

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

**Ing. Tomáš Hrnčíř**

Autoreferát dizertačnej práce

**PODMIENENÉ UVOĽŇOVANIE MATERIÁLOV Z VYRAĎOVANIA JE  
S NÁSLEDNÝM VYUŽITÍM V TUNELOVÝCH KONŠTRUKCIÁCH**

**na získanie akademického titulu philosophiae doctor**

**v doktorandskom študijnom programe:**

**5.2.31 Jadrová energetika**

**Bratislava, august 2012**

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

**Predkladateľ:** **Ing. Tomáš Hrnčír**  
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:** **prof. Ing. Vasil Koprda, DrSc.**  
Slovenská technická univerzita v Bratislave,  
Fakulta chemickej a potravinárskej technológie,  
Ústav chemického a environmentálneho inžinierstva,  
Radlinského 9, 812 37 Bratislava

**RNDr. Peter Gerhart, PhD.**  
Jadrová a vyrad'ovacia spoločnosť, a.s.,  
Odbor 4210,  
Tomášikova 22, 821 02 Bratislava

**Autoreferát bol rozoslaný:** .....

**Obhajoba dizertačnej práce sa koná .....o .....h.  
na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19,  
Bratislava v zasadačke dekana, blok A, 1. poschodie.**

doc. RNDr. Gabriel Juhás, PhD.  
dekan fakulty  
Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

## OBSAH

ÚVOD .....	4
1. SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY .....	6
2. CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE .....	9
3. ZVOLENÁ METÓDA SPRACOVANIA.....	10
3.1 <i>Určenie nuklidového vektora obsiahnutého v podmienene uvoľnenej oceli.....</i>	<i>11</i>
3.2 <i>Identifikácia možných ciest ožiarenia.....</i>	<i>12</i>
3.2.1 INHALÁCIA .....	14
3.2.2 INGESCIA.....	14
3.2.3 KONTAMINÁCIA KOŽE .....	15
3.2.4 EXTERNÉ OŽIARENIE.....	16
3.3 <i>Popis využívaných výpočtových prostriedkov na ohodnotenie rádiologických vplyvov.....</i>	<i>16</i>
3.4 <i>Odvodenie uvoľňovacích úrovní.....</i>	<i>17</i>
3.5 <i>Určenie množstva podmienene uvoľniteľných materiálov .....</i>	<i>17</i>
4. VÝSLEDKY DIZERTAČNEJ PRÁCE S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKOV .....	18
4.1 <i>Ohodnotenie rádiologického vplyvu využitia podmienene uvoľnenej ocele.....</i>	<i>18</i>
4.2 <i>Odvodenie nových uvoľňovacích úrovní pre analyzované rádionuklidy.....</i>	<i>19</i>
4.3 <i>Určenie podmienene uvoľniteľného množstva kovových materiálov pochádzajúcich z vyradovania JE A1 a V1 .....</i>	<i>21</i>
4.3.1 URČENIE MNOŽSTVA PODMIENENE UVOĽNITEĽNÝCH MATERIÁLOV Z JE A1.....	21
4.3.2 URČENIE MNOŽSTVA PODMIENENE UVOĽNITEĽNÝCH MATERIÁLOV Z JE V1.....	22
4.4 <i>Analýza ocenenia zisku/nákladov.....</i>	<i>22</i>
4.5 <i>Optimalizačný scenár – zníženie množstva využitej VNRO.....</i>	<i>23</i>
5. SÚHRN VÝSLEDKOV A NOVÝCH POZNATKOV, ZÁVERY PRE PRAX A ĎALŠÍ ROZVOJ VEDNEJ DISCIPLÍNY .....	27
POUŽITÁ LITERATÚRA .....	31
PUBLIKOVANÉ PRÁCE AUTORA SÚVISIACE S PROBLEMATIKOU DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	33
SUMMARY .....	37

## ÚVOD

Jadrové zariadenia (JZ) zastávajú významné miesto v súčasnom rozvoji energetiky, vedy a výskumu. Avšak aj jadrové zariadenia, ako každé technologické zariadenia, sú limitované dobou ich životnosti a v určitom čase je potrebné pristúpiť k záverečnej fáze životného cyklu každého jadrového zariadenia – k vyradovaniu jadrového zariadenia. Problematika vyradovania jadrových zariadení sa stáva čoraz viac aktuálnou doma aj v zahraničí s prihliadnutím na fakt, že v blízkej dobe bude potrebné vyradiť značné množstvo jadrových elektrární a celý rad jadrových výskumných zariadení.

Avšak na rozdiel od bežných technologických zariadení, jadrové zariadenia po ukončení prevádzky obsahujú široký inventár rádioaktívnych (RA) materiálov s rôznou úrovňou v nich viazanej rádioaktivity. Spomenutá rádioaktivita sa v procese vyradovania odstraňuje optimálnym spôsobom pomocou rôznych techník a postupov tak, aby mala minimálny vplyv na zdravie a bezpečnosť pracovníkov zúčastnených v procese vyradovania, obyvateľstva a životné prostredie. V procese vyradovania vzniká značné množstvo rádioaktívnych (RA) materiálov, ktoré sa v rozličnej forme a množstvách dostávajú do životného prostredia (ŽP). Časť materiálu je možné bez akéhokoľvek rizika, po splnení legislatívne daných limitov, uvoľniť do životného prostredia pre neobmedzené využitie, prípadne sú vznikajúce materiály odvázané na príslušné skládky, ak sa jedná o odpad nebezpečný z iných dôvodov ako je jeho rádioaktivita. Ak materiály nespĺňajú spomínané legislatívne limity, nasleduje ich spracovanie, úprava a uloženie vo vhodnom type úložiska rádioaktívnych odpadov podľa úrovne viazanej aktivity, ktoré zabezpečí dostatočne dlhú izoláciu rádioaktívnych odpadov od životného prostredia.

V súčasnosti je na medzinárodnej úrovni podporovaný koncept uvoľňovania a recyklácie a opätovného využitia materiálov pochádzajúcich z jadrových zariadení s cieľom ušetriť finančné prostriedky, či už na strane činností a kapacít spojených s ukladaním týchto materiálov do vhodných typov úložísk rádioaktívnych odpadov, alebo na strane nákladov spojených s ťažbou nových materiálov, ktoré by nahradili ukladané materiály. Témou uvoľňovania rádioaktívnych materiálov do životného prostredia sa venuje množstvo dokumentov vydávaných medzinárodnými organizáciami [1-14]. Neoddeliteľnou súčasťou procesu uvoľňovania by mala byť analýza ocenenia nákladov, resp. výhod alebo nevýhod, vyplývajúcich z jednotlivých scenárov uvoľňovania materiálov s cieľom vybrať optimálnu možnosť.

Jedným z množstva uvažovaných možností je tzv. koncept podmieneného uvoľňovania. Podmienené uvoľňovanie (PU) predstavuje výhodné riešenie manažmentu značného množstva rádioaktívnych materiálov vznikajúcich v procese vyradovania, ktorých aktivita je tesne nad hranicou legislatívne stanovených limitov hmotnostnej aktivity pre nepodmienené uvoľnenie (NU).

Podmienené uvoľnenými materiálmi do ŽP by mali byť najmä pevné kovové rádioaktívne materiály, ktoré boli súčasťou potrubí, alebo technologických zariadení. Značné množstvo materiálov, prevažne kovov, vzniknutých počas vyradovania jadrových zariadení je zvyčajne kontaminované iba rádionuklidmi s relatívne krátkymi dobami polpremeny. Tieto materiály je

vhodné využiť na špecifický priemyselný účel, kde sa predpokladá dlhodobá viazanosť krátkožijúcich rádionuklidov na jednom mieste, ktorá zabezpečí výrazne zníženie rádioaktivity umiestnenej v danom materiáli počas doby fixácie.

Dávkové limity pre uvoľňovanie rádioaktívnych materiálov do ŽP sú rovnaké pre podmienené aj nepodmienené uvoľňovanie, vychádzajúc z princípu zabezpečenia ochrany zdravia jednotlivcov, resp. udržania úrovne rizika vyplývajúceho z uvoľňovania RA materiálov na zanedbateľnej úrovni. Je potrebné spomenúť, že základný rozdiel medzi podmieneným a nepodmieneným uvoľňovaním spočíva vo využití podmienene uvoľneného materiálu na vopred špecifický účel, kde existuje možnosť vytvorenia nových uvoľňovacích úrovní vyšších ako hodnoty aktivitných limitov uvedených v legislatíve. Možnosť zvýšenia je daná hlavne faktom, že aktivitné limity pre nepodmienené uvoľňovanie sú stavané robustne, t.j. mali by zabezpečiť neprekročenie dávkových limitov ani v najhoršom možnom uvažovanom scenári z hľadiska radiačnej ochrany.

Podmienené uvoľňovanie umožňuje účelné využitie značného množstva pevných materiálov vznikajúcich v procese vyradovania. Recykláciou a znovu využitím týchto materiálov sa ušetrí časť priestorov úložísk, kde by inak tieto materiály boli uložené ako rádioaktívny odpad, a nákladov spojených so spracovaním, upravovaním a ukladaním týchto materiálov do úložísk. V neposlednom rade sa ušetria aj materiály samotné. Tieto môžu byť opätovné využité v špeciálnych vopred určených aplikáciách, čím sa znížia náklady na ťažbu a spracovanie nových materiálov do požadovanej formy.

Výsledky dizertačnej práce sú súčasťou riešenia projektov Vedeckej grantovej agentúry VEGA 1/0685/09 a Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky - projekt CONRELMAT (rozhodnutie č. CD-2009-36909/39460-1:11).

# 1. SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Proces uvoľňovania materiálov do ŽP je dôležitou súčasťou manažmentu rádioaktívnych materiálov. V súčasnosti je na neho kladený značný dôraz, pretože môže na jednej strane ušetriť nemalé finančné prostriedky, ktoré by boli použité na spracovanie a finálne uloženie takýchto materiálov do vhodných úložísk alebo na druhej strane, v špeciálnych prípadoch (napr. v prípade rôznych druhov kovov a ich zliatin), viesť k ušetreniu energie a hodnotného surového materiálu, ktorý by musel byť inak vyťažený, aby sa pokryla strata vzniknutá likvidáciou týchto materiálov. Avšak uvoľňované materiály musia spĺňať určité podmienky, ktoré zabezpečia, že riziko ohrozenia populácie alebo životného prostredia prostredníctvom týchto materiálov je zanedbateľné.

Požiadavky na ochranu zdravia jednotlivcov pred účinkami ožiarenia ionizujúcim žiarením a požiadavky súvisiace s bezpečnosťou zdrojov žiarenia sú bližšie popísané v dokumente „Medzinárodné základné bezpečnostné normy pre ochranu pred ionizujúcim žiarením a pre bezpečnosť zdrojov žiarenia“ (BSS) [15] vychádzajúcom z dostupných informácií o škodlivých účinkoch ožiarenia. BSS sú určené pre poskytnutie základných princípov pre reguláciu činností vedúcich v ožiarení ako aj reguláciu možných vzniknutých nápravných opatrení. Dokument BSS takisto tvorí základ pre vznik mechanizmu konceptov vylúčenia („exclusion“), vyňatia („exemption“) a uvoľnenia („clearance“). V súčasnosti sa pripravuje revízia BSS, ktorá sa začala v roku 2006.

Koncom roka 2011 boli agentúrou vydané nové BSS [16], avšak ide zatiaľ iba o dočasnú verziu, ktorej náplň sa ešte môže meniť. Momentálne prebiehajú pracovné stretnutia so zástupcami jednotlivých krajín, počas ktorých sa diskutuje implementácia novej verzie dokumentu BSS spolu s cieľom identifikovať oblasti, kde v je potrebné ešte odporúčania rozšíriť, resp. spresniť. V dokumente sa nenachádzajú výrazne zmeny v koncepte uvoľňovania materiálov do ŽP, avšak je možné vidieť trend vedúci k sprísneniu uvoľňovacích úrovní mernej hmotnostnej aktivity niektorých rádionuklidov pre nepodmienené uvoľňovanie. Záväzným dokumentom pre členské štáty EÚ je v súčasnosti Smernica rady č. 96/29/EURATOM z 13. mája 1996, ktorá stanovuje základné bezpečnostné normy ochrany zdravia pracovníkov a obyvateľstva pred nebezpečenstvami vznikajúcimi v dôsledku ionizujúceho žiarenia [17].

V nasledujúcich tabuľkách je stručne popísaný prehľad prístupov a dokumentov jednotlivých organizácií ako Medzinárodná agentúra pre atómovú energiu (MAAE), Agentúra pre jadrovú energiu (NEA/OECD), Európska komisia (EK) a Komisia jadrového dozoru Spojených štátov amerických (US NRC), zaoberajúcich sa uvoľňovaním a vyňatím materiálov spod radiačnej kontroly. Témou uvoľňovania rádioaktívnych materiálov a radiačnou ochranou jednotlivcov sa zaoberá značné množstvo dokumentov, ktoré by nebolo možné všetky v dostatočnej miere popísať v rozsahu dizertačnej práce. Z tohto dôvodu boli vybrané na bližšie popísanie len tie najdôležitejšie potrebné pre vytvorenie si komplexného pohľadu na súčasný stav problematiky uvoľňovania rádioaktívnych materiálov do životného prostredia.

**Tab. 1.1** Dokumenty vydané US NRC zaoberajúce sa problematikou uvoľňovania RA materiálov do ŽP

<b>Dokument (rok vydania)</b>	<b>Stručný obsah dokumentu</b>
The Disposition Dilemma – Controlling the Release of Solid Materials from Nuclear Regulatory Commission-Licensed Facilities (2002) [18]	Dokument bol vydaný komisiou vytvorenou Národnou radou pre výskum v USA, ktorý sa venuje možnostiam nakladania s veľmi nízkoradioaktívnymi odpadmi (VLLW), pričom sú v ňom uvedené aj výsledné odporúčania pre US NRC vyplývajúce z vykonanej analýzy.
Radiological Assessments for Clearance of Materials from Nuclear Facilities NUREG-1640 (2003) [19]	Dokument obsahuje komplexný popis vykonaných výpočtov a dosiahnutých výsledkov odhadovaných ročných obdržaných efektívnych dávok jednotlivcami spôsobených ožiarení z materiálov uvoľnených z JZ v USA. Uvažované uvoľnené materiály z jednotlivých JZ licencovaných dozorným orgánom US NRC sú oceľ, meď, hliník a stavebná sutina. Výsledok obdržaných dávok bol dosiahnutý pravdepodobnostnými výpočtami z dôvodu uvažovania veľkého množstva možných variácií pri každom z 86 vytvorených scenárov nakladania s týmito materiálmi. Výsledok spomínanej správy predstavujú prehľadné tabuľky obsahujúce ročné maximálne hodnoty dávkových ekvivalentov a efektívnych dávok pre povrchovú aj hmotnostnú aktivitu jednotlivých uvažovaných rádionuklidov obsiahnutých v danom type uvoľňovaného materiálu spolu so scenárom, v ktorom bola dosiahnutá najvyššia hodnota dávky.

