

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

Ing. Michal Pánik

Autoreferát dizertačnej práce

**METODIKA HODNOTENIA VPLYVU MATERIÁLOV
PODMIENENE UVOĽNENÝCH Z JADROVÉHO ZARIADENIA
NA ŽIVOTNÉ PROSTREDIE Z DLHODOBÉHO HĽADISKA**

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 a v spoločnosti DECOM, a.s. Trnava.

Predkladateľ: Ing. Michal Pánik
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. RNDr. Pavol Rajec, DrSc.
Univerzita Komenského v Bratislave
Prírodovedecká fakulta
Katedra jadrovej chémie
Mlynská dolina, 842 15 Bratislava

RNDr. Pavol Ragan, PhD.
Úrad verejného zdravotníctva SR
Trnavská cesta 52, 826 45 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa konáoh.
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	5
2. CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	7
3. ZVOLENÁ METÓDA VÝPOČTOVÉHO MODELOVANIA VPLYVU PODMIENENÉHO UVOĽŇOVANIA MATERIÁLOV NA ŽIVOTNÉ PROSTREDIE A OBYVATEĽSTVO.....	8
3.1. SYSTÉM HODNOTENIA BEZPEČNOSTI PODMIENENÉHO UVOĽŇOVANIA MATERIÁLOV	8
3.1.1. Kontext bezpečnostnej analýzy	9
3.1.2. Popis systému pre podmienené uvoľňovanie.....	10
3.1.3. Vývoj scenárov podmieneného uvoľňovania materiálov	12
3.1.4. Tvorba koncepčných modelov	13
3.1.5. Tvorba matematického modelu podmieneného uvoľňovania materiálov.....	18
3.1.6. Realizácia výpočtov dlhodobého pôsobenia podmienene uvoľnených materiálov.....	24
4. VÝSLEDKY DIZERTAČNEJ PRÁCE S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKOV	24
4.1. VYPOČÍTANÉ UVOĽŇOVACIE ÚROVNE A IDENTIFIKÁCIA KRITICKEJ EXPOZIČNEJ CESTY....	24
4.2. ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV	26
4.3. CITLIVOSTNÁ ANALÝZA.....	27
5. SÚHRN VÝSLEDKOV, NOVÝCH POZNATKOV, ZÁVERY PRE PRAX A ROZVOJ VEDNEJ DISCIPLÍNY	28
POUŽITÁ LITERATÚRA	31
PUBLIKOVANÉ PRÁCE.....	32
SUMMARY	37

ÚVOD

Produkciiu elektriny v rámci jadrovej energetiky môžeme v súčasnosti považovať za nevyhnutnú. Ako každé iné odvetvie energetiky alebo priemyslu aj jadrová energetika poskytuje ešte mnoho priestoru na vylepšenia, optimalizáciu a inovatívne riešenia. Medzi nevýhody, problémy a záležitosti vyžadujúce vylepšenie patrí aj oblasť manažmentu rádioaktívnych odpadových materiálov. V tomto období mnohým jadrovým zariadeniam po celom svete končí doba životnosti a budú musieť podstúpiť proces vyradovania. Vyradovanie sa vyznačuje produkciou špecifických rádioaktívnych materiálov (RAM), odlišných od RAM z prevádzky typologicky aj objemovo. Najmä množstvo rôznych druhov ocele a betónovej sutiny s nízkou aktivitou vzniknuté v procese vyradovania bude značné. Je to dôsledok demontáže rozsiahlych technologických zariadení zväčša z ocele a demolácie masívnych stavebných konštrukcií z betónu. Mnohokrát obsah rádionuklidov v týchto materiáloch presahuje hodnoty povolené pre nepodmienené uvoľnenie do životného prostredia (ŽP), takže toto rozsiahle množstvo materiálov by muselo byť spracované, upravené a uložené na príslušné úložisko ako rádioaktívny odpad. Takýto postup si vyžaduje nemalé technické, finančné a ľudské zdroje. Existuje však aj iná alternatíva, ktorá by mohla byť v mnohých smeroch prospešná. Jedná sa o tzv. „podmienené uvoľňovanie“ materiálov. Táto koncepcia ráta s vypracovaním detailného plánu na využitie uvoľnených materiálov ako súčasti rôznych stavebných konštrukcií spolu s vypracovaním štúdie vplyvu takejto činnosti na ŽP a obyvateľstvo. Materiál musí byť dlhodobovo viazaný v stavebnej konštrukcii, aby sa zabránilo jeho nekontrolovanému úniku a tak sa zabezpečilo prirodzené zníženie aktivity daného materiálu.

