAO (NAO).

Klasifikácia RAO je v súlade s legislatívou SR [35].

Stanovenie, do ktorej z uvedených kategórií patrí daný materiál, sa realizuje kontrolou splnenia limitných podmienok pre požadovaný koncový stav materiálov. Pre uvoľnenie do ŽP sa skúma splnenie limitov v súlade s aktuálne platnými predpismi v SR [27] ako aj odporúčaniami uvedenými v dokumente [36], ktoré budú v dohľadnej dobe implementované v slovenskej legislatíve.

Pre kontrolu splnenia limitov pre ukladanie veľmi nízkoaktívnych RAO sa vychádza z koncepcie francúzskeho úložiska Morvilliers [37].

Metodika hodnotenia splnenia limitov pre uloženie nízkoaktívnych RAO v Republikovom úložisku rádioaktívnych odpadov v Mochovciach je rovnaká ako v predošlých prípadoch. Analýzou uvažovaného nuklidového vektora (Tab. 3.1) a aktivít komponentov PG (

Tab. 3.2) možno skonštatovať, že príslušné limity na uloženie do úložiska NAO nie sú prekročené ani pri najhoršom scenári (bez uvažovania dekontaminácie).

3.5.1 Scenáre manažmentu materiálov

Aplikáciu technológií pred- a podemontážnej dekontaminácie je možné dosiahnuť okrem priaznivejšej radiačnej situácie pri jednotlivých činnostiach procesu demontáže aj znížením triedy RAO, resp. uvoľnenie do ŽP. Dôležitá je v tomto prípade účinnosť dekontaminácie charakterizovaná dekontaminačným faktorom (DF). Vzhľadom na dostupné informácie z realizovaných projektov dekontaminácie (napr. v [38], [39]) sú uvažované DF nasledovné:

- Predemontážna dekontaminácia **DF = 100**.
- Podemontážna dekontaminácia **DF = 10** (v prípade PG je podemontážna dekontaminácia fragmentovaných teplovýmenných rúrok vzhľadom na ich rozmery (priemer 10 mm) problematická).

Vychádzajúc z údajov o aktivite a nuklidového vektora častí PG (Tab. 3.1 a

Tab. 3.2), príslušných limitov a aplikácie dekontaminačných technológií je možné vytvoriť nasledovné scenáre – Tab. 3.3:

Tab. 3.3 Prehľad uvažovaných scenárov nakladania s teplovýmennými rúrkami a kolektormi

Scenár	Preddemontážna dekontaminácia	Podemontážna dekontaminácia	Skladovanie
Scenár U0	NIE	NIE	NIE
Scenár U1	ANO	NIE	NIE
Scenár U2	ANO	ANO	NIE
Scenár U3	ANO	ANO	ANO

Scenár U0 reprezentuje tzv. nulový variant bez uvažovania akejkoľvek dekontaminácie. Je zrejmé, že uvedený prístup je v rozpore s princípom ALARA, t.j. minimalizácii rizika a úrovne ožiarenia na personál. Z tohto dôvodu tento scenár slúži len ako referenčný.

V rámci scenára U0 možno vznikajúce primárne odpady (teplovýmenné rúrky) považovať v súlade s aktuálnou legislatívou [35] za nízkoaktívne RAO, t.j. uložitelné v povrchovom úložisku. **Kolektory** bude možné **po 5 rokoch** (t.j. v roku 2020) preklasifikovať na **veľmi nízkoaktívne odpady (VNAO)**.

Scenár U1 umožňuje popri redukcii dávkového zaťaženia aj **uvoľnenie kolektorov do ŽP**.

Scenár U2 umožňuje **preklasifikovanie teplovýmenných rúrok na VNAO**, a to hneď v roku 2015.

Scenár U3 koncepčne vychádza zo Scenára U2 avšak s tým rozdielom, že namiesto úpravy teplovýmenných rúrok je uvažované ich skladovanie, a to do doby, kým ich aktivita nepoklesne na úroveň umožňujúcu ich uvoľnenie do ŽP. V porovnaní so Scenárom U0 tak dochádza k úspore približne 60 t ocele (pre 1 PG).

Vplyv implementácie nových limitov pre uvoľnenie do ŽP na požadovanú dobu skladovania je uvedený v Tab. 3.4.

Tab. 3.4 Možnosti uvoľnenia teplovýmenných rúrok a kolektorov do ŽP v závislosti od príslušných limitov

Scenár	Rok uvoľnenia do ŽP			
	Teplovýmenné rúrky		Kolektory	
	Nariadenie vlády 345/2006	Smernica Rady 2013/59/EURATOM	Nariadenie vlády 345/2006	Smernica Rady 2013/59/EURATOM
Scenár U1	-	-	2015	2018
Scenár U2	-	-	2015	2015
Scenár U3	2039	2056	2015	2015

V prípade Scenára U1 a Scenára U2 nie sú pri teplovýmenných rúrkach uvádzané roky, nakoľko tieto sú klasifikované ako NAO resp. VNAO (doba skladovania za účelom uvoľnenia do ŽP by bola v takýchto prípadoch mimoriadne dlhá).

3.5.2 Činnosti spracovania a úpravy RAO

Vzhľadom na charakter RAO vznikajúcich z demontáže PG sa predpokladá, že ich spracovanie a úprava budú realizované v Bohunickom spracovateľskom centre (BSC) v Jaslovských Bohuniciach. Postup spracovania a úpravy, doba trvania jednotlivých činností a vzdialenosti pracovníkov od zdrojov žiarenia vychádzajú z publikácie [40]. Rozdiel je predovšetkým v zdrojovom člene (v [40] sa analyzuje spracovanie a úprava fragmentovaných puzdier dlhodobého skladovania z JE A1). Ostatné parametre však možno považovať za rovnaké.

Transport a ukladanie RAO

Po spracovaní a úprave RAO v BSC v Jaslovských Bohuniciach sú VNAO a NAO transportované do príslušného úložného systému v Mochovciach. Vzdialenosť medzi úložiskami v lokalite Mochovce a BSC RAO je približne 100 km, uvažovaná doba transportu je 90 min.

Veľmi nízkoaktívne RAO

V rámci práce sa uvažuje s 200 l MEVA sudmi, ktoré budú prepravené v ISO kontajneroch. Vnútorne rozmery tohto kontajnera sú nasledovné: výška 2,591 m, dĺžka 6,058 m, šírka 2,438 m, hrúbka steny je 3 mm.

Z ožiarených pracovníkov sa uvažuje vodič a pomocník (vykonávajúci manipuláciu so sudmi, ukladanie do radov a prekrytie radu).

Nízkoaktívne RAO

Ukladanie nízkoaktívnych RAO je v SR realizované v úložisku nízkoaktívnych RAO v Mochovciach. Z konštrukčného hľadiska úložisko pozostáva zo sústavy úložných boxov usporiadaných v radoch a dvojradoch. Boxy sú zo železobetónu, rozmery 1 boxu sú 18×6×5,5 m, hrúbka stien je 0,6 m. V 1 boxe je možné uložiť v 3 vrstvách (spodná, stredná a horná vrstva) 90 vláknobetónových kontajnerov (VBK). Každý rad sa skladá z 20 boxov, celková dĺžka radu je 121 m [41].

V rámci činností transportu a ukladania VNAO sa uvažujú 3 pracovníci – vodič, pomocník a žeriavník.