**Tab. 1.2** Dokumenty vydané MAAE zaoberajúce sa problematikou uvoľňovania RA materiálov do ŽP

<b>Dokument (rok vydania)</b>	<b>Stručný obsah dokumentu</b>
Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance RS-G-1.7 (2004) [1]	Cieľom dokumentu „RS-G-1.7“ je poskytnúť odporúčanie národným autoritám (dozorné orgány, prevádzkovatelia) v oblasti aplikácie konceptov vylúčenia, vyňatia a uvoľnenia. V dokumente sú uvedené hodnoty špecifickej hmotnostnej aktivity pre rádionuklidy vyskytujúce sa v prírode aj pre umelo vytvorené rádionuklidy, ktoré môžu byť použité pri aplikácii konceptov vylúčenia a vyňatia veľkého množstva materiálov.
Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance Safety Reports Series No. 44 (2005) [2]	Dokument sa zaoberá bližším popisom zvolenej metodiky aplikovanej pri hodnotení jednotlivých scenárov a takisto obsahuje jednotlivé parametre použité pri vypracovaní uvoľňovacích úrovní uvedených v dokumente „RS-G-1.7“.
Managing Low Radioactivity Material from the Decommissioning of Nuclear Facilities Technical Reports Series No. 462 (2008) [3]	Dokument bol vytvorený za účelom uľahčiť situáciu pri plánovaní a implementovaní jednotlivých možností stratégie nakladania s veľkými množstvami VLLW vznikajúcimi pri vyradovaní JZ. V prílohách k dokumentu je možné nájsť konkrétne príklady manažmentu VLLW aplikované vo viacerých krajinách s cieľom poskytnúť informáciu o jednotlivých konkrétnych prístupoch (každý projekt bol špecifický – parametre zariadenia, národná legislatíva, atď.), ktoré boli úspešne naplnené, spolu so získanými skúsenosťami.
Programmes and Systems for Source and Environmental Radiation Monitoring Safety Reports Series No. 64 (2010) [20]	Dokument sa zaoberá návrhom a prevádzkou programov pre monitorovanie zdrojov a životného prostredia v súvislosti s uvoľňovaním rádioaktívnych materiálov do životného prostredia.
Monitoring for Compliance with Exemption and Clearance Levels Safety Reports Series No. 67 (2012) [21]	Dokument je venovaný vývoju a implementácii stratégie pre monitorovanie vyňatých alebo uvoľnených materiálov, pričom poskytuje odporúčania ohľadom výberu monitorovacích zariadení a použitých techník. Výber spomínaných zariadení a použitých techník je názorne ilustrovaný na sérii príkladov.

**Tab. 1.3** Dokumenty vydané EK zaoberajúce sa problematikou uvoľňovania RA materiálov do ŽP

Dokument (rok vydania)	Stručný obsah dokumentu
<p>Recommended Radiological Protection Criteria for the Recycling of Metals from the Dismantling of Nuclear Installations <i>Radiation Protection (RP) No. 89 (1998)</i> [4]</p>	<p>Uvedený dokument „RP 89“ tvorí odporúčania pre národné regulačné authority členských štátov EÚ, ktoré sa zaoberajú podmienkami, pri splnení ktorých je možné odpadový kov, rôzne komponenty a zariadenia vzniknuté pri demontáži jadrových zariadení uvoľniť, ak sú dodržané kritériá radiačnej ochrany. Cieľom dokumentu je určenie hodnôt hmotnostných aktivít ako aj povrchových aktivít jednotlivých rádionuklidov obsiahnutých v uvoľňovanom kove tak, aby neboli prekročené vyššie spomenuté limity ročných obdržaných dávok. Pre tento účel bol vytvorený značný počet scenárov manipulácie, pretavovania, používania uvoľnených materiálov.</p>
<p>Recommended Radiological Protection Criteria for the Clearance of Building and Building Rubble from the Dismantling of Nuclear Installations <i>Radiation Protection No. 113 (2000)</i> [7]</p>	<p>Dokument „RP 113“ je veľmi podobný vyššie popísanému „RP 89“ s tým rozdielom, že sa venuje možnostiam uvoľňovania kontaminovaných betónov a budov.</p>
<p>Practical Use of the Concepts of Clearance and Exemption – Part I <i>Radiation Protection 122/1 (2000)</i> [9]</p>	<p>V dokumente sú v krátkosti zhrnuté použité metodické postupy, možnosti aplikácie a odvodené špecifické uvoľňovacie kritériá pre uvoľňovanie kovových materiálov, budov a stavebnej sutiny do ŽP, ktoré boli vytvorené v dokumentoch „RP 89“ a „RP 113“.</p> <p>Cieľom dokumentu je odvodenie tzv. všeobecných uvoľňovacích úrovní, pri ktorých nie je zadefinované použitie uvoľňovaných materiálov. To znamená, že do úvahy je potrebné zobrať všetky možné cesty ožiarenia, t.j. všetky scenáre následného využívania materiálov a parametre súvisiace s týmito scenármi. Z tohto dôvodu sú úrovne pre „všeobecné uvoľňovanie“ rovnaké alebo prísnejšie ako špecifické uvoľňovacie úrovne pre rôzne konkrétne scenáre.</p>
<p>Evaluation of the Application of the Concepts of Exemption and Clearance for Practices according to Title III of Council Directive 96/29/EURATOM of 13 May 1996 in EU Member states <i>Radiation Protection No. 134 (2003)</i> [10]</p>	<p>Táto štúdia je venovaná zozbieraniu informácií o legislatívnych nástrojoch a praktických aplikáciách súvisiacich s konceptmi vyňatia a uvoľňovania materiálov, vyhodnoteniu získaných informácií a identifikácii silných a slabých miest prístupov jednotlivých členských krajín. Hlavným cieľom štúdie je určenie oblastí, ktoré je potrebné vylepšiť, resp. zdokonaľiť (legislatíva, praktická aplikácia, vydanie nových odporúčaní).</p>
<p>Comparative Study of EC and IAEA Guidance on Exemption and Clearance Levels <i>Radiation Protection No.157 (2010)</i> [11]</p>	<p>Štúdia je zameraná na poskytnutie základov pre proces rozhodovania, či by úrovne uvedené v dokumente „RS-G1.7“ vydaným MAAE, mohli byť použité ako uvoľňovacie úrovne pre nepodmienené uvoľňovanie a či by mohli nahradiť úrovne hmotnostných aktivít pre vyňatie uvedené v prílohe P1 v smernici Rady č. 96/29/EURATOM. Štúdia v krátkosti popisuje obsah porovnávaných dokumentov vydaných EK a MAAE, pričom sa konkrétne jedná o dokumenty „RP 122/1“ a „RS-G1.7“.</p>
<p>Recycling and Reuse of Radioactive Material in the Controlled Nuclear Sector <i>EUR 18041 (1998)</i> [12]</p>	<p>V dokumente sú analyzované scenáre pre recykláciu a opätovné využitie ocele, meďi, hliníka a betónov, pričom bola skúmaná uskutočniteľnosť jednotlivých scenárov. Z analýzy vyplynulo, že najpravdepodobnejšie uskutočniteľné scenáre sú tie, ktoré sú ekonomicky výhodné ako napr. recyklácia ocele pretavovaním a betónu drvením.</p>



**Tab. 1.4** Dokumenty vydané NEA/OECD zaoberajúce sa problematikou uvoľňovania RA materiálov do ŽP

Dokument (rok vydania)	Stručný obsah dokumentu
Recycling and Reuse of Scrap Metals (1996) [13]	Dokument sa zaoberal otázkou recyklácie a opätovného využitia materiálov s cieľom preskúmať vtedajšie existujúce a navrhované prístupy k tejto problematike s následným navrhnutím nových riešení. Skupina expertov v dokumente navrhla tzv. „stupňovitý systém“ s cieľom rozdeliť uvoľňované materiály do vybraných skupín (A-D) v závislosti od ich následného využitia. Výsledkom tejto analýzy bol fakt, že nerádiologické dopady finálneho uloženia materiálov v úložiskách a ich následného nahradenia novými vytáženými materiálmi presahujú nepriaznivé rádiologické dopady spojené s recykláciou a opätovným využitím materiálov
Release of Radioactive Materials and Buildings from Regulatory Control (2008) [14]	V dokumente je v krátkosti popísaný koncept uvoľňovania a vyňatia materiálov spod radiačnej kontroly spolu s faktormi (technické, sociálne, regulačné a ekonomické aspekty) ovplyvňujúcimi aplikáciu týchto konceptov. Následne je vypracovaný akýsi prehľad existujúcich prístupov k vytváraniu uvoľňovacích úrovní spolu s prehľadom vydaných dokumentov Európskej komisie a MAAE k danej problematike a takisto sa dokument venuje otázke implementácie jednotlivých konceptov do praxe.

## 2. CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

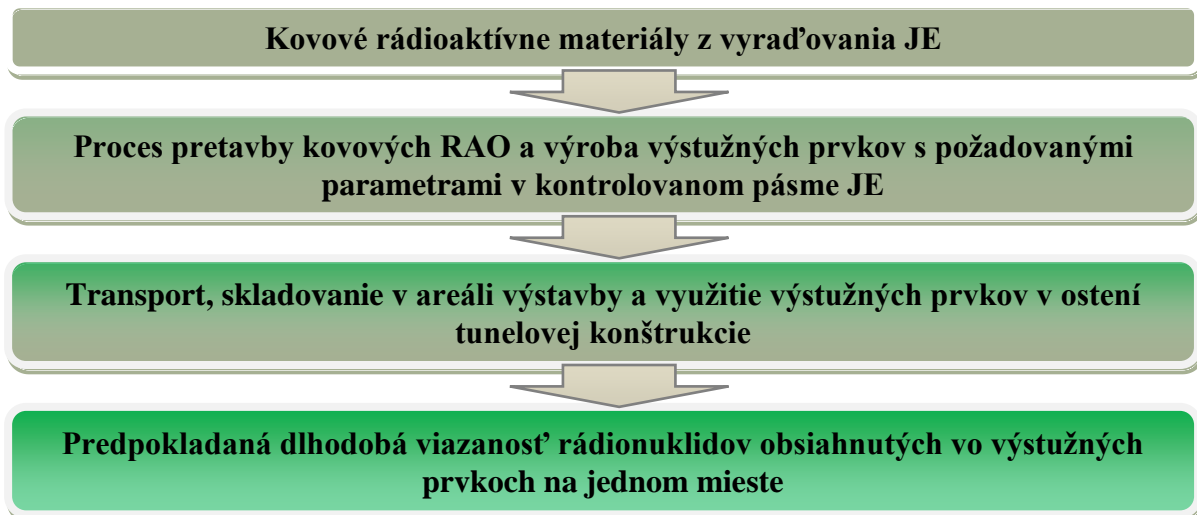
Základným cieľom dizertačnej práce je prispieť k riešeniu problematiky podmieneného uvoľňovania materiálov do ŽP prostredníctvom vytvorenia komplexnej metodiky hodnotiacej vybraný scenár využitia podmienene uvoľneného materiálu v praxi. Postupnosť krokov vedúcich k spomenutému cieľu je možné zhrnúť do nasledovných bodov:

1. Podrobná analýza procesu uvoľňovania materiálov pochádzajúcich z procesu vyradovania JZ s dôrazom na koncept podmieneného uvoľňovania materiálov.
2. Návrh metodiky pre vypracovanie scenára využitia podmienene uvoľneného materiálu pri výstavbe tunelových konštrukcií.
3. Komplexné posúdenie krátkodobých aj dlhodobých vplyvov využitia podmienene uvoľneného materiálu pri výstavbe tunelových stavieb na pracovníkov, obyvateľstvo a životné prostredie.
4. Odvodenie nových uvoľňovacích úrovní na základe dosiahnutých výsledkov z posúdenia rádiologických vplyvov na najviac ožiareného jedinca.
5. Určenie množstva podmienene uvoľniteľných kovových materiálov pochádzajúcich z vyradovania jadrových elektrární (JE) V1 a A1.
6. Vypracovanie analýzy ocenenia nákladov spojenú s uvažovaným scenárom využitia podmienene uvoľnených materiálov pri výstavbe tunelových stavieb.

### 3. ZVOLENÁ METÓDA SPRACOVANIA

Predkladaná dizertačná práca podrobne skúma možnosť využitia podmienene uvoľnenej veľmi nízkoaktívnej rádioaktívnej ocele (VNRO) vo forme výstužných prvkov pri výstavbe tunelových konštrukcií. Dôraz je kladený na ohodnotenie rádiologických vplyvov procesu využitia ocele na pracovníkov, ktorý prichádzajú s rádioaktívnym materiálom do priameho kontaktu. Taktiež je nevyhnutné ohodnotiť vplyvy pôsobiace na obyvateľstvo. Neodmysliteľnou požiadavkou pre stanovenie rádiologického vplyvu predstavuje súbor technických informácií z praxe zaoberajúci sa postupmi prác, ktoré sú vykonávané v jednotlivých fázach prípravy, výstavby a likvidácie tunelovej konštrukcie. Takisto je potrebné jednoznačne zadefinovať spôsob, formu a miesto využitia podmienene uvoľneného materiálu spolu s identifikáciou možných ciest ožiarenia jednotlivcov. Na základe dosiahnutých výsledkov z analýzy rádiologického vplyvu bude možné určiť množstvo a aktivitu kovových materiálov využiteľných vo forme výstužných prvkov v tunelovej konštrukcii s vopred zadefinovanými parametrami. Súbor potrebných vstupných informácií a požiadaviek spolu s jasným určením postupnosti krokov pri samotnom ohodnotení tvorí dokopy zvolenú metódu spracovania, ktorá je bližšie popísaná v nasledujúcich riadkoch.