Dizertačná práca je zameraná na vytvorenie metodiky hodnotenia dlhodobého vplyvu podmieneného uvoľňovania materiálov a ich opätovného využitia v stavebných konštrukciách na životné prostredie. Navrhnutá metodika bola využitá pri vytvorení výpočtových modelov širokého spektra vhodných stavebných konštrukcií so zameraním na uľahčenie budúceho využitia metodiky v technickej praxi.

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

Rádioaktívne materiály s nízkou úrovňou aktivity predstavujú vo svete, čo sa týka objemu, najväčšiu skupinu, pričom vznikajú pri prevádzke jadrových zariadení (JZ) ale najmä pri ich vyradovaní. Významné medzinárodné organizácie vydali niekoľko dokumentov venovaných manažmentu nízkoaktívnych RAM a ich vplyvu na ŽP a človeka. Dokumenty sú prehľadne uvedené v Tab. 1.

V dizertačnej práci sú zosumarizované kategorizácie RAM vo vybraných štátoch sveta s dôrazom na uvoľňovanie do ŽP spolu s uvedením súčasných a predpokladaných množstiev RAM podľa kategórií. Zo sumarizácie je zrejmé, že množstvo odpadových materiálov s nízkou úrovňou rádioaktivity, teda materiálov potenciálne vhodných pre podmienené uvoľňovanie a opätovné využitie, sa bude v blízkej budúcnosti rádovo pohybovať v miliónoch ton. Pri takomto množstve potenciálne využiteľného materiálu je pozitívny hospodársky efekt nepopierateľný. Niektoré krajiny majú koncept podmieneného uvoľňovania priamo uvedený v legislatíve (napr. Kanada), iné sa mu venujú nepriamo (napr. Česká a Slovenská republika) a v niektorých prípadoch sa s uvoľňovaním do ŽP neuvažuje (napr. Francúzsko). Príkladom systematického postupu v oblasti uvoľňovania materiálov do ŽP je USA, kde dlhodobo existuje snaha dosiahnuť vyššiu jednotnosť a vytvoriť pevný systém podporujúcu legislatívu, ktorá by sa zaoberala nakladaním s veľmi nízkoaktívnymi pevnými materiálmi. Za týmto účelom boli vytvorené rozsiahle štúdie environmentálnych vplyvov. Realitou momentálne je, že koncept podmieneného uvoľňovania sa zatiaľ nikde vo svete v praxi neaplikoval.

Na Slovensku sa uvoľňovaniu materiálov do ŽP venuje Nariadenie vlády SR č. 345/2006 Z. z. [1], ktoré stanovuje parametre pri hodnotení vplyvu uvoľňovania na človeka. Týmito parametrami sú individuálna efektívna dávka obdržaná osobou z kritickej skupiny na úrovni 10 $\mu\text{Sv/rok}$ (prípadne 50 $\mu\text{Sv/rok}$ ak sa preukáže, že činnosť je z hľadiska radiačnej ochrany optimálna) a kolektívna efektívna dávka na úrovni 1 man Sv/rok. Pre uľahčenie realizácie nepodmieneného uvoľňovania nariadenie uvádza vo svojej prílohe tabuľku maximálnych hmotnostných aktivít rádionuklidov. Pri neprekročení hodnôt z prílohy sa automaticky predpokladá dávkové zaťaženie nižšie ako 10 $\mu\text{Sv/rok}$ a tento fakt nie je potrebné dodatočne preukazovať.