Ukladanie sekundárnych RAO z dekontaminácie PG

Scenáre U1, U2 a U3 predpokladajú aplikáciu dekontaminačných technológií. Dôsledkom je tvorba sekundárnych RAO, ktoré možno rozdeliť nasledovne:

- **Vysýtené ionexy** použité na čistenie dekontaminačných roztokov. Tieto sú fixované do tzv. SIAL matrice (z anglického **SI**licon and **AL**uminium, teda zmesi kremika a hliníka) a umiestnené do 200 l sudov [42]. Sudy sa následne umiestnia do VBK.
- **Voda a roztoky** použité na oplachy. Tieto kvapalné RAO môžu byť spracované na odpadkách a koncentrát (v závislosti od jeho aktivity a nuklidového zloženia) je zmiešaný s cementom a ako aktívna zálievka slúži na zaliatie vnútorného objemu VBK.
- **Pevné RAO** – kovové častice (oxidy) môžu byť umiestnené do 200 l sudov, zlisované a uložené vo VBK.

Ožiarenie pracovníkov pri ukladaní týchto RAO je analyzované v rámci príslušných scenárov.

4 Výsledky dizertačnej práce s uvedením nových poznatkov

Výsledky možno rozdeliť do nasledovných častí:

- Scenáre demontáže:
 - Vonkajšie ožiarenie
 - Vnútročné ožiarenie
 - Hodnotenie vplyvov na obyvateľstvo a ŽP.
- Spracovanie a úprava RAO
 - Vonkajšie ožiarenie.
- Ukladanie RAO
 - Vonkajšie ožiarenie pri ukladaní VNAO do úložiska
 - Vonkajšie ožiarenie pri ukladaní NAO do úložiska.

4.1 Ožiarenie pri činnostiach súvisiacich s demontážou PG

Vzhľadom na charakter uvažovaných činností možno rozlišovať vonkajšie a vnútorné ožiarenie.

4.1.1 Vonkajšie ožiarenie

Demontáž PG – scenáre D1, D2 a D3

V Tab. 4.1 sú uvedené celkové kolektívne efektívne dávky pre jednotlivé scenáre. Výsledky sú pre scenár U0, t.j. bez aplikácie pred demontážnej dekontaminácie.

Tab. 4.1 Scenáre demontáže (s. 15) – celkový prehľad (vrátane prípravných činností bez uvažovania pred demontážnej dekontaminácie)

Scenár/rok	Kolektívna efektívna dávka		
	2015	2020	2025
D1.1 (pozdlžna demontáž so stenou)	518,01	273,10	146,47
D1.2 (pozdlžna demontáž bez steny)	521,31	275,00	147,05
D2.1 (pričná demontáž so stenou)	318,41	167,59	89,49
D2.2 (pričná demontáž bez steny)	320,91	168,88	90,60
D3.1 (diaľková demontáž, fragm. mimo boxu)	316,87	166,50	89,17
D3.2 (diaľková demontáž, fragm. v boxe)	6,75	3,60	1,93

Z výsledkov, uvedených v Tab. 4.1 možno vyvodit' nasledovné závery:

- Pri uvažovaných predpokladoch a parametroch pre scenáre D1 a D2 je **celkový vplyv tieniacej steny na zmenšenie ožiarenia iba minimálny**. Lokálne rozdiely sú viditeľné predovšetkým pri pracovníkoch vzdialenejších od komponentov PG. Vzhľadom na fakt, že pri fragmentačných prácach aktívnych komponentov tieto najviac prispievajú k ožiareniu, je pri týchto činnostiach vplyv tieniacej steny takmer nulový.

- Napriek uvažovanej rovnakej práci pri scenári D1 a D2, je celková **kolektívna efektívna dávka pre scenár D2 približne 60% z príslušnej hodnoty pre scenár D1**. Tento rozdiel je spôsobený predovšetkým odlišnou pozíciou pracovníkov voči teplovýmenným rúrkam v segmente. **Z hľadiska radiačnej záťaže je teda scenár D2 priaznivejší než scenár D1.**

4.1.2 Vnútorné ožiarenie

Výpočet vnútorného ožiarenia bol realizovaný v súlade s metodikou charakterizovanou v podkap. 3.3.2. Vzhľadom na vzdialenosť od komponentu sa ako ožiarení uvažujú len rezač a pomocník. Sledujú sa všetky činnosti rezania a fragmentácie v rámci scenárov D1 a D2. Pri scenári D3 sa vnútorné ožiarenie uvažuje len pre D3.1, a to len pri činnostiach fragmentácie. Scenáre D1.1 a D1.2 sú z hľadiska vnútorného ožiarenia identické, obdobne je to aj v prípade scenára D2.

Výsledky sú uvedené v Tab. 4.2. Uvedené výsledky sú pre scenár U0, teda bez predpredmontážnej dekontaminácie. **Najväčší príspevok k ingescii** je od ^{137}Cs , ^{135}Cs a ^{60}Co . V prípade **inhalácie** sú **najväčšie príspevky** od α -žiaričov ^{241}Pu a ^{241}Am . Táto skutočnosť je dôsledkom rozdielnych dávkových konverzných faktorov, ako aj rozdielneho podielu v nuklidovom vektore (Tab. 3.1). V rámci výpočtov sa neuvažovali ochranné pomôcky (masky). Z tohto dôvodu sú výsledky konzervatívne a možno očakávať, že v reálnom prípade budú (v závislosti od účinnosti filtrácie masiek) minimálne o 1 rád nižšie.

Tab. 4.2 Scenáre demontáže – odhadované vnútorné ožiarenie pracovníkov

Scenár/rok	Vnútorné ožiarenie [manSv]		
	2015	2020	2025
Scenár D1 (pozdlžna demontáž)	1,50E-05	1,29E-05	1,14E-05
Scenár D2 (pričná demontáž)	1,80E-05	1,55E-05	1,37E-05
Scenár D3 (diaľková demontáž)	1,36E-05	1,17E-05	1,04E-05

4.1.3 Hodnotenie vplyvov na obyvateľstvo a ŽP

V prípade aplikácie tepelných deliacich technológií je časť vznikajúcich aerosólov zachytená na filtroch a časť je ako atmosferické výpuste uvoľnená ventilačným komínom do ŽP. Uvažuje sa aktivita častí PG v súlade s

Tab. 3.2 pre rok 2015 bez predpredmontážnej dekontaminácie. Distribučné faktory pre prechod kontaminantov do aerosólov boli podobné ako v prípade vnútorného ožiarenia prevzaté z dokumentu [28]. Uvažovaná účinnosť vzduchotechnických filtrov je 99,95% (t.j. do komína prejde len 0,0005 dielu). Štatistické údaje (počet obyvateľov, veterná ružica, rýchlosť vetra, zrážky merané a vyhodnotené každú hodinu), ako aj údaje týkajúce sa príjmu poľnohospodárskych produktov sú založené na údajoch z roku 2014. Výpuste sú uvažované pre ventilačný komín JE V1, sektorizácia je pre geometrický stred areálu JAVYS v Jaslovských Bohuniciach.