Pri podmienenom uvoľňovaní materiálov je potrebné dopredu jednoznačne zadefinovať konkrétny scenár využitia materiálov obsahujúci popis materiálového toku v scenári, všetkých nevyhnutných parametrov a činností vykonávanými v danom scenári. Materiálový tok uvažovaný v scenári využitia veľmi nízkoaktívnej ocele pri výstavbe tunelových konštrukcií je možné názorne vidieť na nasledovnom obrázku.



**Obr. 3.1** Predpokladaný materiálový tok v scenári využitia VNRO

Keďže výstavba tunelovej konštrukcie zahŕňa rozsiahly súbor vykonávaných činností, pre lepšiu prehľadnosť bol hodnotený scenár rozdelený do 4 nasledovných etáp:

- Pretavba kovových RA materiálov a výroba výstužných prvkov (kontinuálne počas výstavby tunelovej konštrukcie),
- Samotná výstavba tunelovej konštrukcie (predpokladá sa 3 ročná doba trvania výstavby aj s výstavbou vnútorných konštrukcií),

- Prevádzka tunelovej konštrukcie (predpokladá sa doba prevádzky o dĺžke 100 rokov),
- Dlhodobý vplyv (DV) podmienene uvoľnenej a opätovné využitej VNRO (za rozumne stanovenú dobu skúmania dlhodobých vplyvov je považovaná hodnota 10 000 rokov).

Vytvorená metodika ohodnotenia rádiologických vplyvov a určenia podmienene uvoľniteľného množstva VNRO vychádza z medzinárodných odporúčaní [1], [2] a pozostáva z nasledovných bodov:

1. Definícia nuklidového vektora obsiahnutého v uvoľňovanom materiáli (aké rádionuklidy sú prítomné v akom zastúpení).
2. Určenie základných parametrov relevantných pre scenár výstavby tunelovej konštrukcie. Takisto je potrebné podrobne zadefinovať vykonávané činnosti v jednotlivých 4 etapách obsiahnutých v spomínanom scenári.
3. Tvorba geometrického, materiálového a rádiologického modelu vychádzajúc zo získaných údajov a parametrov.
4. Výpočet ročnej individuálnej efektívnej dávky pre vopred definovanú hmotnostnú aktivitu jednotlivých rádionuklidov obsiahnutých v materiáli.
5. Identifikácia najviac ožiareného jednotlivca pre jednotlivé rádionuklidy obsiahnuté v materiáli, pri uvážení všetkých relevantných ciest ožiarenia v jednotlivých 4 etapách.
6. Odvodenie uvoľňovacích úrovní pre jednotlivé rádionuklidy.

V nasledujúcich podkapitolách je spomínaná metodika ohodnotenia rádiologických vplyvov podmienene uvoľnenej VNRO na pracovníkov a obyvateľstvo podrobnejšie popísaná. Takisto je zadefinovaný spôsob následného odvodenia nových uvoľňovacích úrovní pre jednotlivé rádionuklidy ako aj pre zmes rádionuklidov nachádzajúcich sa v uvoľnenom materiáli za súčasného dodržania legislatívne stanovených dávkových limitov. Po odvodení nových uvoľňovacích úrovní je možné na základe dostupných údajov určiť množstvo kovových rádioaktívnych materiálov vzniknutých pri vyradovaní JE A1 a V1, ktoré sú podmienene uvoľniteľné a následne využiteľné vo forme výstužných prvkov v tunelovej konštrukcii.

### **3.1 Určenie nuklidového vektora obsiahnutého v podmienene uvoľnenej oceli**

Ako už bolo spomenuté, z hľadiska určenia rádiologického vplyvu je nevyhnutné poznať zdroj žiarenia, t.j. rádionuklidy nachádzajúce sa výstužných prvkoch vyrobených z podmienene uvoľnenej VNRO. Zastúpenie jednotlivých nuklidov v nuklidovom vektore bolo určené na základe dostupnej rádiologickej charakterizácie JE A1 a V1.

Keďže výrobe výstužných prvkov predchádza ešte proces pretavby, je potrebné zohľadniť tento fakt vo výpočtoch. V procese pretavovania dochádza k prerozdeleniu koncentrácie niektorých rádionuklidov medzi ingot, trosku a prach/aerosóly.

Výsledné zastúpenie (viď Tab. 3.1 a 3.2 nižšie) jednotlivých rádionuklidov vo výstužných prvkoch uvažuje s údajmi získanými s rádiologickej charakterizácie JE A1 a V1 a takisto berie do úvahy aj distribučné koeficienty počas pretavby vykonanej po začatí prác súvisiacich s vyradovaním v predpokladanom čase.

**Tab. 3.1** Nuklidový vektor JE V1 po pretavbe

Nuklid	Zastúpenie po pretavbe	Zastúpenie k 1.1. 2015	Nuklid	Zastúpenie po pretavbe	Zastúpenie k 1.1. 2015
<sup>55</sup> Fe	38,44 %	37,70 %	<sup>41</sup> Ca	< 0,01 %	0,20 %
<sup>63</sup> Ni	35,33 %	34,31 %	<sup>57</sup> Co	< 0,01 %	< 0,01 %
<sup>60</sup> Co	23,91 %	23,22 %	<sup>90</sup> Sr	< 0,01 %	0,17 %
<sup>93</sup> Mo	1,37 %	1,33 %	<sup>94</sup> Nb	< 0,01 %	0,16 %
<sup>59</sup> Ni	0,46 %	0,45 %	<sup>137</sup> Cs	< 0,01 %	0,15 %
<sup>126</sup> Sn	0,16 %	0,16 %	<sup>93</sup> Zr	< 0,01 %	0,13 %
<sup>107</sup> Pd	0,15 %	0,14 %	<sup>65</sup> Zn	< 0,01 %	< 0,01 %
<sup>125</sup> Sb	0,12 %	0,11 %	<sup>241</sup> Am	< 0,01 %	0,01 %
<sup>54</sup> Mn	0,03 %	0,13 %	<sup>244</sup> Ce	< 0,01 %	0,01 %
<sup>110m</sup> Ag	0,02 %	0,02 %	<sup>239</sup> Pu	< 0,01 %	0,01 %
<sup>79</sup> Se	0,01 %	0,08 %	<sup>240</sup> Pu	< 0,01 %	0,01 %
<sup>14</sup> C	0,01 %	0,01 %	<sup>129</sup> I	< 0,01 %	< 0,01 %
<sup>241</sup> Pu	< 0,01 %	0,62 %	<sup>238</sup> Pu	< 0,01 %	< 0,01 %
<sup>151</sup> Sm	< 0,01 %	0,53 %	<sup>244</sup> Cm	< 0,01 %	< 0,01 %
<sup>135</sup> Cs	< 0,01 %	0,35 %			

**Tab. 3.2** Nuklidový vektor JE A1 po pretavbe

Nuklid	Zastúpenie po pretavbe	Zastúpenie k 1.1. 2017	Nuklid	Zastúpenie po pretavbe	Zastúpenie k 1.1. 2017
<sup>63</sup> Ni	78,81 %	12,98 %	<sup>239</sup> Pu	0,02 %	0,59 %
<sup>60</sup> Co	17,65 %	2,91 %	<sup>151</sup> Sm	0,01 %	0,37 %
<sup>137</sup> Cs	1,47 %	48,12 %	<sup>93</sup> Mo	0,01 %	< 0,01 %
<sup>90</sup> Sr	0,99 %	32,58 %	<sup>126</sup> Sn	0,01 %	< 0,01 %
<sup>59</sup> Ni	0,82 %	0,14 %	<sup>238</sup> Pu	< 0,01 %	0,16 %
<sup>99</sup> Tc	0,10 %	0,02 %	<sup>129</sup> I	< 0,01 %	0,04 %
<sup>3</sup> H	0,05 %	0,06 %	<sup>94</sup> Nb	< 0,01 %	0,02 %
<sup>241</sup> Am	0,04 %	1,26 %	<sup>93</sup> Zr	< 0,01 %	< 0,01 %
<sup>152</sup> Eu	0,02 %	0,77 %			

### 3.2 Identifikácia možných ciest ožiarenia

Identifikácia možných ciest ožiarenia je rozdelená na 4 etapy, podobne ako samotný scenár keďže úzko súvisí s charakterom vykonávaných činností v jednotlivých etapách. Sumárne je možné vidieť predpokladané cesty ožiarenia na Obr. 3.2.

V prvej etape počas procesu pretavovania kovových fragmentov a výroby výstužných komponentov model uvažuje so všetkými 4 možnými cestami ožiarenia v závislosti od charakteru vykonávaných činností. Externé ožiarenie je uvažované pri všetkých činnostiach vykonávaných v prvej etape keďže pracovníci prichádzajú do styku s rádioaktívnym materiálom. Avšak, pri istých činnostiach ako je napríklad termické rezanie alebo samotná pretavba, môže dôjsť k distribúcii niektorých rádionuklidov do formy prachu, resp. aerosólov. Tieto môžu následne spôsobiť kontamináciu kože, resp. interné ožiarenie jednotlivca.

Pretavba a výroba výstužných prvkov	<i>P – Pracovník</i> <i>O – Obyvateľ</i>		Dlhodobý vplyv
	Etapa výstavby tunelovej konštrukcie	Etapa prevádzky tunelovej konštrukcie	
Inhalácia – P			Inhalácia – O
Ingescia – P			Ingescia – O
Kontaminácia kože – P	Nepredpokladá sa interné ožiarenie ani kontaminácia kože	Nepredpokladá sa interné ožiarenie ani kontaminácia kože	Kontaminácia kože – O
Externé ožiarenie – P	Externé ožiarenie – P	Externé ožiarenie – P, O	Externé ožiarenie – O
$T_0 = 0$ rokov	3 roky	100 rokov	10 000 rokov

**Obr. 3.2** Predpokladané cesty ožiarenia v jednotlivých etapách hodnoteného scenára

V etapách výstavby a prevádzky tunelovej konštrukcie je brané do úvahy iba externé ožiarenie pracovníkov a obyvateľov, keďže tieto etapy neobsahujú procesy, ktoré by viedli k uvoľneniu rádionuklidov z výstužných prvkov do ovzdušia vo forme prachu alebo aerosólov, resp. spomínané uvoľňovanie je zanedbateľné.

Identifikácia ciest ožiarenia počas dlhodobého vplyvu vychádza z charakteru činností, ktoré jedinec vlastniaci záhradu vykonáva. Model konzervatívne popisuje možnosť, že jedinec využíva studňu pre zabezpečenie vlastnej spotreby pitnej aj úžitkovej vody. Predpokladá sa, že spomínaná studňa bude kontaminovaná rádionuklidmi migrujúcimi z ostenia tunelovej konštrukcie horninovým prostredím. Keďže sa kontaminovaná voda využíva na zavlažovanie a pre dobytok, určitá koncentrácia rádionuklidov bude následne obsiahnutá aj v samotnej pôde záhrady, resp. v plodinách a dobytku. Z toho dôvodu je v scenári uvažovaná priama ingescia kontaminovanej vody, ale takisto aj ingescia dopestovaných plodín a dochovaných zvierat. Takisto sa berie do úvahy kontaminácia kože a inhalácia určitej koncentrácie rádionuklidov vo forme prachu z pôdy. Poslednou identifikovanou cestou ožiarenia je externé ožiarenie jednotlivcov z rádionuklidov nachádzajúcich sa v pôde.

Pri hodnotení jednotlivých expozičných ciest sú analyzované rádionuklidy nachádzajúce sa v nuklidových vektoroch JE A1 a V1 (viď Tab. 3.3). Rádionuklidy, ktoré emitujú pri ich rádioaktívnej premene iba nízkoenergetické gama žiarenie, resp. neemitujú žiadne gama žiarenie, je vhodné vylúčiť z analýzy externého ožiarenia, keďže majú zanedbateľný vplyv.

**Tab. 3.3** Zoznam rádionuklidov uvažovaných pri hodnotení jednotlivých expozičných ciest

Expozičné cesty	Nuklidový vektor A1	Nuklidový vektor V1
Externé ožiarenie	$^{60}\text{Co}$ , $^{94}\text{Nb}$ , $^{126}\text{Sn}$ , $^{137}\text{Cs}$ , $^{152}\text{Eu}$ , $^{239}\text{Pu}$	$^{54}\text{Mn}$ , $^{57}\text{Co}$ , $^{60}\text{Co}$ , $^{65}\text{Zn}$ , $^{94}\text{Nb}$ , $^{110\text{m}}\text{Ag}$ , $^{125}\text{Sb}$ , $^{126}\text{Sn}$ , $^{137}\text{Cs}$ , $^{239}\text{Pu}$
Inhalácia	$^3\text{H}$ , $^{59}\text{Ni}$ , $^{60}\text{Co}$ , $^{63}\text{Ni}$ , $^{90}\text{Sr}$ , $^{93}\text{Mo}$ , $^{93}\text{Zr}$ , $^{94}\text{Nb}$ , $^{99}\text{Tc}$ , $^{126}\text{Sn}$ , $^{129}\text{I}$ , $^{137}\text{Cs}$ , $^{151}\text{Sm}$ , $^{152}\text{Eu}$ , $^{238}\text{Pu}$ , $^{239}\text{Pu}$ , $^{241}\text{Am}$	$^{14}\text{C}$ , $^{41}\text{Ca}$ , $^{54}\text{Mn}$ , $^{55}\text{Fe}$ , $^{57}\text{Co}$ , $^{59}\text{Ni}$ , $^{60}\text{Co}$ , $^{63}\text{Ni}$ , $^{65}\text{Zn}$ , $^{79}\text{Se}$ , $^{90}\text{Sr}$ , $^{93}\text{Mo}$ , $^{93}\text{Zr}$ , $^{94}\text{Nb}$ , $^{107}\text{Pd}$ , $^{110\text{m}}\text{Ag}$ , $^{125}\text{Sb}$ , $^{126}\text{Sn}$ , $^{129}\text{I}$ , $^{135}\text{Cs}$ , $^{137}\text{Cs}$ , $^{144}\text{Ce}$ , $^{151}\text{Sm}$ , $^{238}\text{Pu}$ , $^{239}\text{Pu}$ , $^{240}\text{Pu}$ , $^{241}\text{Pu}$ , $^{241}\text{Am}$ , $^{244}\text{Cm}$
Ingescia		
Kontaminácia kože		

Bližšie je spôsob ohodnotenia dávok z jednotlivých ciest ožiarenia popísaný v nasledovných podkapitolách. Parametre uvažované pri hodnotení jednotlivých ciest ožiarenia boli získané z relevantných a dôveryhodných zdrojov (medzinárodné dokumenty a odporúčania [2], [5], [6], [8], [9], [22], [23], [24], výskumné správy [19], [25] a konzultácie s odborníkom v oblasti výstavby tunelových konštrukcií [26]).