Tab. 1 Dokumenty medzinárodných organizácií venované problematike

Orga- nizácia	Názov dokumentu (rok vydania)	Popis
IAEA*	Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance (2004)	Dokument rozpracováva reálnu implementáciu konceptov vynechania, vyňatia a uvoľňovania materiálov spod radiačnej kontroly.
IAEA*	Managing Low Radioactivity Material from the Decommissioning of Nuclear Facilities (2008)	Dokument sa venuje plánovaniu a implementácii rôznych stratégií nakladania s veľkým množstvom nízkoaktívneho RAM vznikajúceho v procese vyradovania JZ.
EK**	The Basic Safety Standards for the Health Protection of the General Public and Workers against the Dangers of Ionizing Radiation (1996)	Základný dokument venovaný ochrane zdravia ľudí pred ionizujúcim žiarením.
EK**	Definition of Clearance Levels for the Release of Radioactively Contaminated Buildings and Building Rubble (1999)	V dokumentoch boli vypracované scenáre reprezentujúce rôzne spôsoby uvoľňovania stavebného odpadu do ŽP.
EK**	Recommended Radiological Protection Criteria for the Clearance of Buildings and Building Rubble from the Dismantling of Nuclear Installations (2000)	Tiež boli vypočítané a navrhnuté uvoľňovacie úrovne pre sledované materiály.
EK**	Practical Use of the Concepts of Clearance and Exemption (2000)	Dokument v rámci uvoľňovania materiálov do ŽP stanovuje všeobecné uvoľňovacie úrovne hmotnostnej aktivity jednotlivých rádionuklidov obsiahnutých v uvoľňovanom materiáli.
EK**	Methodology and Models Used to Calculate Individual and Collective Doses from the Recycling of Metals from the Dismantling of Nuclear Installations (2002)	Dokument popisuje metodiku a modely použité pri výpočtoch individuálnej a kolektívnej efektívnej dávky vyplývajúcej z recyklácie kovov z demontáže pri vyradovaní JZ.

* IAEA – Medzinárodná agentúra pre atómovú energiu

** EK – Európska komisia

V mnohých z uvedených dokumentov rezonuje snaha o zvýšenie miery recyklácie odpadových materiálov z nízkou úrovňou aktivity a o zníženie miery konzervativizmu pri hodnotení vplyvu uvoľňovania a recyklácie týchto materiálov na človeka a ŽP. Viacnásobne spomenutou záležitosťou bola aj snaha o zjednotenie legislatívy rôznych štátov ohľadne kategorizácie rádioaktívnych materiálov a prístupu k uvoľňovaniu do ŽP, aby sa zabránilo prípadným problémom pri cezhraničnom transporte uvoľňovaných materiálov.

2. CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Základným cieľom dizertačnej práce je vypracovanie metodiky pre hodnotenie vplyvu materiálov podmienene uvoľnených z jadrových zariadení na životné prostredie z dlhodobého hľadiska. Metodika má vytvoriť základ pre zhodnotenie dlhodobých vplyvov podmienene uvoľnených materiálov (PUM) recyklovaných a opätovne využitých v stavebnej konštrukcii.

Jednotlivé úlohy vedúce k splneniu stanoveného cieľa sú nasledovné:

1. Vypracovanie komplexnej analýzy problematiky uvoľňovania materiálov do ŽP a sumarizácia prístupu vybraných krajín a významných organizácií ku kategorizácii rádioaktívnych materiálov a uvoľňovaniu materiálov do ŽP. Popis prístupu zodpovedných orgánov Slovenskej republiky ku kategorizácii rádioaktívnych materiálov a uvoľňovaniu materiálov do ŽP.
2. Návrh postupu pre proces hodnotenia vplyvu podmienene uvoľnených materiálov na ŽP z dlhodobého hľadiska.
3. Vytvorenie koncepčných modelov jednotlivých aplikácií podmienene uvoľnených materiálov v stavebných konštrukciách.
4. Zostavenie databázy údajov potrebných pre realizáciu výpočtových modelov zvolených scenárov.
5. Výber výpočtového prostriedku vhodného na realizáciu výpočtových modelov, popis jeho vlastností a vytvorenie funkčných modelov v tomto softvérovom prostredí.
6. Realizácia modelových výpočtov pre zvolené stavebné konštrukcie, citlivostná analýza a interpretácia získaných výsledkov.

3. ZVOLENÁ METÓDA VÝPOČTOVÉHO MODELOVANIA VPLYVU PODMIENENÉHO UVOĽŇOVANIA MATERIÁLOV NA ŽIVOTNÉ PROSTREDIE A OBYVATEĽSTVO