Za účelom identifikácie kritickej skupiny bola analyzovaná maximálna kolektívna efektívna dávka. Za účelom identifikácie kritického jedinca boli vypočítané a analyzované individuálne dávky v obývaných a hypoteticky tiež v neobývaných regiónoch. Z výsledkov je zrejmé, že **maximálna kolektívna efektívna dávka je 1,95 manSv** (mesto Trnava). **Maximálna individuálna dávka** v obývanom regióne

(kataster obce Ratkovce) je **0,24 nSv**, maximálna individuálna dávka v neobývanom regióne je 0,30 nSv. Z hľadiska individuálnych dávok je najviac dotknutá veková skupina 12-17 rokov. V susediacich štátoch (Rakúsko, Česká republika a Maďarsko) sú celkové kolektívne efektívne dávky približne o 1 rád nižšie ako na Slovensku. Podrobnejšie je sú výsledky popísané v samotnej práci a v [43]. Je nutné poznamenať, že tak v prípade vnútorného ožiarovania, ako aj hodnotenia vplyvov na obyvateľstvo a ŽP, sa uvažovalo, že celý kontaminovaný materiál je predmetom tepelného rezania. Je zrejme, že v reálnom prípade plocha daného povrchu silne závisí od množstva faktorov týkajúcich sa konkrétnej technológie (počet rezov, šírka každého rezu). Tento fenomén bol detailne analyzovaný v [13]. Vo výpočtoch tento problém nebol zahrnutý, takže výsledky sú konzervatívne a reprezentujú najhorší scenár.

4.2 Ožiarenie pri činnostiach manažmentu RAO

Výsledky možno rozdeliť do nasledovných častí:

- Vonkajšie ožiarenie pri činnostiach spracovania a úpravy RAO
- Vonkajšie ožiarenie pri ukladaní RAO
 - a) Veľmi nízkoaktívne RAO
 - b) Nízkoaktívne RAO.

4.2.1 Vonkajšie ožiarenie pri činnostiach spracovania a úpravy RAO

Celkové kolektívne efektívne dávky scenárov U0 a U1 (s. 16-17) sú uvedené v Tab. 4.3:

Tab. 4.3 Činnosti spracovania a úpravy RAO z demontáže PG – celkový prehľad

Scenár	Kolektívna efektívna dávka [manmSv]		
	2015	2020	2025
Scenár U0	3,88	2,37	1,27
Scenár U1	0,32	0,17	0,09

4.2.2 Vonkajšie ožiarenie pri činnostiach ukladania RAO

Výpočty možno rozdeliť na ukladanie VNAO a ukladanie NAO.

a) Ukladanie veľmi nízkoaktívnych RAO

Táto trieda RAO sa očakáva pri (podkap. 3.5.1):

- Kolektoroch v scenári U0 v rokoch 2020 a 2025.
- Teplovýmenných rúrkach v scenári U2.

Ukladanie kolektorov v rámci scenára U0 (roky 2020 a 2025)

Celkový prehľad je uvedený v Tab. 4.4:

Tab. 4.4 Ukladanie VNAO – scenár U0 (bez dekontaminácie, s. 16-17), kolektory

Pracovník	Kolektívna efektívna dávka	
	2020	2025
Vodič	1,00E-03	5,40E-04
Pomocník	1,07E-02	5,74E-03
Spolu	1,17E-02	6,28E-03

Ukladanie teplovýmenných rúrok v rámci scenára U2

Celkový prehľad je uvedený v Tab. 4.5:

Tab. 4.5 Ukladanie VNAO – scenár U2 (s pred- i podemontážnou dekontamináciou s. 16-17)

Pracovník	Kolektívna efektívna dávka [manmSv]		
	2015	2020	2025
Vodič	7,19E-04	3,78E-04	2,03E-04
Pomocník	7,65E-03	4,01E-03	2,16E-03
Spolu	8,36E-03	4,39E-03	2,36E-03

Celkové kolektívne efektívne dávky sú v tomto prípade nižšie než je to u kolektorov (Tab. 4.4), v prípade scenára U2 však bola realizovaná pred- a podemontážna dekontaminácia.

Výsledky, uvedené v týchto dvoch podkapitolách, sa môžu využiť aj pri hodnotení dávkovej záťaže pri manipulácii so sudmi počas ich skladovania (scenár U3).

b) Ukladanie nízkoaktívnych RAO

Výsledky možno rozdeliť nasledovne:

- Ukladanie v rámci scenára U0 – teplovýmenné rúrky a kolektory v roku 2015 (7 sudov vo VBK)
- Ukladanie v rámci scenára U0 – teplovýmenné rúrky v rokoch 2020 a 2025 (4 sudy vo VBK)
- Ukladanie v rámci scenára U1 – ukladanie výliskov a sekundárnych RAO z dekontaminácie
- Ukladanie v rámci scenára U2 – ukladanie sekundárnych RAO z dekontaminácie.

Ukladanie NAO v rámci scenára U0

Celkový prehľad je v Tab. 4.6:

Tab. 4.6 Ukladanie NAO v rámci scenára U0 (s. 16-17) – celkový prehľad

Pracovník	Kolektívna efektívna dávka [manmSv]		
	2015	2020	2025
Vodič	5,62E-02	2,95E-02	1,59E-02
Pomocník	1,23E+00	1,03E+00	9,22E-01
Žeriavnik	1,77E-02	1,00E-02	6,10E-03
Spolu	1,30	1,06	0,94

Scenár U0 pre ukladanie VNAO bol využitý aj na porovnanie výsledkov výpočtov podľa metodiky výpočtu cez ^{60}Co s aktivitou 1 Bq (podkap. 3.3.1) a priamym zadávaním vstupných parametrov (aktivita, nuklidový vektor) do výpočtového prostriedku VISIPLAN 3D ALARA. Z porovnania vyplynulo, že príkony efektívnej dávky stanovené pomocou metodiky výpočtu cez ^{60}Co s aktivitou 1 Bq sú rádovo o jednotky percent vyššie než pri priamom zadávaní vstupných údajov. Prezentovaná metodika výpočtu externého ožiarenia tak vedie k mierne konzervatívnym výsledkom.

Ukladanie NAO v rámci scenára U1

Pri ukladaní NAO v rámci scenára U1 sa vychádzalo zo zjednodušujúcich predpokladov (náhrada VBK s výliskami a aktívnou zálievkou 1 zdrojom) . Celkový prehľad je uvedený v Tab. 4.7.

Tab. 4.7 Ukladanie NAO v scenári U1 (s predдемонтážnou dekontamináciou, s. 16-17) – celkový prehľad

Pracovník	Kolektívna efektívna dávka [manmSv]		
	2015	2020	2025
Vodič	1,24E-01	6,51E-02	3,50E-02
Pomocník	2,06E+00	1,49E+00	1,20E+00
Žeriavnik	5,22E-02	2,81E-02	1,58E-02
Spolu	2,24	1,58	1,25

Ukladanie sekundárnych odpadov v scenári U2 a U3

Scenár vychádza z rovnakých predpokladov ako scenár U1, s tým rozdielom, že sa uvažuje len 1 transport s 2 VBK. Keďže celkové množstvo sekundárnych RAO je závislé od viacerých faktorov, môže byť potrebných aj viac VBK. V takom prípade je však prepočet jednoduchý. V Tab. 4.8 je uvedený celkový prehľad pre 2 VBK.