### 3.2.1 Inhalácia

Inhalácia prachu kontaminovaného rádionuklidmi, resp. aerosólov v prašnom prostredí môže nastať v nasledovných situáciách uvažovaných v hodnotenom scenári:

- Rezanie kovových materiálov na menšie fragmenty použitím termických procesov (etapa pretavby a výroby výstužných prvkov),
- Samotný proces pretavovania kovových fragmentov a manipulácia s troskou (etapa pretavby a výroby výstužných prvkov),
- Inhalácia kontaminovaného prachu z pôdy (etapa dlhodobého vplyvu).

Dávky spôsobené inhaláciou rádionuklidov je možné vypočítať podľa nasledovného vzorca [2], [9]:

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

kde	$E_{inh}$	-	obdržaná efektívna dávka prostredníctvom inhalácie v kalendárnom roku na jednotku mernej aktivity obsiahnutú v materiáli [(Sv/r)/(Bq/g)],
	$e_{inh}$	-	dávkový konverzný faktor pre inhaláciu [Sv/Bq],
	$t_e$	-	doba ožiarenia počas kalendárneho roka [s],
	$f_d$	-	faktor riedenia [-],
	$f_c$	-	faktor koncentrácie [-],
	$C_{pr}$	-	koncentrácia prachu vo vzduchu [g/m <sup>3</sup> ],
	$\dot{V}$	-	množstvo vdýchnutého vzduchu [m <sup>3</sup> /h],
	$\lambda$	-	konštanta rádioaktívnej premeny [1/s],
	$t_1$	-	doba, počas ktorej prebieha rádioaktívna premena, pred začiatkom scenára [s],
	$t_2$	-	doba rádioaktívnej premeny počas scenára [s].

### 3.2.2 Ingescia

Hodnotený scenár uvažuje s ingesciou rádionuklidov v nasledovných prípadoch:

- Neúmyselná ingescia prachu v prašnom prostredí (etapa pretavby a výroby výstužných prvkov),
- Ingescia dopestovaných plodín, vody a mäsa z dochovaného dobytku (etapa dlhodobého vplyvu).

Dávky spôsobené ingesciou rádionuklidov je možné vypočítať pomocou nasledovného vzťahu [2], [9]:

$$E_{ing} = e_{ing} q f_d f_c f_t e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda t_2}, \quad (2)$$

kde	$E_{ing}$	-	obdržaná efektívna dávka prostredníctvom ingescie v kalendárnom roku na jednotku mernej aktivity obsiahnutú v materiáli [(Sv/r)/(Bq/g)],
	$e_{ing}$	-	dávkový konverzný faktor pre ingesciu [Sv/Bq],
	$q$	-	množstvo prijatého rádionuklidu za rok [g/r],
	$f_d$	-	faktor riedenia [-],
	$f_c$	-	faktor koncentrácie [-],
	$f_t$	-	translokačný faktor [-],
	$\lambda$	-	konštanta rádioaktívnej premeny [1/s],
	$t_1$	-	doba, počas ktorej prebieha rádioaktívna premena, pred začiatkom scenára [s],
	$t_2$	-	doba rádioaktívnej premeny počas scenára [s].

### 3.2.3 Kontaminácia kože

Kontaminácia kože (SKIN) je predpokladaná iba na miestach s vysokou prašnosťou. Z tohto dôvodu model uvažuje s touto expozičnou cestou v nasledovných situáciách:

- Kontaminácia kože počas rezania kovových materiálov (etapa pretavby a výroby výstužných prvkov),
- Kontaminácia kože počas samotného procesu pretavovania a nakladania s troskou (etapa pretavby a výroby výstužných prvkov),
- Kontaminácia kože pri činnostiach vykonávaných na záhrade, resp. farme (etapa dlhodobého vplyvu).

Dávky spôsobené kontamináciou kože rádionuklidmi je možné vypočítať podľa nasledovného vzorca [2], [9]:

$$E_{skin} = e_{skin} w_s f_s t_e f_d f_c L_{pr} \rho e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda t_2}, \quad (3)$$

kde	$E_{skin}$	-	obdržaná efektívna dávka prostredníctvom kontaminácie kože v kalendárnom roku na jednotku mernej aktivity obsiahnutú v materiáli [(Sv/r)/(Bq/g)],
	$e_{skin}$	-	suma dávkových konverzných faktorov pre kontamináciu kože od beta a gama žiaričov [(Sv/h)/(Bq/cm <sup>2</sup> )],
	$w_s$	-	váhový faktor kože [-],
	$f_s$	-	podiel povrchu tela, ktorý je kontaminovaný [-],
	$t_e$	-	doba ožiarovania počas kalendárneho roka [s],
	$f_d$	-	faktor riedenia [-],
	$f_c$	-	faktor koncentrácie [-],
	$L_{pr}$	-	hrúbka vrstvy prachu usadenej na koži [cm],
	$\rho$	-	hustota prachu usadeného na koži [g/cm <sup>3</sup> ],
	$\lambda$	-	konštanta rádioaktívnej premeny [1/s],
	$t_1$	-	doba, počas ktorej prebieha rádioaktívna premena, pred začiatkom scenára [s],
	$t_2$	-	doba rádioaktívnej premeny počas scenára [s].

### 3.2.4 Externé ožiarenie

Externé ožiarenie (EXT) je uvažované pre vybrané rádionuklidy vo všetkých vykonávaných činnostiach v jednotlivých etapách hodnoteného scenára využitia podmienene uvoľnenej VNRO.

Dávky spôsobené externým ožiarением je možné vypočítať podľa nasledovného vzorca [2], [9]:

$$E_{ext} = \dot{e}_{ext} t_e f_d e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda t_2}, \quad (4)$$

- kde  $E_{ext}$  - obdržaná efektívna dávka prostredníctvom externého ožiarenia v kalendárnom roku na jednotku mernej aktivity obsiahnutú v materiáli [(Sv/r)/(Bq/g)],
- $\dot{e}_{ext}$  - priemerný dávkový príkon na jednotku hmotnostnej aktivity v závislosti od geometrie, vzdialenosti, tienenia atď. [(Sv/h)/(Bq/g)],
- $t_e$  - doba ožiarenia počas kalendárneho roka [s],
- $f_d$  - faktor riedenia [-],
- $\lambda$  - konštanta rádioaktívnej premeny [1/s],
- $t_1$  - doba, počas ktorej prebieha rádioaktívna premena, pred začiatkom scenára [s],
- $t_2$  - doba rádioaktívnej premeny počas scenára [s].

Avšak na ohodnotenie externého ožiarenia bol využitý výpočtový prostriedok VISIPLAN 3D ALARA.

### 3.3 Popis využívaných výpočtových prostriedkov na ohodnotenie rádiologických vplyvov

Výpočtové prostriedky použité na ohodnotenie rádiologického vplyvu podmienene uvoľnenej a opätovnej využitej VNRO pri výstavbe tunelovej konštrukcie sa líšili v závislosti od analyzovanej etapy scenára využitia VNRO. Cieľom bolo ich využiť čo možno najefektívnejšie vzhľadom na časovú náročnosť jednotlivých výpočtov, resp. simulácií.

V etape pretavovania a výroby výstužných komponentov boli na výpočet interného ožiarenia a ohodnotenie kontaminácie kože použité vyššie uvedené vzťahy, pričom samotný výpočet prebiehal v prostredí MS EXCEL s využitím dostupných parametrov a faktorov.

Externé ožiarenie v prvých troch etapách (pretavba a výroba výstužných prvkov, výstavba a prevádzka tunelovej konštrukcie) bolo hodnotené pre vybrané rádionuklidy vo výpočtovom prostriedku VISIPLAN 3D ALARA.

Dlhodobý vplyv podmienene uvoľnenej VNRO bol hodnotený zvlášť v samostatnom simulačnom softvéri GOLDSIM, ktorý umožňuje simulovať rôzne degradačné procesy a migráciu rádionuklidov v horninovom prostredí. V prostredí GOLDSIM boli na určenie dávok z jednotlivých expozičných ciest takisto využité vzťahy popísané vyššie v práci, pričom dávka z externého ožiarenia a z kontaminácie kože bola spočítaná dokopy.



### 3.4 Odvodenie uvoľňovacích úrovní

Výpočet nových uvoľňovacích úrovní zabezpečujúcich nepresiahnutie stanovených dávkových limitov v hodnotenom scenári bol uskutočnený v súlade s medzinárodnými odporúčaniami. Odvodenie uvoľňovacích úrovní bolo uskutočnené podľa nasledovného vzorca vychádzajúc z medzinárodných odporúčaní [2]:

$$A_u = \frac{D_L}{IED} A_r, \quad (5)$$

- kde  $A_u$  - predstavuje hodnotu uvoľňovacej úrovne hmotnostnej aktivity pre daný rádionuklid,  
 $D_L$  - predstavuje dávkový limit daný legislatívou (10  $\mu$ Sv/rok, príp. 50  $\mu$ Sv/rok),  
 $IED$  - predstavuje vypočítanú hodnotu ročnej individuálnej efektívnej dávky obdržanú najviac ožiareným jedíncom v limitujúcom scenári,  
 $A_r$  - predstavuje referenčnú hodnotu hmotnostnej aktivity obsiahnutú v uvoľňovanej nízkorádioaktívnej oceli po pretavbe.

Vyššie uvedený vzorec platí v prípade, ak je materiál kontaminovaný iba jedným rádionuklidom. Avšak takáto situácia sa skutočnosti vyskytuje len ojedinele, ďaleko častejšie sú prípady, že materiál je kontaminovaný zmesou rádionuklidov.

Odvodenie uvoľňovacej úrovne pre materiály obsahujúce zmes rádionuklidov sa vykoná na základe nasledovného sumačného vzorca, resp. podmienky vychádzajúc z určených uvoľňovacích úrovní pre jednotlivé rádionuklidy [2]:

$$\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{A_{u_i}} < 1, \quad (6)$$

- kde  $A_i$  - predstavuje hmotnostnú aktivitu i-teho RA nuklidu obsiahnutého v uvažovanom materiáli (Bq/g),  
 $A_{u_i}$  - predstavuje uvoľňovaciu úroveň i-teho rádionuklidu obsiahnutého v uvažovanom materiáli (Bq/g),  
 $n$  - predstavuje počet RA nuklidov obsiahnutých v uvažovanom materiáli.

Vo vyššie uvedom prípade kontaminácie zmesou rádionuklidov musí byť splnené nielen pravidlo pre jednotlivé nuklidy (ich hmotnostná aktivita musí byť menšia ako ich uvoľňovacia úroveň) ale takisto aj suma podielov jednotlivých hmotnostných aktivít a uvoľňovacích úrovní musí byť menšia ako 1.

### 3.5 Určenie množstva podmienene uvoľniteľných materiálov

Nevyhnutnú podmienku pre určenie podmienene uvoľniteľného množstva RA materiálov z konkrétnej JE predstavuje rozsiahla databáza zariadení spolu s podrobnou rádiologickou charakterizáciou danej elektrárne. Následne pomocou vyššie uvedenej sumačnej podmienky je možné určiť aktivitné limity pre vybrané kovové časti technologických zariadení, resp. okruhov nachádzajúcich sa v spomínaných databázach (vyššie uvažované nuklidové zloženie bolo zistené vykonaním rádiologickej charakterizácie len v určitých typoch technologických zariadení resp. okruhov, detailná analýza rozdielnych nuklidových vektorov všetkých typov

zariadení by bola časovo náročná a presahovala by rozsah dizertačnej práce, pričom metodický postup by ostal nezmenený). Množstvo uvoľniteľného materiálu sa následne určí ako súčet hmotností materiálov zariadení spĺňajúcich uvedené aktivitné limity.

Vyššie popísaný postup zabezpečí neprekročenie dávkových limitov, pretože vychádza z uvoľňovacích úrovní získaných z ohodnotenia rádiologického vplyvu pri uvážení práve spomínaných dávkových limitoch.

Na vykonanie rozsiahlych výpočtov, určenie recyklovateľného množstva kovových materiálov a vypracovanie analýzy nákladov bol použitý výpočtový prostriedok OMEGA, ktorý bol vyvinutý za účelom stanovenia rôznych parametrov vyradovania JE (náklady na jednotlivé činnosti, ožiarenie personálu, doba trvania jednotlivých činností, určenie počtu úložných kontajnerov a inventáru RAO, určenie množstva uvoľniteľných materiálov a iné).

## **4. VÝSLEDKY DIZERTAČNEJ PRÁCE S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKOV**

### **4.1 Ohodnotenie rádiologického vplyvu využitia podmienene uvoľnenej ocele**

Ohodnotenie rádiologického vplyvu bolo vykonané vo všetkých uvažovaných etapách hodnoteného scenára s použitím spomínaných výpočtových prostriedkov. Následné bolo možné identifikovať najviac ožiareného jedinca. Avšak je potrebné zdôrazniť fakt, že existujú rozdielne dávkové limity v rôznych etapách (napr. pre etapu pretavovania a výroby platí dávkový limit 20 mSv a pre etapu dlhodobého vplyvu platia už spomínané dávkové limity 10  $\mu$ Sv/rok, resp. 50  $\mu$ Sv/rok pre uvoľňovanie materiálov). Referenčná hodnota hmotnostnej aktivity pri výpočtoch obdržaných dávok bola stanovená na hodnotu 300 Bq/kg. S touto hodnotou aktivity sa uvažovalo pri hodnotení všetkých činností s výnimkou nasledujúcich:

- Fragmentácia kovových materiálov a manipulácia s nimi pred pretavbou,
- Proces samotnej pretavby, manipulácie s troskou a zlievanie roztavenej hmoty do formy na ingoty.

Pri týchto dvoch činnostiach sa uvažovalo s vyššou aktivitou prepočítanou s uvážením distribúcie rádioaktivity v procese pretavovania.