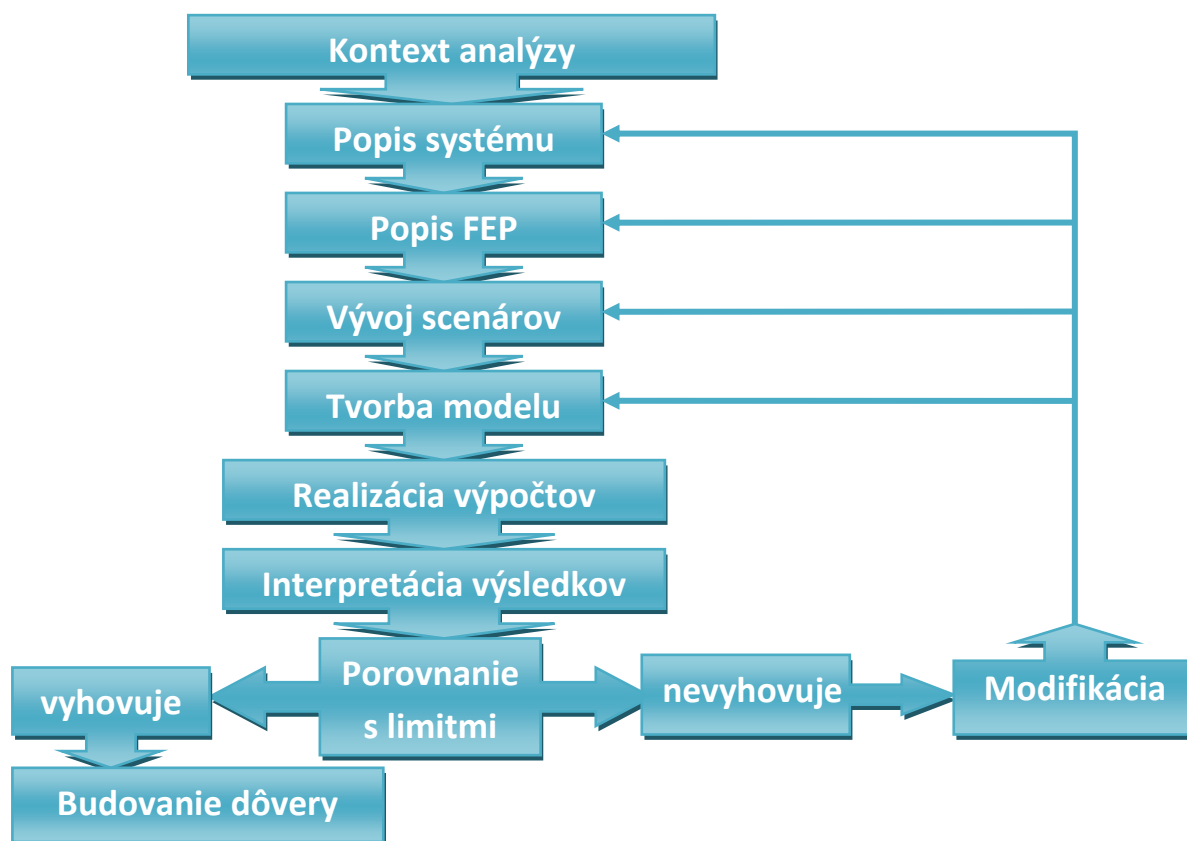
3.1. Systém hodnotenia bezpečnosti podmieneného uvoľňovania materiálov

Podmienenému uvoľňovaniu materiálov, ktoré obsahujú rádionuklidy, do ŽP musí predchádzať komplexné hodnotenie bezpečnosti z hľadiska vplyvu týchto materiálov na ŽP. Musia byť stanovené predpoklady pre bezpečnú realizáciu podmieneného uvoľňovania rádioaktívnych materiálov a ich opätovného využitia v stavebných konštrukciách. Najdôležitejším parametrom, ktorý sa z hľadiska vplyvu na ŽP sleduje je dávka z ožiarenia obdržaná osobou, ktorá prišla do styku s rádionuklidmi pochádzajúcimi z podmienene uvoľneného materiálu. Limity platné pre dávkové zaťaženie osôb sú stanovené v príslušnej legislatíve [1]. Limit dávky reprezentuje mieru rizika vzniku ochorenia ako dôsledku ožiarenia. Pred samotnou realizáciou podmieneného uvoľnenia materiálu a jeho opätovného využitia na vopred stanovený účel musí byť teda vypracovaná bezpečnostná analýza, ktorá bude obsahovať hodnoverné stanovenie dávkového zaťaženia obyvateľstva.