Tab. 4.8 Ukladanie sekundárnych RAO z dekontaminácie v scenári U2 a U3

Pracovník	Kolektívna efektívna dávka [manmSv]		
	2015	2020	2025
Vodič	9,90E-03	5,21E-03	2,80E-03
Pomocník	1,61E-01	1,15E-01	9,14E-02
Žeriavnik	4,17E-03	2,25E-03	1,26E-03
Spolu	0,18	0,12	0,09

4.3 Celkové zhodnotenie ožiarenia

Výsledky výpočtov pre scenáre demontáže (kap. 4.1.1) sú bez uvažovania preddemontážnej dekontaminácie. V prípade aplikácie dekontaminačných technológií sa predpokladá 100-, resp. 1000-násobný pokles aktivity (scenáre U1 – U3). Komplexné zhodnotenie procesu demontáže PG je teda kombináciou scenárov demontáže (scenáre D1 – D3) a scenárov manažmentu a ukladania RAO (scenáre U0 – U3). Prehľad celkových kolektívnych efektívnych dávok je uvedený v Tab. 4.9 a predstavuje súčet kolektívnych efektívnych dávok v rámci všetkých sledovaných činností. Prehľad je pre rok 2020, keďže rok 2015 je len referenčný a rok 2025 je na konci 2. etapy vyradovania JE V1.

Tab. 4.9 Vzájomná kombinácia všetkých scenárov (s. 15-17) – celkový prehľad kolektívnych efektívnych dávok pre rok 2020 [manmSv]

Scenár	U0	U1	U2	U3
D1.1	276,58	4,51	2,88	2,88
D1.2	278,48	4,53	2,90	2,90
D2.1	171,07	3,46	1,83	1,83
D2.2	172,36	3,47	1,84	1,84
D3.1	169,98	3,45	1,82	1,82
D3.2	7,08	1,81	0,19	0,19

Z hľadiska radiačnej záťaže sa jednoznačne javí ako **výhodné aplikovať preddemontážnu dekontamináciu**. Následné rozdiely medzi jednotlivými scenármi demontáže (v rámci scenára U1) sú minimálne. Z hľadiska množstva VNAO, NAO a materiálov uvoľniteľných do ŽP je účelné aplikovať aj podemontážnu dekontamináciu. Scenár U3 významne minimalizuje nároky na ukladanie RAO, na druhej strane je značne časovo náročný (skladovanie po dobu viac než 30 rokov v prípade implementácie nových limitov – Tab. 3.4). Je však potrebné znova zdôrazniť, že v prípade ukladania sekundárnych RAO z dekontaminácie je problematická predikcia ich množstva a aktivity. Na druhej strane koncepcia výpočtov umožňuje rýchle stanovenie dávkového zaťaženia v prípade známych údajov.

4.4 Ekonomické zhodnotenie procesu demontáže PG

Odhad nákladov procesu demontáže PG bol realizovaný prostriedkom OMEGA. Potrebné vstupné údaje (napr. hodinové sadzby, merné náklady na materiál a energie a podobne) sú implementované v samotnom prostriedku. Výpočty sa uskutočnili za nasledovných predpokladov:

- Náklady na demontážne činnosti PG sa považujú za nezávislé od scenárov demontáže. Je to z dôvodu, že pri výpočtoch sa zohľadňuje prácnosť na hmotnosť materiálu (člh/t).
- Pri skladovaní (scenár U3) sa uvažuje s ročnými nákladmi 45 €/sud.

Ako referenčný scenár sa uvažuje scenár U0, relatívne hodnoty sú uvedené v Tab. 4.10:

Tab. 4.10 Ekonomické zhodnotenie demontáže PG – náklady vztiahnuté k scenáru U0 (s. 16-17)

Scenár/Rok	Relatívne náklady		
	2015	2020	2025
Scenár U0 (bez dekontaminácie)	1,00	0,81	0,80
Scenár U1 (preddemontážna dekontaminácia)	0,80	0,80	0,80
Scenár U2 (pred- i podemontážna dekontaminácia)	1,01	1,01	1,01
Scenár U3 (pred- i podemontážna dekontaminácia)	1,19	1,17	1,15

Z údajov v Tab. 4.10 možno vyvodiť nasledovné závery:

- Časový pokles sa prejavuje len v scenároch U0 a U3. V prípade **scenáru U0** je to z dôvodu preklasifikovania kolektorov v roku 2020 z NAO na VNAO. Ukladanie tejto triedy RAO je vzhľadom na menšie nároky na inžinierske bariéry úložiska lacnejšie (podľa [37]) sú náklady na ukladanie VNAO približne 10-krát menšie ako pri ukladaní NAO). V prípade **scenáru U3** sa prejavuje zmena doby skladovania.
- Pri scenároch U1 a U2 je časový vplyv nulový. Je to z dôvodu, že náklady na spracovanie, úpravu a ukladanie RAO sa nemenia, keďže trieda predmetných RAO je stále rovnaká (mení sa iba radiačná situácia).
- Porovnaním scenára U1 a U2 dochádza pri scenári U2 k nárastu relatívnych nákladov. Táto skutočnosť je dôsledkom spôsobu výpočtu nákladov na podemontážnu dekontamináciu, kde sú jednotkové náklady vzťahované nie na hmotnosť, ale na plochu dekontaminovaného materiálu. Celková teplovýmenná plocha PG je 2576,6 m² [17], čo sa následne prejaví na vyšších nákladoch na podemontážnu dekontamináciu teplovýmenných rúrok.

Z ekonomického hľadiska je teda najvýhodnejší scenár U1, avšak je zrejmé, že pri rozhodovaní o realizácii daných scenárov je nevyhnutné zohľadniť aj parametre analyzované a vyhodnotené v predošlých kapitolách.

5 Súhrn výsledkov, nových poznatkov, závery pre prax a rozvoj vednej disciplíny

Problematika demontáže parogenerátorov je neoddeliteľnou súčasťou procesu vyradovania jadrových elektrární z prevádzky s tlakovodnými reaktormi. Komplexnou analýzou súčasného stavu procesu vyradovania JE z prevádzky s dôrazom na demontáž veľkých komponentov sa zistilo, že napriek existujúcim praktickým skúsenostiam z demontáže a fragmentácie PG, publikované analýzy poskytujú výlučne všeobecné informácie alebo naopak podrobné analýzy sa týkajú komponentov odlišného typu, napr. PG vertikálnej konštrukcie alebo iné špecifické zariadenia.

Je teda zrejmé, že v súčasnosti absentuje komplexná analýza procesu demontáže horizontálnych PG v rámci vyradovania JE z prevádzky.

Predkladaná dizertačná práca preto hodnotí proces demontáže parogenerátora použitého v jadrovej elektrárni s reaktorom typu VVER 440. Výsledky práce možno rozdeliť nasledovne:

- Vonkajšie ožiarenie
- Vnútorne ožiarenie
- Vplyvy na obyvateľstvo a ŽP
- Zhodnotenie z pohľadu tvorby RAO a analýza množstva materiálov uvoľniteľných do ŽP
- Stanovenie relatívnych nákladov.