Tab. 4.1 obsahuje dosiahnuté výsledky rádiologického vplyvu hodnoteného scenára pre rádionuklid  $^{60}\text{Co}$ . Rovnaké výpočty boli vykonané pre všetky ostatné analyzované rádionuklidy.

**Tab. 4.1** Ohodnotenie rádiologického vplyvu ocele obsahujúcej rádionuklid  $^{60}\text{Co}$

Etapa scenára	Vykonávaná činnosť	Ročná doba ožiarenia (h)	Obdržaná dávka za rok (mSv)	Uvažované expozičné cesty (kritická)	Hmotnostná aktivita (Bq/kg)
Pretavovanie	Rezanie / manipulácia	1100	3,32E-02	Všetky (EXT)	301,5
	Pretavba / troska / zlievanie	715	4,91E-03	Všetky (EXT)	301,5
	Manipulácia s ingotmi	880	1,09E-02	EXT	300
	Skladovanie ingotov / výstužných prvkov / nakladanie výstužných prvkov	220	5,02E-03	EXT	300
Výroba výstužných prvkov	Transport	150	1,50E-03	EXT	300
	Obsluha blokovne	770	1,28E-03	EXT	300
	Technológ - dozorňa	1320	4,84E-04	EXT	300
	Obsluha kontijemnej trate	770	7,04E-05	EXT	300
	Obsluha ochladzovacej linky	770	7,04E-05	EXT	300
	Obsluha nožníc	660	3,96E-04	EXT	300
	Stáčanie prútov	660	3,74E-03	EXT	300
Výstavba tunela	Montáž primárneho ostenia	1925	6,17E-03	EXT	300
	Montáž základových pásov	550	2,55E-03	EXT	300
	Montáž sekundárneho ostenia	840	2,31E-03	EXT	300
	Skladovanie výstužných prvkov	58	2,39E-03	EXT	300
Prevádzka tunela	Údržba postaveného tunela	130	9,53E-06	EXT	300
	Profesionálny vodič	50	5,20E-06 *	EXT	300
			4,60E-06 *	EXT	300
	Vodič / Cestujúci	10	1,04E-06 *	EXT	300
9,20E-07 *			EXT	300	
DV	Obyvateľ so záhradou	8760 (celý rok)	1,13E-11	Všetky (EXT+SKIN)	300

\* Rozdielne hodnoty sú spôsobené iným umiestneným vodiča, t.j. jazdou v pravom alebo ľavom jazdnom pruhu

Na základe vykonaných výpočtov bolo možné identifikovať kritického jedinca a následne stanoviť hodnotu nových uvoľňovacích úrovní pre všetky analyzované rádionuklidy v hodnotenom scenári využitia VNRO v tunelových konštrukciách.

#### 4.2 Odvodenie nových uvoľňovacích úrovní pre analyzované rádionuklidy

Uvoľňovacie úrovne boli odvodené na základe postupu popísaného v metodickej časti práce. Vypočítané hodnoty nových uvoľňovacích úrovní pre nuklidové vektory oboch uvažovaných elektrární spolu s limitujúcou činnosťou sú sumarizované tabuľke uvedenej nižšie. Tabuľka takisto obsahuje limity hmotnostnej aktivity pre nepodmienené uvoľňovanie uvedené v legislatíve, resp. dopočítané na základe návodu uvedeného v legislatíve (dopočítané hodnoty sú v tabuľke označené \*).

**Tab. 4.2** Odvozené uvoľňovacie úrovne pre rádionuklidy analyzované v hodnotenom scenári

RA nuklid	Limit hmotnostnej aktivity pre NU (Bq/kg)	Uvoľňovacia úroveň pre PU - variant 10 µSv/rok (Bq/kg)	Uvoľňovacia úroveň pre PU - variant 50 µSv/rok (Bq/kg)
<sup>3</sup> H	3,00E+06	1,82E+09	1,82E+09
<sup>14</sup> C	3,00E+05	7,25E+06	3,62E+07
<sup>41</sup> Ca	3,00E+05 *	2,78E+07	2,78E+07
<sup>54</sup> Mn	3,00E+02	1,32E+03	6,59E+03
<sup>55</sup> Fe	3,00E+05	1,83E+10	1,83E+10
<sup>57</sup> Co	3,00E+04	7,47E+03	3,73E+04
<sup>59</sup> Ni	3,00E+05 *	1,11E+08	5,57E+08
<sup>60</sup> Co	3,00E+02	4,86E+02	2,43E+03
<sup>63</sup> Ni	3,00E+06	2,93E+08	1,47E+09
<sup>65</sup> Zn	3,00E+02	2,15E+03	1,08E+04
<sup>79</sup> Se	3,00E+04 *	6,01E+06	1,93E+07
<sup>90</sup> Sr	3,00E+03	1,44E+05	1,44E+05
<sup>93</sup> Mo	3,00E+04 *	6,89E+06	3,44E+07
<sup>93</sup> Zr	3,00E+05 *	6,00E+04	6,00E+04
<sup>94</sup> Nb	3,00E+02	6,51E+02	7,74E+02
<sup>99</sup> Tc	3,00E+05	1,96E+07	9,78E+07
<sup>107</sup> Pd	3,00E+05 *	4,71E+08	2,36E+09
<sup>110m</sup> Ag	3,00E+02	4,06E+02	2,03E+03
<sup>125</sup> Sb	3,00E+02 *	2,24E+03	1,12E+04
<sup>126</sup> Sn	3,00E+03 *	2,15E+04	1,08E+05
<sup>129</sup> I	3,00E+04	1,08E+04	1,08E+04
<sup>135</sup> Cs	3,00E+04 *	5,46E+05	5,46E+05
<sup>137</sup> Cs	3,00E+02	1,79E+03	2,10E+03
<sup>144</sup> Ce	3,00E+04	3,45E+05	3,45E+05
<sup>151</sup> Sm	3,00E+05 *	1,08E+07	1,08E+07
<sup>152</sup> Eu	3,00E+02	9,84E+02	1,18E+03
<sup>238</sup> Pu	3,00E+02 *	3,88E+03	3,88E+03
<sup>239</sup> Pu	3,00E+02	9,80E+02	9,80E+02
<sup>240</sup> Pu	3,00E+02	9,80E+02	9,80E+02
<sup>241</sup> Pu	3,00E+04	5,41E+04	5,41E+04
<sup>241</sup> Am	3,00E+02	1,18E+03	1,18E+03
<sup>244</sup> Cm	3,00E+02	1,85E+03	1,85E+03

Na základe dosiahnutých výsledkov je možné konštatovať, že nové odvozené uvoľňovacie úrovne môžu byť na základe vykonaných výpočtov pre väčšinu rádionuklidov vyššie minimálne o jeden rád oproti hodnotám uvedeným v legislatíve pre nepodmienené uvoľňovanie. Treba však zdôrazniť, že počas vykonaných analýz bol značný počet parametrov uvažovaný konzervatívne, čiže nachádza sa tu ešte priestor na ďalšie zvýšenie uvoľňovacích úrovní v prípade aplikácii vhodných opatrení, resp. uvažovaním menšej miery konzervativizmu.

### 4.3 Určenie podmienene uvoľniteľného množstva kovových materiálov pochádzajúcich z vyradovania JE A1 a V1

Ako už bolo spomínané v metodologickej časti práce, určenie podmienene uvoľniteľného množstva kovových rádioaktívnych materiálov pre obe uvažované JE bolo uskutočnené prostredníctvom vykonaných modelových výpočtov vo výpočtovom prostriedku OMEGA. Do úvahy boli brané iba modelové databázy zahŕňajúce vybrané kovové komponenty oboch JE, ktoré obsahovali nuklidové vektory popísané vyššie. V nasledujúcich podkapitolách sú bližšie popísané dosiahnuté výsledky pre obe uvažované elektrárne spolu s úvahou zaoberajúcou sa ocenením zisku/nákladov, ktorá poskytne prvotné odhady ohľadom možnosti ušetrenia finančných prostriedkov prostredníctvom aplikácie konceptu podmieneného uvoľňovania materiálov do ŽP.

#### 4.3.1 Určenie množstva podmienene uvoľniteľných materiálov z JE A1

V Tab. 4.3 sú uvedené dosiahnuté výsledky pre určenie množstva VNRO vzniknutej pri vyradovaní JE A1, ktoré by bolo možné podmienene uvoľniť s následným využitím v uvažovanej tunelovej konštrukcii.

**Tab. 4.3** Množstvo podmienene uvoľniteľnej ocele z JE A1 pre oba uvažované varianty uvažovaných dávkových limitov

Typ ocele	Množstvo podmienene uvoľniteľnej ocele - variant 10 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ (kg)	Množstvo podmienene uvoľniteľnej ocele - variant 50 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ (kg)
Uhlíková oceľ	112 620	1 045 300
Nehrdzavejúca oceľ	2 160	2 160
<b>Celkovo</b>	<b>114 780</b>	<b>1 047 460</b>

Ako je možné vidieť z dosiahnutých výsledkov, obidva uvažované varianty môžu viesť k podmienenému uvoľneniu nemalého množstva VNRO, pričom dominantnú časť v oboch prípadoch tvorí uhlíková oceľ.

Následne bola vykonaná analýza výstupných databázach vytvorených výpočtovým prostriedkom OMEGA s cieľom preskúmať možnosti optimalizácie pomocou identifikácie rádionuklidov, ktoré sú limitujúce z hľadiska dodržania súčtového pravidla popísaného v metodologickej časti práce. Najväčšie merné aktivity boli identifikované pre rádionuklid  $^{63}\text{Ni}$  (rádovo tisíce Bq/kg), avšak keďže uvoľňovacia úroveň pre tento rádionuklid je relatívne vysoká, uvedená hodnota predstavuje iba nepatrný zlomok z tejto úrovne (nepatrný je teda aj jeho príspevok v spomínanom súčtovom pravidle aplikovanom v prípade kontaminácie materiálu viacerými rádionuklidmi). Na základe vykonanej analýzy bolo preukázané že limitujúcimi rádionuklidmi sú rádionuklidy  $^{60}\text{Co}$  a  $^{152}\text{Eu}$ , ktorých spoločná aktivita predstavovala majoritnú časť pomerne k ich uvoľňovacím úrovniam.

### 4.3.2 Určenie množstva podmienene uvoľniteľných materiálov z JE V1

Určenie množstva podmienene uvoľniteľných kovových materiálov z JE V1 prebehlo na rovnakom princípe aký bol využitý v predchádzajúcom prípade. Dosiachnuté výsledky z vykonanej analýzy sa nachádzajú v nasledujúcej tabuľke.

**Tab. 4.4** Množstvo podmienene uvoľniteľnej ocele z JE V1 pre oba uvažované varianty uvažovaných dávkových limitov

Typ kovu	Množstvo podmienene uvoľniteľnej ocele - variant 10 $\mu$ Sv/rok (kg)	Množstvo podmienene uvoľniteľnej ocele - variant 50 $\mu$ Sv/rok (kg)
Uhlíková oceľ	31 000	950 350
Nehrdzavejúca oceľ	123 520	771 750
Farebné kovy*	5 390	27 990
<b>Celkovo</b>	<b>159 910</b>	<b>1 750 090</b>

\* Farebné kovy nie je možné využiť v tunelových konštrukciách, sú tu uvedené len informatívne, keďže výpočet vo výpočtovom prostriedku OMEGA bolo možné zbehnúť bez uvažovania farebných kovov iba v prípade vytvorenia novej databázy, resp. vykonaním rozsiahlych zmien v súčasnej databáze.

V prípade variantu uvažujúcim s 10  $\mu$ Sv/rok dávkovým limitom bolo možné uvoľniť len malé množstvo uhlíkovej ocele navyše oproti nepodmienenému uvoľňovaniu. Majoritnú časť uvoľniteľného materiálu v tomto variante tvorí nehrdzavejúca oceľ, ktorú by bolo vhodné vzhľadom na jej hodnotu, využiť v inom, vhodnejšom scenári. Na základe vykonaných výpočtov na rozsiahlej databáze zariadení JE V1, bolo možné uvoľniť podmienene aj farebné kovy, avšak tieto nie je možné využiť na výrobu výstužných prvkov v tunelových konštrukciách a je vhodné ich využiť v inom scenári už len vďaka ich vyššej nominálnej hodnote. Pri aplikácii 50  $\mu$ Sv/rok dávkového limitu je možné uvoľniť už značné množstvo ocele, aj keď niečo menej ako 45 % tvorí nehrdzavejúca oceľ, ktorú by bolo vhodné využiť skôr na iný priemyselný účel z dôvodu jej vyššej nominálnej hodnoty.

Pri identifikácii kritických rádionuklidov sa postupovalo totožným spôsobom ako v prípade databázy JE A1. Najvyššie merne aktivity boli zaznamenané podľa očakávania pre nuklidy  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{55}\text{Fe}$  a  $^{60}\text{Co}$  (rádovo tisíce Bq/kg), pričom  $^{60}\text{Co}$  jednoznačne dominoval z hľadiska vyššie spomínaného súčtového pravidla.

### 4.4 Analýza ocenenia zisku/nákladov

Analýza ocenenia zisku/nákladov je rozdelená na nasledovné dve časti:

- Analýza zisku/nákladov v rámci vykonávaných činností súvisiacich s manažmentom RAO,
- Analýza zisku/nákladov vyplývajúcich z výroby a použitia výstužných prvkov z VNRO.

Ocenenie nákladov pre jednotlivé uvažované varianty dávkových limitov bolo vykonané pomocou výpočtového prostriedku OMEGA, ktorý na základe vstupných údajov dokáže vypočítať náklady potrebné na jednotlivé čiastkové činnosti. Následne boli porovnané náklady vypočítané pre oba varianty podmieneného uvoľňovania so základným výpočtom,

ktorý bol vykonaný s uvažovaním súčasného stavu, t.j. iba s aplikáciou nepodmieneného uvoľňovania. Dosiachnuté výsledky z vykonaného porovnania sú sumarizované v Tab. 4.5.