Podmienené uvoľňovanie materiálov a ich opätovné využitie v stavebných konštrukciách predstavuje uvádzanie rádioaktívnych materiálov do ŽP. Materiál môže byť fixovaný v matrici a umiestnený nad alebo pod povrchom zeme. Čo sa týka formy a obsahu bezpečnostnej analýzy potrebnej pre posúdenie procesu podmieneného uvoľňovania je možné nájsť analógiu s procesom ukladania rádioaktívnych odpadov (RAO) s nízkou úrovňou spracovania a úpravy do jednoduchých povrchových úložísk. Problematika bezpečnosti ukladania nízko a stredneaktívnych RAO do povrchových úložísk je dostatočne dobre preskúmaná. Spomínaná analógia spolu s úrovňou dostupných vedomostí umožňuje aplikovať štruktúru bezpečnostných analýz úložísk RAO na systém podmieneného uvoľňovania materiálov.

Obr. 1 graficky znázorňuje štruktúru a spojitosti medzi jednotlivými časťami bezpečnostnej analýzy.

V závislosti od typu a určenia bezpečnostnej analýzy môžu byť niektoré z častí bezpečnostnej analýzy zredukované.



Obr. 1 Štruktúra bezpečnostnej analýzy [2]

3.1.1. Kontext bezpečnostnej analýzy

Hlavným cieľom bezpečnostnej analýzy podmieneného uvoľňovania materiálov z dlhodobého hľadiska je preskúmať možnosti a vplyv sledovaného materiálu na ŽP a človeka. Pod pojmom podmienené uvoľňovanie materiálov rozumieme uvoľňovanie materiálov spod kontroly dozorných orgánov. Uvoľňovanie materiálov s vyššou mernou aktivitou môže byť realizované len vopred presne stanoveným spôsobom a to recykláciou a opätovným použitím ako súčasti zvolenej stavebnej konštrukcie. Ako parameter pri podmienenom uvoľňovaní vystupuje dávka z ožiarenia, konkrétne ročná individuálna efektívna dávka obdržaná členom kritickej skupiny osôb a kolektívna efektívna dávka. Odporúčania stanovujúce úroveň týchto dávok sú uvedené vo viacerých medzinárodných dokumentoch [3], [4] a na Slovensku ich definuje zákon [1].

Problematikou uvoľňovania materiálov do ŽP sa venuje množstvo dokumentov medzinárodných a svetových organizácií. Niektoré z nich venujú priestor aj konkrétne podmienenému uvoľňovaniu [3], [5], [6], [7], čo svedčí o rastúcom záujme o recykláciu a opätovné využívanie veľmi nízkoaktívnych materiálov celosvetovo. Mnohé jadrové zariadenia vo svete vstupujú do procesu

vyraďovania, s čím je spojená aj produkcia veľkého množstva materiálov z aktivitou len mierne presahujúcou limity špecifickej aktivity platné pre nepodmienené uvoľňovanie. Snaha o uchovanie hodnoty týchto materiálov ako suroviny, prípadne šetrenie finančných prostriedkov na spracovanie, úpravu a ukladanie týchto materiálov na špecializované úložiská prirodzene vedie k myšlienke na ich recykláciu a opätovné využitie. Účelom bezpečnostnej analýzy je teda preukázať realizovateľnosť myšlienky podmieneného uvoľňovania materiálov a stanoviť jej obmedzenia z dlhodobého hľadiska.

Časový rozsah, v ktorom bola realizovaná bezpečnostná analýza bol 10 000 rokov. Jedná sa o obdobie, v ktorom dosiahne maximum dávky z ožiarenia každý zo skúmaných rádionuklidov a teda je možné vyhlásiť, že rádiologicky horšia situácia sa po uplynutí tohto času s najväčšou pravdepodobnosťou neočakáva.

Ako PUM je v kontexte tejto bezpečnostnej analýzy uvažovaná betónová sutina a oceľový šrot (uhlíková oceľ). Betónová sutina je vhodná ako stavebný materiál len pri stavbe cestnej konštrukcie, kde by mohla byť použitá ako podkladový materiál. Sutina nemôže byť použitá ako zložka čerstvého betónu z hľadiska jej pevnostných a iných vlastností. Oceľový šrot musí podstúpiť proces pretavby v špecializovanom zariadení, kde by bol spracovaný do formy ingotov. Tieto by boli následne spracované do formy požadovaného výrobku, ktorý by bol použitý ako súčasť stavebnej konštrukcie.

3.1.2. Popis systému pre podmienené uvoľňovanie

Systém pre podmienené uvoľňovanie rádioaktívnych materiálov sa delí na 3 základné časti a to zoznam sledovaných rádionuklidov a pole blízkych interakcií, geosféru a biosféru.