Vypracované scenáre demontáže PG umožňujú ich vzájomné porovnanie a analýzu. Ukazuje sa, že v prípade **realizácie priečneho rezania PG** (scenár D2) je **celková kolektívna efektívna dávka približne 60% z príslušnej hodnoty pre scenár D1** (pozdĺžne rezanie). **Najnižšie ožiarenie** je pre prípad diaľkovej demontáže i fragmentácie v boxe PG, aplikácia tohto scenára je však závislá od technických možností jeho realizácie. Napriek uvažovaným konzervatívnym predpokladom je **príspevok vnútorného ožiarenia** k celkovej efektívnej dávke iba **minimálny** (najviac 1%). Celkové zhodnotenie scenárov jednoznačne hodnotí **aplikáciu dekontaminačných technológií ako výhodnú**, tak z hľadiska minimalizácie ožiarenia, ako aj manažmentu RAO. Predpokladá sa totiž, že po aplikácii **preddemontážnej dekontaminácie s dekontaminačným faktorom 100** bude možné uvoľnenie kolektorov do ŽP, čím sa **ušetrí približne 25 t ocele**. Pokiaľ by sa aplikovala aj **podemontážna dekontaminácia s dekontaminačným faktorom 10**, bolo by možné **preklasifikovať teplovýmenné rúrky** z nízkoaktívneho RAO na **veľmi nízkoaktívny RAO**. Týmto by sa **ušetrili nároky na úložné kapacity** v povrchovom úložisku nízkoaktívnych RAO v predpokladanom počte **25 vláknobetónových kontajnerov**. Na druhej strane je však nevyhnutné zohľadniť aj ekonomickú náročnosť procesu dekontaminácie (stanovením relatívnych nákladov). Ukazuje sa, že v prípade aplikácie len preddemontážnej dekontaminácie dôjde k približne 20%-nému poklesu celkových nákladov (vzhľadom na referenčný scenár U0 bez dekontaminácie). **Aplikácia aj podmontážnej dekontaminácie** však spôsobí **nárast relatívnych nákladov o približne 20, resp. 30%**. Uvoľnenie všetkých materiálov do ŽP je silne závislé tak od kvalitatívnej a kvantitatívnej zložky zdrojového člena, ako aj od príslušných limitov. Možno skonštatovať, že v prípade **implementácie nových limitov** (Smernica Rady 2013/59/EURATOM) bude možné **teplovýmenné rúrky** ako najviac kontaminovaný materiál **uvoľniť do ŽP až v roku 2056**.

Z hľadiska hodnotenia vplyvov na obyvateľstvo a ŽP sa preukázalo, že **demontáž PG** tepelnými deliacimi technológiami produkujúcimi aerosóly (so rozdiel od technológií mechanického delenia) **neohrozuje obyvateľstvo** v blízkom i širšom okolí z pohľadu radiačného vplyvu, keďže **maximálna kolektívna efektívna dávka je 1,95 manpSv, maximálna individuálna dávka v obývanom regióne je 0,24 nSv** a maximálna individuálna dávka v neobývanom regióne je 0,30 nSv. **Cezhraničné vplyvy** sú približne **o rád nižšie** ako maximálne kolektívne efektívne dávky.

Konzervatívne predpoklady, z ktorých sa vychádzalo pri realizácii výpočtov, zabezpečujú, že v reálnych situáciách by nemalo dôjsť k prekročeniu stanovených hodnôt.

Vykonané citlivostné analýzy kvantifikujúce vplyvy variabilných vstupných parametrov na sledované výsledky (tieniaca stena, príp. dodatočné tienenia či odlišné konfigurácie sudov vo VBK) umožňujú návrh optimalizačných riešení na minimalizáciu ožiarenia v zmysle princípu ALARA. Tieniaca stena má za následok iba približne 1%-ný pokles kolektívnej efektívnej dávky. Na druhej strane **prídavné tieniace dosky** (položené na teplovýmenné rúrky počas ich rezania, resp. fragmentácie) majú u jednotlivých pracovníkov za následok **pokles** príkonu efektívnej dávky o približne **13 %** (scenár D1 – pozdĺžne rezanie PG) resp. o **25 %** (scenár D2 – priečne rezanie PG).

Z dôvodu problémov týkajúcich sa správnosti vstupných údajov (najmä aktivita a nuklidový vektor, ktoré sú odhadované) bola vytvorená metodika výpočtu vonkajšieho ožiarenia. Vytvorená metodika výpočtu vonkajšieho ožiarenia umožňuje flexibilitu pri zmene zdrojového člena (aktivita a nuklidové zloženie), a to vylúčením nutnosti opätovného zadávania zdrojových údajov do výpočtového modelu a opakovaní výpočtov. Zároveň je z dôvodu analýzy viacerých scenárov umožnená určitá modularnosť, t.j. kombinovanie rôznych technických riešení procesu demontáže.

Z pohľadu prínosov sú teda výsledky uvedené v práci využiteľné nielen v rámci vyradovania JE v SR, ale aj v prípade podobných prevádzkovaných alebo odstavených reaktorov (arménska JE, bulharská JE Kozloduj, česká JE Dukovany, fínska JE Loviisa, nemecká JE Greifswald, maďarská JE Paks, ruské JE Kola a Novovoronež či ukrajinská JE Rovno), v ktorých sa v budúcnosti demontáž PG stane aktuálnym problémom.

Použitá literatúra

- [1] RAHMAN, A.: *Decommissioning and Radioactive Waste Management*. Dunbeath: Whittles Publishing, 2008. ISBN 978-1904445-45-6.
- [2] Zákon NR SR z 9. septembra 2004 o mierovom využívaní jadrovej energie (atómový zákon). Zbierka zákonov č. 541/2004.
- [3] International Atomic Energy Agency. *Radioactive Waste Management Glossary*. Vienna: IAEA, 2003. ISBN 92-0-105303-7.
- [4] DANIŠKA, V.: *Príspevok k metodike výpočtového oceňovania parametrov vyradovania jadrových zariadení z prevádzky, Dizertačná práca*. Bratislava: FEI STU, 2000.
- [5] Organisation for Economic Co-operation and Development – Nuclear Energy Agency. Radioactive Waste Management Committee. The Management of Large Components from Decommissioning to Storage and Disposal: A report of the Task Group on Large Components of the NEA Working Party on Decommissioning and Dismantling (WPDD). NEA/RWM/R(2012)8. Paris: OECD/NEA, 2012.

- [6] KNAACK, M.: *Dismantling of Large Components*. [online]. [cit. 18. január 2016]. Dostupné na internete: <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/WTS-Networks/IDN/idnfiles/WkpPlanLicencingDecomProjetc_Germany2012/WkpPlanLicencingDecomProjetc_Germany2012-Dismantling_Large_Components-Knaack.pdf>.
- [7] International Atomic Energy Agency. *Nuclear Power Reactors in the World: Reference Data Series No. 2*. Vienna: IAEA, 2016. ISBN 978-92-0-103716-9.
- [8] STEINER, H. EICKELPASCH, N., TEGETHOFF, H.: Experience with the dismantling of three secondary steam generators in unit A Gundremmingen by the 'ice sawing' technique. In *Nuclear Engineering and Design*, 1997, vol. 170, pp. 165-173.
- [9] The Greifswald Decommissioning Project: Strategies, Implementation, Future. Energiewerke Nord GmbH June 2011. [online]. [cit. 6. máj 2013]. Dostupné na internete: <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/WTS-Networks/IDN/idnfiles/CuttingTechniqueWkp-Germany2011/EWN_Project_Overview_06_2011.pdf>.
- [10] REHS, B.: Decommissioning in Germany: Greifswald NPPs, 12th Meeting of the Working Party on Decommissioning and Dismantling (WPDD), 15th-17th November 2011, Paris. [online]. [cit. 18. január 2016]. Dostupné na internete: <http://www.oecd-neo.org/rwm/wpdd/10/documents/11_Decommissioning_Story_Greifswald_Rehs.pdf>.
- [11] MARTÍN, N., RODRÍGUEZ, M.: Update on José Cabrera NPP Decommissioning. In *International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management ICM2011, September 25-29, 2011, Reims, France*. ICM2011-59322.
- [12] HICKMAN, J.: Rancho Seco Biennial Report. [online]. [cit. 18. Január 2016]. Dostupné na internete: <<http://pbdupws.nrc.gov/docs/ML0615/ML061530308.pdf>>.
- [13] BONAFIGO, L. et al.: Radioactivity release and dust production during the cutting of the primary circuit of a nuclear power plant: The case of E. Fermi NPP. In *Progress in Nuclear Energy*, 2010, vol. 52, pp. 359-366.
- [14] SIMONIS, A., POSKAS, P., POSKAS, G.: Prediction of Radiation Doses during the Dismantling of the Pressurized Tank from Emergency Core Cooling System of RBMK-1500 Reactor. In: *Proceedings of the ASME 2013 15th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management ICM2013, September 8-12, 2013, Brussels, Belgium*. ICM2013-96220.
- [15] RAGAIŠIS, V., POŠKAS, P., ŠIMONIS, A.: Methodology for the scoping assessment of radioactive releases during dismantling of RBMK-1500 reactor systems with low-level contamination. In: *Annals of Nuclear Energy*, 2015, vol. 75, pp. 193-198.