**Tab. 4.5** Porovnanie ušetrených nákladov v rámci manažmentu RAO (A1 aj V1)

JE	Ušetrené náklady - variant 10 $\mu$ Sv/rok (€)	Ušetrené náklady - variant 50 $\mu$ Sv/rok (€)
A1	968 200	8 776 400
V1*	239 900	5 032 900

\* Do ušetrených nákladov v prípade JE V1 sú zarátané aj náklady ušetrené podmieneným uvoľnením farebných kovov

Na základe uvedených výsledkov je možné prehlásiť, že v oboch variantoch podmieneného uvoľňovania pri uvážení materiálov z oboch JE môže byť ušetrená značná časť finančných prostriedkov aplikáciou konceptu podmieneného uvoľňovania. Vyššie ušetrené náklady boli vypočítané pre prípad JE A1 pravdepodobne z dôvodu vyššej kontaminácie viacerých komponentov rôznymi rádionuklidmi vplyvom havárie spôsobujúcej aj vyššie náklady spojené s vykonávanými činnosťami súvisiacimi s manažmentom RAO. Navyše do ušetrených nákladov v prípade JE V1 boli zarátané aj náklady ušetrené podmieneným uvoľnením menšieho množstva farebných kovov, ktoré nebolo možné vyňať z analýzy bez vytvorenia novej rozsiahlej databázy, resp. rozsiahlejších úprav už existujúcej databázy JE V1. Skutočné ušetrené náklady v prípade JE V1 budú teda ešte o niečo nižšie.

Žiadaným výstupom z analýzy zisku/nákladov vyplývajúcich z výroby a použitia výstužných prvkov je dosiahnuť neutrálny stav, t.j. uvažuje sa s predajom výstužných prvkov staviteľovi tunelovej konštrukcie za zníženú cenu, ktorá bude pokrývať iba náklady spojené s výrobou výstužných prvkov a náklady na preškolenie zamestnancov. Znížením ceny výstužných prvkov by sa mohla vytvoriť aj vhodná motivácia pre reprezentantov z priemyselnej sféry prístupí minimálne k diskusii o aplikácii podmieneného uvoľňovania v praxi.

Diskusia venujúca sa implementácii konceptu podmieneného uvoľňovania bude viac ako žiaduca so všetkými zainteresovanými stranami (zástupcovia priemyslu, dozorných orgánov a verejnosti). Takisto bude vhodné, priam nevyhnutné vytvoriť legislatívny rámec jednoznačným spôsobom popisujúci požiadavky a podmienky, za akých by sa koncept podmieneného uvoľňovania mohol implementovať do súčasného zaužívaného systému nakladania s RAO.

#### 4.5 Optimalizačný scenár – zníženie množstva využitej VNRO

Opatrenie využívajúce zníženie množstva využitej VNRO v tunelovej konštrukcii spočíva v dvoch uvažovaných variantoch:

- Rádioaktívna oceľ by bola využitá vo forme jednej vrstvy výstužných sietí nachádzajúcej sa v primárnom ostení tunelovej rúry a vo forme pozdĺžnych výstužných prútov základového pásu predstavujúceho časť sekundárneho ostenia tunelovej rúry (Variant č. 1),
- Rádioaktívna oceľ by bola využitá iba vo forme jednej vrstvy výstužných sietí umiestnených v primárnom ostení tunelovej rúry (Variant č. 2),

Na základe vykonaných analýz bolo zistené, že limitujúcimi rádionuklidmi v oboch nuklidových vektoroch uvažovaných jadrových elektrární sú silné gamažiariče, najmä

rádionuklid  $^{60}\text{Co}$ , spôsobujúce externé ožiarenie pracovníkov počas výstavby tunelovej konštrukcie. Z tohto dôvodu budú ďalšie úvahy ohľadom návrhu optimalizačných opatrení smerované najmä k opatreniam vedúcim k zvýšeniu uvoľňovacích úrovní tohto spomínaného nuklidu, čo s vysokou pravdepodobnosťou môže priniesť zvýšenie množstva uvoľniteľného materiálu. V nasledujúcej tabuľke je možné vidieť zmenu uvoľňovacích úrovní pre limitujúci rádionuklid  $^{60}\text{Co}$  pre jednotlivé varianty uvažovaného opatrenia.

**Tab. 4.6** Možnosť zvýšenia uvoľňovacej úrovne  $^{60}\text{Co}$  znížením množstva využitej VNRO

Varianty	Uvoľňovacia úroveň variant 10 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ (Bq/kg)	Uvoľňovacia úroveň variant 50 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ (Bq/kg)
Pôvodný – t.j. 2 vrstvy sietí a prúty	4,86E+02	2,43E+02
Variant č. 1 (1 vrstva sietí a prúty)	1,05E+03	5,26E+03
Variant č. 2 (1 vrstva sietí)	1,11E+03	5,57E+03

Ako je možné vidieť, aplikáciou tohto opatrenia je možné zvýšiť uvoľňovaciu úroveň pre rádionuklid  $^{60}\text{Co}$  skoro dvojnásobne. Avšak je potrebné poznamenať, že v prípade oboch variantov dôjde aj k výraznému zníženiu množstva ocele, ktoré by bolo využité v tunelovej konštrukcii. Nespornou výhodou tohto opatrenia je možnosť zvýšenia uvoľňovacej úrovne pre limitujúci rádionuklid, ale za cenu významného zníženia využiteľného množstva VNRO v danej tunelovej konštrukcii. Avšak nie sú potrebné žiadne ďalšie finančné prostriedky na aplikáciu tohto opatrenia, ktoré by navýšili náklady oproti pôvodnému variantu, čo je možné považovať za výhodu oproti ostatným analyzovaným opatreniam.

Nasledovné tabuľky obsahujú množstvá podmienene uvoľniteľnej VNRO vzniknutej pri vyradovaní JE A1 a V1 pre jednotlivé uvažované varianty.

**Tab. 4.7** Množstvo podmienene uvoľniteľnej ocele z JE A1 pre jednotlivé varianty

Variant	Typ ocele	Množstvo podmienene uvoľniteľnej ocele - variant 10 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ (kg)	Množstvo podmienene uvoľniteľnej ocele - variant 50 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ (kg)
Pôvodný	Uhlíková oceľ	112 620	1 045 300
	Nehrdzavejúca oceľ	2 160	2 160
	<b>Celkovo</b>	<b>114 780</b>	<b>1 047 460</b>
Variant č. 1 (1 vrstva sietí a prúty)	Uhlíková oceľ	461 760	1 155 980
	Nehrdzavejúca oceľ	2 160	34 010
	<b>Celkovo</b>	<b>463 920</b>	<b>1 189 990</b>
Variant č. 2 (1 vrstva sietí)	Uhlíková oceľ	541 850	1 156 120
	Nehrdzavejúca oceľ	2 160	34 010
	<b>Celkovo</b>	<b>544 010</b>	<b>1 190 130</b>

Z dosiahnutých výsledkov pre prípad JE A1 vyplýva, že aplikácia opatrenia zahŕňajúceho zníženie množstva využitej VNRO je výhodná najmä v prípadoch nižšieho množstva podmienene uvoľniteľného materiálu a pri uvažovaní s variantom 10  $\mu\text{Sv}/\text{rok}$  dávkového limitu, kde dôjde k výraznému navýšeniu uvoľniteľného množstva. V prípade variantu



uvažujúcim s 50  $\mu\text{Sv}/\text{rok}$  dávkovým limitom nedošlo až k takému výraznému nárastu aplikáciou analyzovaného opatrenia.

Avšak aj napriek tomu množstvo podmienene uvoľniteľnej ocele presahuje využiteľné množstvo v tunelovej konštrukcii vo všetkých uvažovaných variantoch. Uvedená nevýhoda by sa dala odstrániť využitím ocele v podobných tunelových konštrukciách, resp. v iných aplikáciách, avšak analýza rádiologického vplyvu ako aj určenie uvoľňovacej úrovne by muselo byť realizované pre každú tunelovú konštrukciu zvlášť, keďže ako už bolo spomínané na začiatku, každá je svojím spôsobom jedinečná.

**Tab. 4.8** Množstvo podmienene uvoľniteľnej ocele z JE V1 pre jednotlivé varianty

Variant	Typ kovu	Množstvo podmienene uvoľniteľnej ocele - variant 10 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ (kg)	Množstvo podmienene uvoľniteľnej ocele - variant 50 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ (kg)
Pôvodný	Uhlíková oceľ	31 000	950 350
	Nehrdzavejúca oceľ	123 520	771 750
	Farebné kovy*	5 390	27 990
	<b>Celkovo</b>	<b>159 910</b>	<b>1 750 090</b>
Variant č. 1 (1 vrstva sietí a prúty)	Uhlíková oceľ	370 780	1 239 920
	Nehrdzavejúca oceľ	308 360	1 229 350
	Farebné kovy*	26 560	28 230
	<b>Celkovo</b>	<b>705 700</b>	<b>2 497 500</b>
Variant č. 2 (1 vrstva sietí)	Uhlíková oceľ	370 780	1 239 920
	Nehrdzavejúca oceľ	308 370	1 231 050
	Farebné kovy*	26 600	28 230
	<b>Celkovo</b>	<b>705 750</b>	<b>2 499 200</b>

\* Vid' poznámku k Tab. 3.4

Aj pre prípad JE V1 sa ukazuje, že aplikácia opatrenia zahŕňajúceho zníženie množstva využitej VNRO je výhodná najmä v prípadoch nižšieho množstva podmienene uvoľniteľného materiálu a pri uvažovaní s variantom 10  $\mu\text{Sv}/\text{rok}$  dávkového limitu, kde dôjde k výraznému navýšeniu uvoľniteľného množstva.

Avšak na rozdiel od predchádzajúceho prípadu, výpočty vykonané na databáze zariadení JE V1 preukázali, že aj v prípade variantu uvažujúcim s 50  $\mu\text{Sv}/\text{rok}$  dávkovým limitom dôjde k nemalému nárastu uvoľniteľného materiálu a tým aj ušetrených prostriedkov aplikáciou analyzovaného opatrenia. Rozdiely medzi uvažovanými variantmi č. 1 a 2 sú, ako je možné vidieť, zanedbateľné. Z tohto dôvodu sa ako výhodnejší javí variant č. 1, pri ktorom je možné využiť väčšie množstvo podmienene uvoľnenej ocele v analyzovanej tunelovej konštrukcii.

Tab. 4.9 obsahuje porovnanie ušetrených nákladov pre jednotlivé optimalizačné scenáre.

**Tab. 4.9** Porovnanie ušetrených nákladov pre jednotlivé varianty (A1 aj V1)

<b>JE</b>	<b>Varianty</b>	<b>Ušetrené náklady - variant 10 µSv/rok (€)</b>	<b>Ušetrené náklady - variant 50 µSv/rok (€)</b>
A1	Pôvodný	<b>968 200</b>	<b>8 776 400</b>
	Variant č. 1	<b>3 901 500</b>	<b>9 871 500</b>
	Variant č. 2	<b>4 742 300</b>	<b>9 873 400</b>
V1*	Pôvodný	<b>239 950</b>	<b>5 032 900</b>
	Variant č. 1	<b>1 755 300</b>	<b>7 095 750</b>
	Variant č. 2	<b>1 755 350</b>	<b>7 096 400</b>

\* Ušetrzenie uvažuje aj s recykláciou podmienene uvoľniteľných farebných kovov a nie je možné spustiť výpočet s vyňatím farebných kovov

Z dosiahnutých výsledkov vyplýva, že vplyvom aplikácie analyzovaného opatrenia je možné podmienene uvoľniť väčšie množstvo oceli a tým ušetriť viac finančných prostriedkov, najmä pri uvažovaní s 10 µSv/rok dávkovým limitom. Avšak takisto stojí za zváženie jeho aplikácia pri variante uvažujúcim s hodnotou dávkového limitu na úrovni 50 µSv/rok, keďže tiež môže dôjsť k nemalému dodatočnému ušetreniu finančných prostriedkov.

Okrem uvedenej možnosti optimalizácie existujú aj mnohé iné (napr. aplikácia prídavného tienenia, zníženie expozičnej doby pracovníkov a pod.), ktoré by v budúcnosti bolo vhodné bližšie preskúmať.

## 5. SÚHRN VÝSLEDKOV A NOVÝCH POZNATKOV, ZÁVERY PRE PRAX A ĎALŠÍ ROZVOJ VEDNEJ DISCIPLÍNY

Cieľom predkladanej dizertačnej práce je prispieť k riešeniu problematiky uvoľňovania rádioaktívnych materiálov do životného prostredia. Vychádzajúc z množstva medzinárodných odporúčaní zaoberajúcich sa rôznymi konceptmi uvoľňovania materiálov do životného prostredia s dôrazom na recykláciu a opätovné využitie čo najväčšieho množstva materiálov, bol bližšie popísaný a hodnotený koncept podmieneného uvoľňovania.