Sledované rádionuklidy a pole blízkych interakcií

Problematika dlhodobého pôsobenia podmieneného uvoľňovania rádioaktívnych materiálov bola v rámci tejto analýzy poňatá všeobecne, t.j. zoznam rádionuklidov, s ktorým bolo uvažované nebol prebratý z rádiologickej charakterizácie konkrétneho jadrového zariadenia. Zoznam rádionuklidov je teda možné nazvať všeobecným, pričom bol čerpaný z dokumentu IAEA [8] a doplnený o rádionuklidy z charakterizácií vyradovaných jadrových elektrární na Slovensku [9], [10]. Zoznam uvažovaných rádionuklidov uvádza Tab. 2.

Tab. 2 Zoznam rádionuklidov

Rádionuklid	H-3	Ni-63	Ag-110m	Sm-147	Ra-226	U-234
	Be-10	Zn-65	Sn-121m	Sm-151	Ac-227	U-235
	C-14	Se-79	Sb-125	Eu-152	Th-228	U-236
	Na-22	Sr-90	Te-125m	Eu-154	Ra-228	Np-237
	K-40	Mo-93	Sn-126	Tl-204	Ac-228	Pu-238
	Ca-41	Zr-93	I-129	Pb-210	Th-229	U-238
	Mn-54	Nb-93m	Cs-134	Po-210	Th-230	Pu-239
	Fe-55	Nb-94	Cs-135	Pb-212	Pa-231	Pu-240
	Co-57	Tc-99	Cs-137	Bi-212	Th-232	Am-241
	Ni-59	Ru-106	Ce-144	Bi-214	Pa-233	Pu-241
	Co-60	Pd-107	Pm-147	Pb-214	U-233	Cm-244

Rádionuklidy nachádzajúce sa v šedých bunkách majú dobu polpremeny kratšiu ako 15 rokov. Tento fakt ich robí zanedbateľnými z hľadiska dlhodobého vplyvu. Inými slovami, kritická expozičná cesta relevantná pre každý z označených rádionuklidov bude identifikovaná a významná v krátkodobom horizonte. Pre úplnosť však bolo z dlhodobého hľadiska uvažované aj s týmito rádionuklidmi. Sledovaná výstupná veličina výpočtov je individuálna efektívna dávka obdržaná členom kritickej skupiny osôb a z nej bola následne odvodená hodnota limitnej hmotnostnej aktivity pre každý rádionuklid – tzv. „uvoľňovacia úroveň“. V prípade aplikácie vypočítaných uvoľňovacích úrovní na vektor rádionuklidov z konkrétneho jadrového zariadenia s najväčšou pravdepodobnosťou pôjde o zmes pozostávajúcu z niekoľkých rádionuklidov. V tomto prípade je potrebné uvoľňovaciu úroveň každého z rádionuklidov v zmesi modifikovať na základe vzorca (1) [11]:

$$\sum_{i=1}^n \frac{c_i}{c_{Li}} \leq 1,0 \quad (1)$$

kde: c_i – hmotnostná aktivita rádionuklidu i v zmesi [Bq/kg];

c_{Li} – uvoľňovacia úroveň rádionuklidu i [Bq/kg];

n – počet rádionuklidov v zmesi [-].

Pole blízkych interakcií je reprezentované vlastnou formou PUM, ktorá vo svojej vnútornej štruktúre fixuje rádionuklidy. Konkrétne sa jedná o formu betónovej drviný v prípade odpadového betónu. Oceľový šrot je v stavebných

konštrukciách využitý vo forme výstužných tyčí, prípadne iných výrobkov, forma materiálu je teda pretavená uhlíková oceľ. Ďalšou bariérou pre únik rádionuklidov je materiál/matrica, do ktorej je inkorporovaný podmienené uvoľnený materiál. Táto bariéra je aplikovaná len v prípade železobetónových konštrukcií, kde je oceľová výstuž pokrytá betónom. Prírodnú bariéru v poli blízkyh interakcií tvorí geologické prostredie, v modelových prípadoch konkrétne piesčitá pôda.

Geosféra – pole vzdialených interakcií

Potom, ako rádionuklidy z PUM preniknú cez všetky bariéry patriace do poľa blízkyh interakcií, dostanú sa do geosféry. Geosféra – pole vzdialených interakcií je v modelových prípadoch tvorené ílovitou pôdou, v ktorej prúdi podzemná voda, ktorá odplavuje rádionuklidy ďalej do biosféry. Tieto sa môžu dostať do studne, ktorá je zdrojom pitnej a úžitkovej vody.