- [16] SIMONIS, A., POSKAS, P., POSKAS, G., GRIGALIUNIENE, D.: Modeling of the radiation doses during dismantling of RBMK-1500 reactor emergency core cooling system large diameter pipes. In: *Annals of Nuclear Energy*, 2015, vol. 85, pp. 159-165.
- [17] International Atomic Energy Agency: Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: Steam generators, IAEA-TECDOC-981. Vienna: IAEA, 1997.
- [18] Jadrová a vyrad'ovacia spoločnosť: Zámer podľa zákona č. 24/2006 Z. z. o posudzovaní vplyvov na životné prostredie v znení neskorších predpisov – 2. ETAPA VYRAĐOVANIA JADROVEJ ELEKTRÁRNE V1 JASLOVSKÉ BOHUNICE, Jún 2013.
- [19] PHILIPP, M.: Die Energiewerke Nord GmbH – Der Weg vom Betreiber eines stillgelegten russischen Kernkraftwerkes zu einem führenden Stilllegungsunternehmen in Europa. In *International Journal for Nuclear Power*, ISSN 1431-5254, 2011, vol. 56, no. 3, pp. 160-164.
- [20] International Atomic Energy Agency. *Radiological Characterization of Shut Down Nuclear Reactors for Decommissioning Purposes: Technical Reports Series No. 389*. Vienna: IAEA, 1998. ISBN 92-0-103198-X.
- [21] Osobná konzultácia s Michaelom Knaackom zo spoločnosti TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG dňa 30.10.2014 v rámci semináru "IAEA Interregional Workshop on Technologies for Nuclear Decommissioning Projects" konanom v dňoch 27. – 31. októbra 2014 v Karlsruhe, Nemecko.
- [22] E-mailová konzultácia s Christianom Topfom zo spoločnosti AREVA GmbH (12.9.2014 – 23.10.2014).
- [23] International Atomic Energy Agency. *Determination and Use of Scaling Factors for Waste Characterization in Nuclear Power Plants: IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.18*. Vienna: IAEA, 2009. ISBN 978-92-0-110808-1.
- [24] TRUBEY, D., UNGER, L.: Specific Gamma-Ray Dose Constants for Nuclides Important to Dosimetry and Radiological Assessment. Oak Ridge National Laboratory: 1981. ORNL/RSIC-45.
- [25] International Atomic Energy Agency: Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance – Safety Reports Series No. 44. Vienna, IAEA, 2005.
- [26] European Commission: Practical Use of the Concepts of Clearance and Exemption – Part I, Guidance on General Clearance Levels for Practices. Luxembourg, 2000.
- [27] Nariadenie vlády Slovenskej republiky z 10. mája 2006 o základných bezpečnostných požiadavkách na ochranu zdravia pracovníkov a obyvateľov pred ionizujúcim žiarením. Zbierka zákonov č. 345/2006.

- [28] ANIGSTEIN, R., et al.: Radiological Assessments for Clearance of Materials from Nuclear Facilities – Main Report. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2003. NUREG-1640.
- [29] VERMEERSCH, F.: Dose Assessment and ALARA Calculation with VISIPLAN 3D ALARA Planning tool. Training Course, IDPBW Nuclear Studies, Boeretang: SCK.CEN, Belgium, 2005.
- [30] The MathWorks, Inc.: MATLAB – Getting Started Guide.
- [31] ČARNÝ, P., et al.: ESTE AI verzia 3.51, V-2. Uživatelský manuál. ABmerit – nuclear science and software: Trnava, Marec 2014.
- [32] REHÁK, I., PRÍTRSKÝ, J.: Manuál pre prácu s prostriedkom OMEGA – Oracle Multicriterial General Assessment of Decommissioning. Trnava: DECOM Slovakia spol. s r. o., 2004.
- [33] ROHDE, M.: Treatment and Conditioning of Dismantled Material and Operation Waste in EWN, Overview. [online]. [cit. 18. január 2016]. Dostupné na internete: <<http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/WTS-Networks/IDN/idnfiles/CuttingTechniqueWkp-Germany2011/Treatment-and-Conditioning-of-DismantledMaterial-and-OperationWaste.pdf>>.
- [34] Katalog výrobků. Divize Bezděkov, 2011. [online]. [cit. 18. január 2016]. Dostupné na internete: <http://www.mevatec.cz/public/import_produkty2/flash/meva_bezdekov/meva%20bezdekov.html>.
- [35] Vyhláška Úradu jadrového dozoru Slovenskej republiky z 30. januára 2012, ktorou sa ustanovujú podrobnosti o požiadavkách pri nakladaní s jadrovými materiálmi, rádioaktívnymi odpadmi a vyhoretým jadrovým palivom. Zbierka zákonov č. 30/2012.
- [36] Smernica Rady 2013/59/EURATOM z 5. decembra 2013, ktorou sa stanovujú základné bezpečnostné normy ochrany pred nebezpečenstvami vznikajúcimi v dôsledku ionizujúceho žiarenia, a ktorou sa zrušujú smernice 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom a 2003/122/Euratom. Úradný vestník Európskej únie, 17.1. 2014.
- [37] DUTZER, M. et al. Disposal of very low level waste and safety assessment. In: Proceedings of an International Symposium on Disposal of Low Activity Radioactive Waste, Cordoba, Spain, 13-17 December 2004. Vienna: IAEA, 2005. ISBN 92-0-102905-5, pp.153-163.
- [38] TOPF, CH. et al.: Full System Decontamination at German Nuclear Power Plant Unterweser. In *International Journal for Nuclear Power*, ISSN 1431-5254, 2013, vol. 58, no. 4, pp. 216-220.
- [39] TOPF, CH.: Full System Decontamination at the Obrigheim Nuclear Power Plant Prior to Decommissioning. In *International Journal for Nuclear Power*, ISSN 1431-5254, 2007, vol. 52, no. 11, pp. 727-730.

- [40] STRÁŽOVEC, R. et al.: Selection of optimal treatment procedures for non-standard radioactive waste arising from decommissioning of NPP after accident. In *Nuclear Engineering and Design*, 301 (2016), pp. 391-401.
- [41] Republikové úložisko RAO v Mochovciach. [online]. [cit. 18 január 2016]. Dostupné na internete: <<http://www.javys.sk/sk/jadrove-zariadenia/republikove-ulozisko-radioaktivnych-odpadov/ru-rao>>.
- [42] TATRANSKÝ, P. et al.: Solidification of Spent Ion Exchange Resins into the SIAL® Matrix at the Dukovany NPP, Czech Republic. In International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management ICEM2013, September 8-12, 2013, Brussels, Belgium. ICEM2013-96045.
- [43] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: Assessment of the radiation impact of steam generator dismantling on the workers, public and environment. In: *Progress in Nuclear Energy* 91 (2016), pp. 345-354. ISSN: 0149-1970.