Dosiahnuté výsledky dizertačnej práce vychádzajúce zo stanovených cieľov možno rozdeliť do nasledovných bodov:

1. Bola vykonaná podrobná analýza súčasného stavu problematiky vyradovania JZ pričom dôraz bol kladený na proces uvoľňovania materiálov pochádzajúcich z procesu vyradovania JZ do životného prostredia. Dizertačná práca obsahuje popis prístupov vybraných krajín k manažmentu RAO a uvoľňovaniu materiálov do životného prostredia s cieľom poskytnúť prehľad rôznych prístupov aplikovaných v jednotlivých krajinách. Následne sú detailne uvedené najdôležitejšie dokumenty vydané viacerými renomovanými organizáciami zaoberajúce sa procesom uvoľňovania materiálov do životného prostredia a spôsobom hodnotenia rádiologického vplyvu takto uvoľnených materiálov. Cieľom týchto dokumentov, tvoriacich akési odporúčania, je stanoviť bezpečné uvoľňovacie úrovne pre materiály využité v rôznych aplikáciách, ktoré zabezpečia neprekročenie odporúčaného dávkového limitu a udržanie rizika ohrozenia zdravia na zanedbateľnej úrovni.
2. Bola navrhnutá a vypracovaná rozsiahla metodika pre ohodnotenie scenára využitia VNRO v tunelových konštrukciách. Metodika vychádza z medzinárodných odporúčaní a pozostáva z nasledovných krokov:
  - Určenie nuklidového vektora obsiahnutého v podmienene uvoľnenej VNRO;
  - Identifikácia možných ciest ožiarenia relevantných pre hodnotený scenár a uvažované rádionuklidy obsiahnuté v nuklidovom vektore, pričom bol popísaný aj spôsob vypočítania obdržanej individuálnej efektívnej dávky z jednotlivých identifikovaných ciest ožiarenia;
  - Získanie a popis značného množstva parametrov potrebných pre zhodnotenie rádiologického vplyvu jednotlivých etáp uvažovaných v scenári využitia VNRO;
  - Vytvorenie geometrických, materiálových a rádiologických modelov vykonávaných činností v jednotlivých etapách hodnoteného scenára a popísanie použitých výpočtových prostriedkov, resp. simulačných softvérov;
  - Identifikácia kritického (najviac ožiareného jednotlivca) spomedzi všetkých osôb analyzovaných v jednotlivých etapách;
  - Určenie kolektívnej efektívnej dávky v scenári využitia VNRO s cieľom preukázať, že úroveň radiačnej ochrany je v hodnotenom scenári dostatočná a nie je potrebná jej ďalšia optimalizácia;

- Odvodenie nových uvoľňovacích úrovni zabezpečujúcich zanedbateľný vplyv na zdravie pracovníkov a obyvateľov, ktorí by prichádzali do styku, resp. boli vystavený žiareniu pochádzajúceho z rádionuklidov obsiahnutých v podmienene uvoľnenom materiáli;
  - Určenie podmienene uvoľniteľného množstva ocele a popísanie použitého výpočtového prostriedku.
3. Bol komplexne analyzovaný rádiologický vplyv využitia VNRO v tunelovej konštrukcii v jednotlivých etapách z krátkodobého aj dlhodobého hľadiska, pričom boli uvažované rádionuklidy získané z rádiologickej charakterizácii JE A1 a V1. Ohodnotenie rádiologického vplyvu pozostávalo z nasledovných krokov:
    - Ohodnotenie rádiologického vplyvu (externé ožiarenie, inhalácia, ingescia a kontaminácia kože) v etape pretavovania a výroby výstužných komponentov v kontrolovanom pásme JE;
    - Ohodnotenie rádiologického vplyvu (externé ožiarenie) v etapách výstavby a prevádzky tunelovej konštrukcie;
    - Ohodnotenie rádiologického vplyvu z dlhodobého hľadiska (externé ožiarenie, inhalácia, ingescia a kontaminácia kože);
    - Identifikácia najviac ožiareného jednotlivca v jednotlivých etapách a následne kritického jedinca pre celý scenár využitia VNRO v tunelových konštrukciách;
    - Ohodnotenie kolektívnej dávky vo vybraných etapách hodnoteného scenára.
  4. Boli odvodené uvoľňovacie úrovne pre všetky analyzované rádionuklidy (nuklidový vektor JE A1 a JE V1), pričom bola identifikovaná limitujúca vykonávaná činnosť spolu s kritickou expozičnou cestou. V dizertačnej práci sú uvedené uvoľňovacie úrovne pre oba uvažované varianty dávkových limitov (10 a 50  $\mu\text{Sv/rok}$ ). Pre rádionuklidy limitované procesom pretavovania sú uvedené aj hodnoty vypočítanej uvoľňovacej úrovne a limitujúca činnosť v prípade ak by sa vplyv počas procesu pretavovania neuvažoval, resp. boli by vykonané určité opatrenia na zlepšenie radiačnej situácie (aplikácia ochranných pomôcok na zníženie interného ožiarenia na čo najmenšie možnú rozumne dosiahnuteľnú úroveň, ochranné tienenie v prípade externého ožiarenia, resp. častejšie striedanie pracovníkov a pod.).
  5. Následne bolo určené množstvo podmienene uvoľniteľných kovových materiálov pochádzajúcich z vyradovania JE A1 a V1 (boli uvažované iba vybrané komponenty oboch elektrární). Takisto bola popísaná a vypracovaná analýza možností optimalizácie s cieľom zvýšiť spomínané množstvo uvoľniteľného materiálu.
  6. Na záver bola vykonaná analýza ocenenia zisku/nákladov v prípade aplikácie konceptu podmieneného uvoľňovania pre základný variant aj pre varianty uvažujúce s rôznymi optimalizačnými opatreniami.

K základným prínosom dizertačnej práce patrí vytvorenie metodiky a postupnosti krokov potrebných pri hodnotení ľubovoľného scenára využitia podmienene uvoľnených materiálov v priemyselných aplikáciách. Vytvorená metodika je univerzálna, t.j. dá sa aplikovať na rôzne JE, rôzne parametre pretavovacej linky, rôzne scenáre využitia podmienene uvoľnenej ocele, rôzne dávkové limity a pod., za predpokladu zhromaždenia dostatočného množstva údajov potrebných pre ohodnotenie rádiologického vplyvu. Využitím vytvorenej metodiky je možné

určiť množstvo podmienene uvoľniteľného materiálu z rôznych JE, ktoré je využiteľné v konkrétnej priemyselnej aplikácii, pri uvážení údajov získaných z rádiologickej charakterizácie hodnotených JE.

Určenie množstva uvoľniteľného materiálu a analýza zisku/nákladov predstavuje hlavný prínos pre prax, keďže na základe dosiahnutých výsledkov dizertačnej práce je aplikáciou konceptu podmieneného uvoľňovania možné recyklovať a opätovne využiť nezanedbateľné množstvo ocele (v prípade **JE A1** približne **1 200 ton**, pre prípad **JE V1** približne **2500 ton**). Hodnotený scenár využitia VNRO v tunelových konštrukciách môže viesť k ušetreniu značných finančných prostriedkov potrebných na realizáciu činností spojených s manažmentom RAO vrátane nákladov na pretavovanie kovových rádioaktívnych materiálov (v prípade **JE A1** – až do výšky približne **10 miliónov €**, **JE V1** – až do výšky približne **7 miliónov €**) ako naznačujú výpočty vykonané v dizertačnej práci. Podobným spôsobom je možné na základe metodického postupu vytvoreného v predkladanej dizertačnej práci určiť množstvo uvoľniteľného materiálu aj ušetrené finančné prostriedky pre inú JE, resp. pre iný scenár využitia VNRO. Implementácia konceptu podmieneného uvoľňovania môže byť obzvlášť výhodná najmä v krajinách s väčším počtom JE, kde sa pri vyradovaní vyprodukuje aj väčšie množstvo VNRO. Takisto s nástupom trendu vedúcemu k prísnejším limitom hmotnostných aktivít pre niektoré rádionuklidy [16] bude pravdepodobne výhodnosť implementácie konceptu podmieneného uvoľňovania do praxe narastať.

Medzi ďalšie prínosy dizertačnej práce patrí aj vytvorenie databáz údajov potrebných pre ohodnotenie krátkodobých a dlhodobých vplyvov. Získané databázy by bolo vhodné v budúcnosti aktualizovať, resp. doplniť niektoré údaje, ktoré boli určené aplikáciou odborného odhadu. Avšak je potrebné poznamenať, že pri hodnotení konkrétneho scenára je potrebné získať a analyzovať značné množstvo údajov o vykonávaných činnostiach v hodnotenom scenári. Takisto je potrebné získať, resp. konzultovať technické parametre priemyselnej stavby, resp. inej aplikácie s odborníkmi v tejto oblasti, aby vytvorené modely čo možno najviac zodpovedali realite. V opačnom prípade by mohlo dôjsť k aplikácii neprimeranej miery konzervativizmu, ktorá by mohla mať za následok umelé, nežiaduce zníženie množstva uvoľniteľného a recyklovateľného materiálu.

Na záver je nevyhnutné vysloviť fakt, že výsledky dizertačnej práce minimálne naznačujú, že koncept podmieneného uvoľňovania je realizovateľný a dokonca môže viesť k uvoľneniu značného množstva VNRO, ktorá by inak musela byť spracovaná, upravovaná a ukladaná na príslušný typ úložiska RAO, čím by sa nielen zbytočne vynaložili náklady na spracovanie a úpravu tejto ocele, ale znížila by sa aj kapacita úložiska, keďže by sa v ňom ukladali aj kovové materiály, ktoré by mohli byť uvoľnené, recyklované a opätovne využité. Ďalším významným prínosom je samotná recyklácia hodnotných kovových materiálov, ktorá so sebou prináša nielen šetrenie životného prostredia ale tým, že cena výstužných prvkov by pozostávala iba z nákladov potrebných na ich výrobu, by mohlo dôjsť k ušetreniu finančných prostriedkov aj na strane zástupcov z priemyselnej sféry.

Avšak do budúcnosti je vhodné na jednej strane hlbšie analyzovať rôzne možnosti s cieľom optimalizovať využitie oceli v jednotlivých priemyselných aplikáciách a znižovať mieru

aplikovaného konzervativizmu. Takisto by bolo vhodné dosiahnuté výsledky z výpočtových prostriedkov aspoň do určitej miery validovať meraním v praxi.

Na strane druhej je potrebné problematiku podmieneného uvoľňovania diskutovať s nasledovnými zainteresovanými stranami:

- Orgány štátnej moci (bude nevyhnutné vytvoriť legislatívny rámec pre podmienené uvoľňovanie, v ktorom budú jednoznačným spôsobom definované požiadavky, podmienky, povinnosti a práva jednotlivých zainteresovaných strán),
- Zástupcovia priemyslu (bude potrebné identifikovať slabé miesta, resp. nevýhody podmieneného uvoľňovania z pohľadu priemyselnej aplikácie a motivovať jednotlivých zástupcov priemyslu, aby mali záujem využívať podmienene uvoľnený materiál)
- Verejnosť (bude viac ako žiaduce vysvetliť verejnosti, že riziko ohrozenia zdravia v aplikácii podmieneného uvoľňovania je na bezvýznamnej, zanedbateľnej úrovni)

Aj napriek vyššie uvedeným viacerým prekážkam sa javí implementácia konceptu podmieneného uvoľňovania ako výhodná a bolo by vhodné sa týmto konceptom bližšie venovať aj na medzinárodnej úrovni, keďže aj samotná Medzinárodná agentúra pre atómovú energiu prejavila záujem o zefektívnenie manažmentu rádioaktívnych materiálov najmä cestou zvýšenia recyklovateľného množstva materiálov. Opierajúc sa o výsledky dizertačnej práce, dosiahnutie tohto cieľa je uskutočniteľné aj pomocou aplikácie konceptu podmieneného uvoľňovania.

## POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] International Atomic Energy Agency. *Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance: Safety Guide No. RS-G-1.7*. Vienna: IAEA, 2004. ISBN 92-0-109404-7.
- [2] International Atomic Energy Agency. *Derivation of Activity Concentrations Values for Exclusion, Exemption and Clearance, IAEA Safety Reports Series No. 44*. Vienna: IAEA, 2005. ISBN 92-0-113104-6.
- [3] International Atomic Energy Agency. *Managing Low Radioactivity Material from the Decommissioning of Nuclear Facilities, IAEA Technical Reports Series No. 462*. Vienna: IAEA, 2008. ISBN 978-92-0-109907-5.
- [4] European Commission. *Recommended radiological protection criteria for the recycling of metals from the dismantling of nuclear installations, Radiation Protection No. 89*. Luxemburg: EC, 1998. ISBN 92-828-3284-8.
- [5] European Commission. *Basis for the definition of surface contamination clearance levels for recycling or reuse of metals arising from the dismantling of nuclear installations; Radiation Protection No. 101*. Luxemburg: EC, 1998. ISBN 92-828-5098-6.
- [6] European Commission. *Methodology and models used to calculate individual and collective doses from the recycling of metals from the dismantling of nuclear installations, Radiation Protection No. 117*. Luxemburg: EC, 2000. ISBN 92-828-9171-2.
- [7] European Commission. *Recommended radiological protection criteria for the clearance of buildings and building rubble from the dismantling of nuclear installations Radiation Protection No. 113*. Luxemburg: EC, 2000. ISBN 92-828-9172-0.
- [8] European Commission. *Definition of clearance levels for the release of radioactively contaminated buildings and building rubble, Final report, Radiation Protection No. 114*. Luxemburg: EC, 2000. ISBN 92-828-9170-4.
- [9] European Commission. *Practical use of the concepts of clearance and exemption – Part I: Guidance on General Clearance Levels for Practices; Recommendations of Group of Experts established under the terms of Article 31 of the Euratom Treaty; Radiation Protection No. 122*. Luxemburg: EC, 2000.
- [10] European Commission. *Evaluation of the application of the concepts of exemption and clearance for practices according to title III of Council Directive 96/29/Euratom of 13 May 1996 in EU Member States, Radiation Protection No. 134*. Luxemburg: EC, 2003. ISBN 92-894-6358-9.
- [11] European Commission. *Comparative Study of EC and IAEA Guidance on Exemption and Clearance Levels, Radiation Protection No. 157*. EC, 2010.
- [12] European Commission. *Recycling and reuse of radioactive material in the controlled nuclear sector, EUR 18041*. EC, 1998.

- [13] Organisation for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency. *Recycling and reuse of scrap metals*. Paris: OECD/NEA, 1996.
- [14] Organisation for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency. *Release of Radioactive Materials and Buildings from Regulatory Control, Status Report*. Paris: OECD/NEA, 2008. ISBN 978-92-64-99061-6.
- [15] Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Labour Organisation, International Atomic Energy Agency, OECD Nuclear Energy Agency, Pan American Health Organization, World Health Organization. *International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No.115*. Vienna: IAEA, 1996. ISBN 92-0-104295-7.
- [16] International Atomic Energy Agency. *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, Interim Edition*. Vienna: IAEA, 2011. ISBN 978-92-0-120910-8.
- [17] Smernica Rady č. 96/29/EURATOM z 13. mája 1996, ktorá stanovuje základné bezpečnostné normy ochrany zdravia pracovníkov a obyvateľstva pred nebezpečenstvami vznikajúcimi v dôsledku ionizujúceho žiarenia.
- [18] Committee on Alternatives for Controlling the Release of Solid Materials from Nuclear Regulatory Commission-Licensed Facilities, National Research Council. *The Disposition Dilemma – Controlling the Release of Solid Materials from Nuclear Regulatory Commission-Licensed Facilities*. Washington D.C.: National Research Council, 2002.
- [19] U.S. Nuclear Regulatory Commission. *Radiological Assessments for Clearance of Materials from Nuclear Facilities, Main Report, NUREG-1640*. Washington D.C.: US NRC, 2003.
- [20] International Atomic Energy Agency. *Programmes and Systems for Source and Environmental Radiation Monitoring, IAEA Safety Reports Series No. 64*. Vienna: IAEA, 2010. ISBN 978-92-0-112409-8.
- [21] International Atomic Energy Agency. *Monitoring for Compliance with Exemption and Clearance Levels, IAEA Safety Reports Series No. 67*. Vienna: IAEA, 2012. ISBN 978-92-0-115810-9.
- [22] International Atomic Energy Agency. *Derivation of Activity Limits for the Disposal of Radioactive Waste in Near Surface Disposal Facilities, IAEA-TECDOC-1380*. Vienna: IAEA, 2003.
- [23] International Atomic Energy Agency. *Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, IAEA Technical Reports Series No. 472*. Vienna: IAEA, 2010
- [24] International Commission on Radiological Protection. *Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations, ICRP Publication 107*. Elsevier, 2008.
- [25] Swedish Radiation Protection Authority. *Validation of Dose Calculation Programmes for Recycling, SSI Report 2002:23*. Stockholm: SSI, 2002. ISSN 0282-4434.