Biosféra

Primárne médium, ktorým sa rádionuklidy dostanú do biosféry je voda. Voda kontaminovaná rádionuklidmi môže byť čerpaná zo studne alebo z jazera/nádrže. Voda je následne využívaná ako pitná voda pre obyvateľstvo a úžitkové zvieratá. Zároveň je využívaná ako úžitková voda na zavlažovanie poľnohospodárskej pôdy, ktorá slúži na pestovanie zeleniny, obilnín a trávnatých porastov. Obilniny a zelenina sú priamo konzumované obyvateľstvom, prípadne sú podávané ako krmivo pre hospodárske zvieratá – hovädzí dobytok. Živočíšne produkty - mlieko a mäso z dobytka sú následne konzumované človekom.

3.1.3. Vývoj scenárov podmieneného uvoľňovania materiálov

Scenáre dlhodobého pôsobenia PUM sa dajú rozčleniť na základe druhu PUM a na základe typu stavebnej konštrukcie, v ktorej bude tento materiál použitý. Využitím tejto logiky bolo vytvorených nasledovných 6 scenárov:

- S1 – Cestná komunikácia
- S2 - Nadzemná železobetónová konštrukcia
- S3 - Podzemná železobetónová konštrukcia
- S4 - Nadzemná železná konštrukcia
- S5 - Podzemná železná konštrukcia
- S6 – Tunel

3.1.4. Tvorba koncepčných modelov

Koncepčný model je potrebné vytvoriť pre každý významne sa odlišujúci scenár. Zdrojom žiarenia sú v prípade všetkých scenárov rádionuklidy zo súboru uvedeného v Tab. 2. Hodnoty výstupných veličín je potrebné získať pre každý rádionuklid zvlášť, teda môžeme považovať zdroj žiarenia pri každej z realizácií výpočtov za „mononuklidický“.

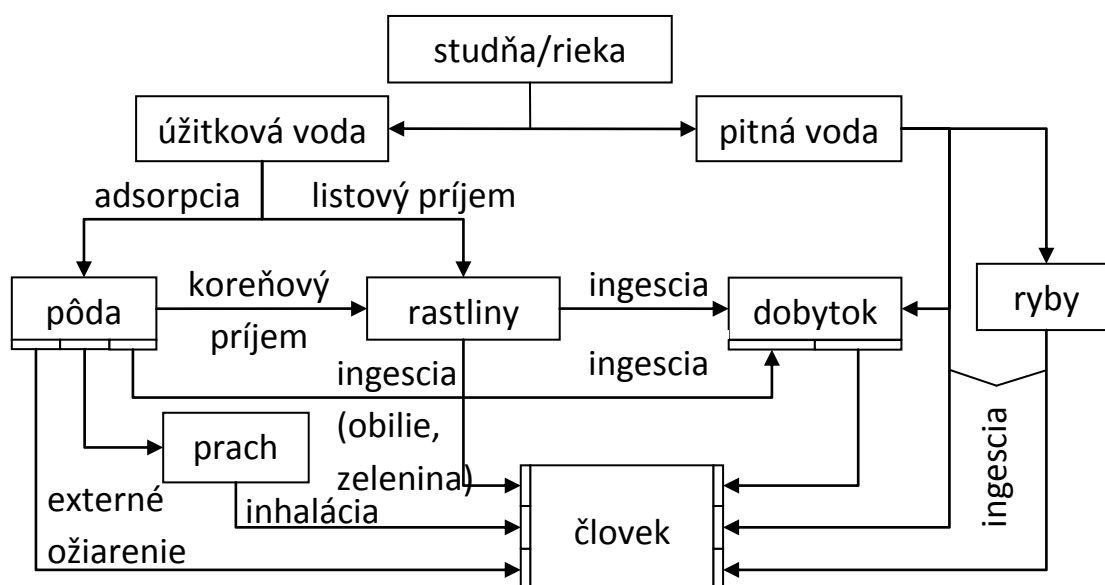
Sledovaným parametrom pri každom zo scenárov je dávka z ožiarovania z jednotlivých expozičných ciest. Uvažované expozičné cesty sú nasledovné:

- Externé ožiarovanie
- Inhalácia
- Ingescia

Rádionuklidy sa dostanú na zemský povrch formou zavlažovania kontaminovanou vodou zo studne alebo jazera/nádrže. Hodnoty veličín potrebných pre výpočty boli stanovené z technickej praxe a vhodných medzinárodných dokumentov.