Publikované práce doktoranda

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

- [1] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: Dose estimation for steam generator dismantling. In: *Nuclear Engineering International*, Volume 60, No. 735 (October 2015), pp. 34-35. ISSN 0029-5507.
- [2] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: Assessment of the radiation impact of steam generator dismantling on the workers, public and environment. In: *Progress in Nuclear Energy* 91 (2016), pp. 345-354. ISSN: 0149-1970.

ADE Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch

- [3] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: Proces vyradovania jadrových elektrární z pohľadu demontáže veľkých komponentov – súčasný stav a problémy. In: *Bezpečnosť jaderné energie*, Roč. 21, č.7/8 (2013), s. 237-240. ISSN 1210-7085.
- [4] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: Hodnotenie možností ukladania rádioaktívnych odpadov z demontáže parogenerátora z pohľadu externého ožiarenia. In: *Bezpečnosť jaderné energie*, Roč. 22 (60), č.7/8 (2014), s. 237-241. ISSN 1210-7085
- [5] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: Calculation of external exposure during dismantling and segmentation of steam generator. In: *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. Tom 4, Nr. 4 (2014), Volume 4, Number 4, 2014, pp. 3-10. ISSN 2083-0157.
- [6] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: Metodika výpočtu príkonu efektívnej dávky pri variabilných vstupných parametroch. In: *Bezpečnosť jaderné energie*, Roč. 23 (61), č. 9/10 (2015), s. 308-312. ISSN 1210-7085.

- [7] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: Prediction of external exposure during dismantling of steam generator. In: *World Journal of Engineering and Technology*. Vol. 3, (2015), s. 155-162. ISSN 2331-4222.
- [8] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: Radičná situácia pri ukladaní odpadov z demontáže parogenerátora JE V1. In: *Bezpečnosť jadrovej energie*, Roč. 23 (61), č. 3/4 (2015), s. 101-107. ISSN 1210-7085.

ADF Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch

- [9] HORNÁČEK, M., ZACHAR, M., NEČAS, V.: Stanovenie dávkového zaťaženia od materiálov uvoľňovaných do životného prostredia z procesu vyradovania jadrových zariadení z prevádzky. In: *EE časopis pre elektrotechniku a energetiku*, Roč. 18, č. 4 (2012), s.12-13, 27. ISSN 1335-2547.
- [10] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: Analýza možných koncových stavov materiálov parogenerátora JE V1. In: *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie*, Roč. 20, č. 4 (2014), s. 15-17. ISSN 1335-2547.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- [11] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: *An Analysis of Nuclear Installations Decommissioning Process from the Perspective of Dismantling of Large Components*. In: Proceedings of the 4th International Youth Conference on Energy, 6-8 June, 2013, Siófok, Hungary. ISBN 978-1-4673-5554-4.
- [12] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: *An Analysis of Influence of Input Parameters on the External Exposure during Dismantling of Steam Generator*. In: Proceedings of the Eastern and Central Europe Decommissioning ECED 2013, 18-20 June, 2013, Trnava, Slovak Republic. ISBN 978-80-969943-9-7.
- [13] HORNÁČEK, M., NEČAS, V., BEZÁK, P.: *Calculation of the dose load during dismantling of large components in the process of decommissioning of nuclear installations*. In: Proceedings of the 15th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management ICEM2013, September 8-12, 2013, Brussels, Belgium. ISBN 978-0-7918-5602-4.
- [14] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: *The Analysis of the Process of Dismantling of Large Components used in Nuclear Power Plants from the Perspective of Radioactive Waste Disposal*. In: Regional Seminar on Radioactive Waste Disposal, October 8-9, 2013, Senec, Slovak Republic. ISBN 978-80-971498-0-2.
- [15] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: *Calculation of External Exposure during Transport and Disposal of Radioactive Waste arisen from Dismantling of Steam Generator*. In: European Nuclear Conference ENC2014, 11 – 14 May 2014, Marseille, France. ISBN 978-92-95064-21-8.

- [16] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: *An Analysis of the Process of Dismantling and Segmentation of Steam Generator from the Perspective of the External Exposure*. In: Proceedings of the 12th International Scientific Conference Energy-Ecology-Economy 2014, May 20-22, 2014, Tatranské Matliare, High Tatras, Slovak Republic. ISBN 978-80-89402-70-0.
- [17] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: *The use of codes VISIPLAN 3D ALARA and MATLAB for assessment of contributions from radiation sources within the decommissioning of nuclear power plants*. In: Proceedings of the 21st International Conference on Applied Physics of Condensed Matter (APCOM 2015) and of the Scientific Conference on Advanced Fast Reactors, June 24-26, 2015, Hotel Patria, Štrbské Pleso, Slovak Republic. ISBN 978-80-227-4373-0.
- [18] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: *The assessment of V1 NPP steam generator dismantling from the perspective of external exposure*. In: Proceedings of the Eastern and Central Europe Decommissioning ECED 2015, 23-25 June, 2015, Trnava, Slovak Republic. ISBN 978-80-971498-5-7.
- [19] SLUGEN, V., HORNÁČEK, M.: *European Decommissioning Academy – successful 1. run in June 2015*. In: Proceedings of the Eastern and Central Europe Decommissioning ECED 2015, 23-25 June, 2015, Trnava, Slovak Republic. ISBN 978-80-971498-5-7.
- [20] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: *The selected issues of back-end part of nuclear power engineering*. In: Proceedings of the 13th International Scientific Conference Energy-Ecology-Economy 2016, May 31 – June 2, Tatranské Matliare, High Tatras, Slovak Republic. ISBN 978-80-89402-85-4.
- [21] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: *Modelling of nuclear power plants decommissioning tasks – issues and their solution*. In: Proceedings of the 22nd International Conference on Applied Physics of Condensed Matter (APCOM 2016), June 22 – 24, 2016, Hotel Patria, Štrbské Pleso, Slovak Republic. ISBN 978-80-227-4572-7.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- [22] HORNÁČEK, M., ZACHAR, M., NEČAS, V.: *Hodnotenie procesu vyradovania jadrových zariadení z prevádzky z pohľadu pretavby materiálov*. In: XIII. Štiavnické dni: Banská Štiavnica, 2.-4.októbra 2012. Banská Štiavnica: Združenie pre reguláciu rizika z radónu, 2012. ISBN 978-80-971150-3-6.
- [23] JUHÁR, P., HORNÁČEK, M. (ved. práce), NEČAS, V. (ved. práce): *Prehľad spôsobov demontáže tlakovej nádoby reaktora*. ŠVOČ 2013: Zborník vybraných prác, Bratislava, FEI STU, 2013. s. 223-226. ISBN 978-80-227-3909-2.