- [26] SNOPKO, J.: *Technické riešenie výstavby tunelových konštrukcií, podkladová štúdia*, Bratislava: 2010.

## **PUBLIKOVANÉ PRÁCE AUTORA SÚVISIACE S PROBLEMATIKOU DIZERTAČNEJ PRÁCE**

### **ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch**

- [1] HRNČÍŘ, T., NEČAS, V.: *Recycling and Reuse of Very Low Level Radioactive Steel in Motorway Tunnel Scenario*. Nuclear Engineering and Design (odoslaný článok)

### **ADE Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch**

- [2] HRNČÍŘ, T., NEČAS, V.: *Radiation Impact of Very Low Level Radioactive Steel Reused in Motorway Tunnel Constructions*. Progress in Nuclear Science and Technology (prijatý článok)

### **ADF Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch**

- [3] HRNČÍŘ, T., NEČAS, V.: *Podmienené uvoľňovanie materiálov z vyradovania jadrových elektrární a ich vplyv na obyvateľstvo*. EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. ISSN 1335-2547. Roč. 15, č. 6 (2009), s. 10-11.
- [4] HRNČÍŘ, T., NEČAS, V.: *Špecifický scenár priemyselného využitia veľmi nízkoaktívnych ocelí v tunelových konštrukciách*. EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. ISSN 1335-2547. Roč. 17, č. 4, 2011, s. 12-14.
- [5] BARÁTOVÁ, D., HRNČÍŘ, T.: *Modelovanie externého ožiarovania pracovníkov pri ukladaní rádioaktívneho odpadu do povrchového úložiska*. (<http://www.posterus.sk/?p=11836>) Posterus. ISSN 1338-0087. Vol. 4, Iss. 10, 2011.
- [6] SLIMÁK, A., HRNČÍŘ, T., NEČAS, V.: *Manipulácia s vláknobetónovými kontajnermi v areáli jadrového zariadenia*. (<http://www.posterus.sk/?p=12223>) Posterus. ISSN 1338-0087. Vol. 4, Iss. 12, 2011.
- [7] SLIMÁK, A., HRNČÍŘ, T., NEČAS, V.: *Porovnanie oboch vybraných scenárov manipulácie s obalovými súbormi uskladnenými v areáli jadrového zariadenia*. EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. (prijatý článok)

### **AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách**

- [8] HRNČÍŘ, T., PÁNIK, M., NEČAS, V.: *Modelling of Motorway Tunnels Scenario for Utilization of Conditionally Released Radioactive Materials* [CD-Rom]. ICEM 2010: 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management. Tsukuba, Japan, 3.-7.10.2010. New York: ASME, 2010.
- [9] PÁNIK, M., HRNČÍŘ, T., NEČAS, V.: *Reuse Of Conditionally Released Radioactive Materials From NPP Decommissioning Applied In Motorway Bridges Construction* [CD-Rom]. ICEM 2010: 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management. Tsukuba, Japan, 3.-7.10.2010. New York: ASME, 2010.

- [10] HRNČÍŘ, T., NEČAS, V.: *Impact of Nuclide Vector Composition Contained in Conditionally Released Steel Reused in Motorway Tunnels Scenario on Calculated Individual Effective Doses*. ICEM 2011: 14th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management. Reims, France, September 25 - 29, 2011. New York : ASME, 2011.
- [11] HRNČÍŘ, T., NEČAS, V.: *Ohodnotenie externého ožiarovania pracovníkov a obyvateľstva v scenári využitia podmienene uvoľnenej veľmi nízkoaktívnej ocele v tunelových konštrukciách*. Mikulášské setkání Mladé generace ČNS 2011, Brno, 7-9. December. 2011, Brno: FSI VUT Brno, 2011.
- [12] PÁNIK, M., HRNČÍŘ, T., NEČAS, V.: *Radiation Impact of Very Low Level Radioactive Steel Reused in Building Industry with Emphasis on External Exposure Pathway*. WM Symposia 2012, Phoenix, Arizona, USA, February 26 – March 1. 2012.
- [13] HRNČÍŘ, T., NEČAS, V.: *Assessment of Relevant Exposure Pathways in Scenario of Reuse of Very Low Level Radioactive Steel in Motorway Tunnel Constructions*. HND 2012: 9th International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids, Zadar, Croatia, 3-6 June 2012. Zadar: HND, 2012.

#### **AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách**

- [14] HRNČÍŘ, T., NEČAS, V.: *Vplyv vyradovania jadrových zariadení na životné prostredie s dôrazom na uvoľňovanie materiálov z vyradovania*. XI. Banskoštiavnické dni. Mierové využívanie atómovej energie. Aplikácia nukleárných technológií a stanovovanie rádionuklidov v životnom prostredí. Environmentálne záťaže a komunálne odpady. Banská Štavnica, 7.-9.10.2009. Bratislava: SNUS, 2009. SBN 978-80-88806-80-6. s. 87-90.
- [15] HRNČÍŘ, T., PÁNIK, M., NEČAS, V.: *Application Possibilities of Conditional Release of Materials Arising from Nuclear Installations Decommissioning in Slovak Republic* [CD-Rom]. International Scientific Event - Power Engineering 2010, Energy, Ecology, Economy: 9th International Scientific Conference. Tatranské Matliare, Slovakia, 18.-20.5. 2010. Bratislava: STU v Bratislave, 2010. ISBN 978-80-89402-23-6.
- [16] HRNČÍŘ, T., PÁNIK, M., NEČAS, V.: *Comparison of Two Selected Application Possibilities of Utilization of Conditionally Released Materials Arising from Nuclear Installations Decommissioning* [CD-Rom]. ELITECH'10: 12th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 26.5.2010. Bratislava: STU v Bratislave, 2010. ISBN 978-80-227-3303-8.
- [17] PÁNIK, M., HRNČÍŘ, T., NEČAS, V.: *Optimization of Conditioned Radioactive Waste Fulfillment of Fibre-Reinforced Concrete Container* [CD-Rom]. International Scientific Event - Power Engineering 2010, Energy, Ecology, Economy: 9th International Scientific Conference. Tatranské Matliare, Slovakia, 18.-20.5. 2010. Bratislava: STU v Bratislave, 2010. ISBN 978-80-89402-23-6.
- [18] PÁNIK, M., HRNČÍŘ, T., NEČAS, V.: *Optimization of Conditioned Radioactive Waste Fulfillment of Fibre-Reinforced Concrete Container Regarding Transport and Disposal Limits* [CD-Rom]. ELITECH'10: 12th Conference of Doctoral Students. Bratislava,

- Slovak Republic, 26.5.2010. Bratislava: STU v Bratislave, 2010. ISBN 978-80-227-3303-8.
- [19] SLIMÁK, A., HRNČÍŘ, T. (ved. práce), NEČAS, V. (ved. práce): *Nakladanie s materiálmi vzniknutými v procese vyradovania jadrových zariadení* [CD-Rom]. ŠVOČ 2010: Študentská vedecká a odborná činnosť. Zborník vybraných prác, 21.4.2010. Bratislava: STU v Bratislave, FEI, 2010. ISBN 978-80-227-3286-4.
- [20] BARÁTOVÁ, D., HRNČÍŘ, T. (ved. práce): *Dávková záťaž pracovníkov pri ukladaní rádioaktívneho odpadu do povrchového úložiska*. ŠVOČ 2011: Študentská vedecká a odborná činnosť. Zborník vybraných prác. Bratislava, Slovak Republic, Bratislava: STU v Bratislave FEI, 2011. ISBN 978-80-227-3508-7, s. 327-332.
- [21] HRNČÍŘ, T., PÁNIK, M., NEČAS, V.: *Recycling and Reuse of Conditionally Released Metal Radioactive Waste in Tunnel Building Scenario* [USB flash]. Power Engineering 2011. Energy - Ecology - Economy 2011: Tatranské Matliare, Slovakia, June 7-9, 2011. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2011. ISBN 978-80-89402-40-3.
- [22] HRNČÍŘ, T., PÁNIK, M., NEČAS, V.: *The Utilization of Conditionally Released Radioactive Metal Waste in Motorway Tunnel Construction*. ELITECH'11: 13th Conference of Doctoral Students Faculty of Electrical Engineering and Information Technology. Bratislava, Slovak Republic, 17 May, 2011. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2011. ISBN 978-80-227-3500-1, s. 1-5.
- [23] PÁNIK, M., HRNČÍŘ, T., NEČAS, V.: *Evaluation of Personnel External Exposure during Construction of Concrete Bridge which Reuse Radioactive Steels*. ELITECH'11: 13th Conference of Doctoral Students Faculty of Electrical Engineering and Information Technology. Bratislava, Slovak Republic, 17 May, 2011. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2011. ISBN 978-80-227-3500-1, s. 1-5.
- [24] PÁNIK, M., HRNČÍŘ, T., PAULÍK, P.: *Perspektívne využitie rádioaktívnej ocele v inžinierskych stavbách*. Príprava, navrhovanie a realizácia inžinierskych stavieb: Medzinárodná vedecká konferencia - CONECO 2011. Bratislava, 31.3.2011. Bratislava: STU v Bratislave SvF, 2011. ISBN 978-80-227-3469-1. s. 1-9.
- [25] PÁNIK, M., HRNČÍŘ, T., NEČAS, V.: *Reuse of Radioactive Materials from NPP Decommissioning Applied in Concrete Bridges Construction* [USB flash]. Power Engineering 2011. Energy - Ecology - Economy 2011: Tatranské Matliare, Slovakia, June 7-9, 2011. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2011. ISBN 978-80-89402-40-3.
- [26] SLIMÁK, A. HRNČÍŘ, T. (ved. práce), NEČAS, V. (ved. práce): *Vybraný scenár manipulácie s vláknobetónovými kontajnermi počas ich skladovania*. ŠVOČ 2011: Študentská vedecká a odborná činnosť. Zborník vybraných prác. Bratislava, Slovak Republic, 4.5.2011. Bratislava: STU v Bratislave FEI, 2011. ISBN 978-80-227-3508-7. s. 315-320.
- [27] BARÁTOVÁ, D., HRNČÍŘ, T., NEČAS, V.: *Analysis of Radioactivity Increase of Radwaste Filled in Fibre-Reinforced Concrete Container Regarding External Exposure of Workers*. Power Engineering 2012. Energy - Ecology - Economy 2012: 11th

- International Scientific Conference EEE 2012. Tatranské Matliare, Slovakia, May 15-17, 2012. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2012. ISBN 978-80-89402-49-6. s. 73-74.
- [28] HRNČÍŘ, T., NEČAS, V.: *Exposure Pathways Analysis in Scenario of Very Low Level Radioactive Steel Utilization in Tunnel Constructions*. Power Engineering 2012. Energy - Ecology - Economy 2012: 11th International Scientific Conference EEE 2012. Tatranské Matliare, Slovakia, May 15-17, 2012. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2012. ISBN 978-80-89402-49-6. s. 67-68.
- [29] SLIMÁK, A. HRNČÍŘ, T., NEČAS, V.: *Evaluation of an External Exposure of a Worker During Manipulation with Waste Packages Stored in Bohunice Radioactive Waste Treatment Centre*. Power Engineering 2012. Energy - Ecology - Economy 2012: 11th International Scientific Conference EEE 2012. Tatranské Matliare, Slovakia, May 15-17, 2012. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2012. ISBN 978-80-89402-49-6. s. 61-62.
- [30] HRNČÍŘ, T., NEČAS, V.: *Derivation of Specific Clearance Levels of Radionuclides Contained in Conditionally Released Radioactive Steel*. ELITECH'12: 14th Conference of Doctoral Students Faculty of Electrical Engineering and Information Technology. Bratislava, Slovak Republic, 22 May, 2012. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2012.
- [31] SLIMÁK, A. HRNČÍŘ, T. (ved. práce), NEČAS, V. (ved. práce): *Hodnotenie alternatívnych scenárov manipulácie s VBK počas doby ich skladovania v areáli jadrového zariadenia*. ŠVOČ 2012: Študentská vedecká a odborná činnosť. Zborník vybraných prác. Bratislava, Slovak Republic, 25.4.2011. Bratislava: STU v Bratislave FEI, 2012.

## **SUMMARY**

### **CONDITIONAL RELEASE OF MATERIALS ARISING FROM DECOMMISSIONING OF NPPs WITH THEIR SUBSEQUENT REUSE IN TUNNEL CONSTRUCTIONS**

Decommissioning of nuclear power plants represents challenging and complex process. Since significant number of nuclear power plants approaches the end of their lifetime, decommissioning has become an important topic. Considerable amount of materials with activity that slightly exceeds legislatively defined limits for unconditional release are generated during mentioned process. In line with international incentives for optimization of process of radioactive materials management, there were developed various concepts related mainly to release and reuse of precisely this type of materials. Dissertation thesis deals with one of developed concepts - the conditional release.

The concept of conditional release is devoted to reuse of radioactive materials in previously defined industrial applications. Since the unconditional release considers any possible reuse of materials, i.e. also the worst case scenario from radiation protection point of view, concept of conditional release could lead to increase of clearance levels for particular radionuclides.

Dissertation thesis is devoted to development of the methodology for the real application of the concept of conditional release. Thesis comprises methods for the assessment of radiological impacts related to reuse of conditionally released materials, derivation of new clearance levels and, last but not least, it describes determination of recyclable amount of materials and possibility of cost saving. Developed methodology was applied on scenario of reuse of conditionally released steel arisen from decommissioning of A1 and V1 nuclear power plants in form of reinforcing components used in tunnel constructions.