- [24] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: *The Influence of Time on the Partial Activities of Dismantling of Steam Generator*. [CD-ROM]. ELITECH'13: 15th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 5.6.2013. Bratislava: STU v Bratislave, 2013. ISBN 978-80-227-3947-4.
- [25] JUHÁR, P., HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: *Výpočet obdržaných dávok počas činnosti súvisiach s demontážou koša aktívnej zóny*. ŠVOČ 2014: Zborník vybraných prác, Bratislava, FEI STU, 2014. CD-ROM, s. 170-175. ISBN 978-80-227-5154-5.
- [26] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: *Possible end states of materials arisen from dismantling of steam generator*. [CD-ROM]. ELITECH'14: 16th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 4.6.2014. Bratislava: STU v Bratislave, 2014. ISBN 978-80-227-4171-2.
- [27] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: *Metodika hodnotenia dávkového zaťaženia personálu počas ukladania odpadov z demontáže parogenerátora JE V1*. 14. Mikulášské setkání Mladé generace ČNS, Brno, 3.-5. 12. 2014. Brno: FSI VUT Brno, 2014. ISBN 978-80-02-02599-3.
- [28] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: *The issues of input data in the calculation of external exposure*. [CD-ROM]. ELITECH'15: 17th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 25.5.2015. Bratislava: STU v Bratislave, 2015. ISBN 978-80-227-4358-7.

BDF Odborné práce v ostatných domácich časopisoch

- [29] HORNÁČEK, M., ZACHAR, M., NEČAS, V.: *Analýza obalových súborov s materiálmi a RAO z procesu vyradovania JZ z prevádzky z pohľadu dávkového zaťaženia*. In: Posterus [online]. Vol. 5, Iss. 10 (2012). Dostupné na internete: < <http://www.posterus.sk/?p=13984> >. ISSN 1338-0087.
- [30] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: *Problematica demontáže veľkých komponentov v procese vyradovania jadrových elektrární z prevádzky a jej hodnotenie z pohľadu dávkového zaťaženia*. In: *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie*, Roč. 19, č. 4 (2013), s.12-13. ISSN 1335-2547.

BEE Odborné práce v zahraničných zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

- [31] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: *Stručný prehľad problematiky demontáže veľkých komponentov v procese vyradovania jadrových elektrární z prevádzky*. 12. Mikulášské setkání Mladé generace ČNS, Brno, 5.-7. 12. 2012. Brno: FSI VUT Brno, 2012. ISBN 978-80-02-02439-2.
- [32] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: *Hodnotenie možností ukladania častí parogenerátora jadrovej elektrárne V1*. In *Elektronický sborník prezentací z konferencie NUSIM 2014 [elektronický zdroj]*, 2014, CD-ROM, [16] s. ISBN 978-80-02-02575-7.

- [33] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: *Optimalizácia ukladania rádioaktívnych odpadov z demontáže parogenerátora z pohľadu externého ožiarenia*. 13. Mikulášské setkání Mladé generace ČNS, Brno, 4.-6. 12. 2013. Brno: FSI VUT Brno, 2013. ISBN 978-80-02-02513-9.

BEF Odborné práce v domácich zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

- [34] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: *Scenáre nakladania s veľkými komponentmi v rámci procesu vyradovania jadrových elektrární z prevádzky a možnosti ich realizácie v Slovenskej republike*. In: Odborná konferencia Mladej generácie Slovenskej nukleárnej spoločnosti. Častá-Papiernička, 25. apríl 2014. ISBN 978-80-971498-2-6.

Ostatné príspevky prezentované na konferenciách a seminároch

- [35] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: The evaluation of external exposure during the disposal of steam generator components. Prezentácia v rámci Regional Seminar on Radioactive Waste Disposal, October, 20-22, 2014, Budapest, Hungary.
- [36] HORNÁČEK, M., NEČAS, V.: *The impact of steam generator dismantling scenarios on the radioactive waste disposal*. International Conference on Advancing the Global Implementation of Decommissioning and Environmental Remediation Programmes. (abstrakt a poster)

SUMMARY

The assessment methodology of decommissioning of large components used in nuclear power plants

The dismantling of steam generators represent an inevitable part of decommissioning of nuclear power plants with pressurised water reactors. The complex analysis of the current state shows that there is some experience of steam generators's dismantling and fragmentation. However, the published analyses provide general information only or are dealing with specific components (e.g. vertical steam generators or other specific components). It is obvious that currently there is a gap in the analyses regarding the dismantling and fragmentation of horizontal steam generators used in nuclear power plants with VVER-440 reactor type.

The dissertation thesis therefore deals with this component and provides the calculation methodologies which lead to calculation of external and internal exposures, assessment of the impact on the public, analyses regarding the resulting radioactive waste as well as economic analysis.

The created steam generator's dismantling scenarios are compared and analyses. One of the main results is that in the case of transversal cutting of steam generator (scenario D2) the total collective effective dose represents about 60% of the relevant value of scenario D1 (horizontal cutting). The lowest exposure can be observed in the case of remote dismantling and fragmentation in the steam generator box. However, the realisation of this scenario is dependent on the technical possibilities. Despite the conservative assumptions considered in the calculation of internal exposure the contribution to the total exposure is minimal (maximal of 1%). The general overview of the considered scenarios of dismantling and radioactive waste management clearly demonstrates the advantage of decontamination techniques' application. It can be expected that after application of pre-dismantling decontamination with decontamination factor of 100 the collectors can be released to the environment. This results in approx. 25 t of steel which can be reused. If also the post-dismantling decontamination with decontamination factor of 10 will be applied, the heat exchange tubes can be considered as very-low level waste. This de-classification can save 25 fibre-concrete containers which otherwise would be disposed in low-level waste repository. On the other hand, also the financial point of view has to be taken into account in the case of decontamination (estimated relative costs). The results show that in the case when only pre-dismantling decontamination would be applied, about 20% decrease of the total costs can be expected (related to the reference scenario U0 without any decontamination). When also the post-dismantling decontamination will be applied, the relative costs will increase in approx. 20 or 30% respectively. The release of the materials to the environment is strongly dependent from the source term as well as from the relevant limits. It can be stated that in the case of implementation of new limits (Directive 2013/59/EURATOM) the heat exchange tubes as the most contaminated material can be released to the environment in 2056.

The analyses of the impact on the public show that the steam generator's dismantling process realised by thermal cutting techniques does not endanger the public neither in close nor in the distant regions as the maximal collective effective dose is 1,95 manµSv, the maximal individual dose in inhabited region is 0,24 nSv and the maximal individual dose in non-inhabited region is 0,30 nSv. The interregional impacts are about one order of magnitude lower than the maximal collective effective doses. The

conservative assumptions considered in the calculations ensure that in the real case the calculated values will not be exceeded.

The realised sensitivity analyses which quantify the influence of the variable input parameters on the results (shielding wall, additional shieldings, or different configurations of drums within fibre-concrete container) enable the proposal of optimisation solutions in order to minimise the exposure in accordance with the ALARA principle. The shielding wall results in only 1% decrease of the total collective effective dose. On the other hand, the additional shielding plates (put on the heat exchange tubes during their cutting or fragmentation respectively) lead to about 13% (scenario D1 – horizontal cutting of steam generator) or 25% (scenario D2 – transversal cutting of steam generator) decrease of the dose rate.

The problems regarding the accuracy of the input data (especially activity and nuclide vector which are estimated values) the methodology of external exposure calculation was developed. The presented methodology for the calculation of external exposure is flexible and the calculated dose rates related to ^{60}Co allow fast recalculation when the source term (nuclide vector and activity content) are changed for instance because of in-situ measurements. Moreover, this methodology can be used not only within the current decommissioning project of NPP V1 in Jaslovské Bohunice but also in the case of similar operating or shut-down reactors (Armenian NPP, Bulgarian NPP Kozloduy, Czech NPP Dukovany, Finnish NPP Loviisa, German NPP Greifswald, Hungarian NPP Paks, Russian NPPs Kola and Novovoronezh or Ukrainian NPP Rovno) where the dismantling of SGs will become also a topical issue.