Externé ožiarovanie je ožiarovanie z kontaminovanej pôdy, po povrchu ktorej sa pohybujú osoby vykonávajúce napr. poľnohospodárske práce. Pod expozičnú cestu externého ožiarovania patrí aj externé ožiarovanie kože osôb od prachu, ktorý sa na ňu usadzuje. Expozičná cesta inhalácie spočíva vo vdychovaní častíc kontaminovaného prachu. Ingescia rádionuklidov nastáva požitím kontaminovanej vody alebo kontaminovanej potravy.

Kontaminovaná voda zo studne alebo z jazera/nádrže sa nevyužíva len ako pitná voda pre obyvateľstvo, ale aj sú ňou napájané aj hospodárske zvieratá a zavlažovaná poľnohospodárska pôda, pričom v jazere sa uskutočňuje chov rýb. Na takejto pôde sú pestované obilniny, zelenina a trávnatý porast. Rádionuklidy sa cez koreňový alebo listový systém dostanú do rastlín, odtiaľ buď priamo do ľudského organizmu, alebo do organizmu zvierat (uvažuje sa len s hovädzím dobytkom) odkiaľ sa formou mäsa a mlieka dostávajú do ľudského organizmu. Príjem rádionuklidov nastáva v prípade scenára s jazerom aj cestou konzumácie kontaminovaného rybieho mäsa. Koncepčný model biosféry schematicky zobrazuje Obr. 2.



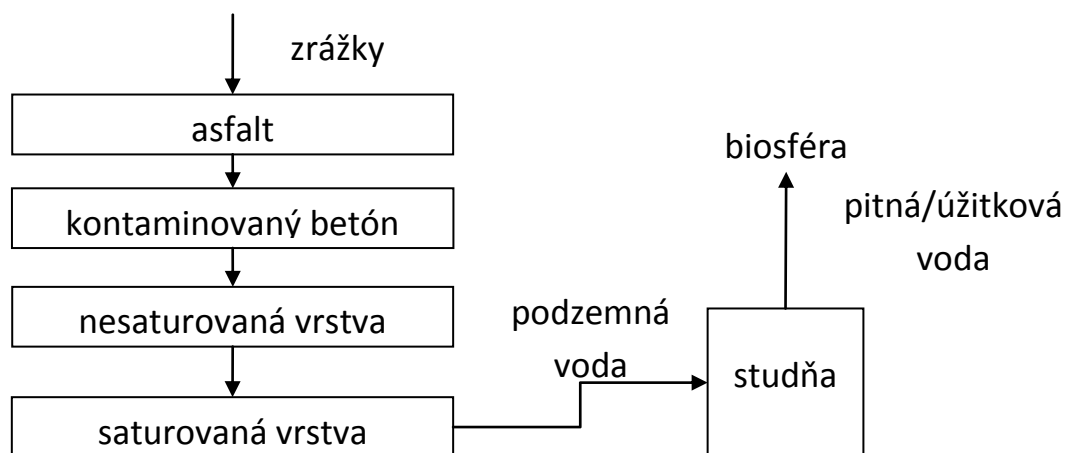
Obr. 2 Schéma koncepčného modelu biosféry

Scenár S1 – Cestná komunikácia

V scenári S1 – „Cestná komunikácia“ je uvažované s využitím kontaminovanej betónovej drviny z vyradovania JZ ako podkladového materiálu pri budovaní cesty. Rozmerové parametre použité v koncepčnom modeli boli získané z technickej praxe v oblasti stavebníctva. Betónová drvina tvorí súvislú vrstvu ležiacu na podklade z piesčitej zeminy – nesaturovanej vrstve. Kryciu vrstvu betónového podkladu tvorí asfalt, ktorý degraduje a teda zvyšuje podiel prepustenej dažďovej vody počas doby svojej životnosti. Po uplynutí tejto doby sa uvažuje s úplnou degradáciou krycej vrstvy asfaltu, t.j. cez vrstvu prenikne plné množstvo zrážok. Pod nesaturovanou vrstvou sa nachádza saturovaná vrstva tvorená ílovitou pôdou. Dažďová voda, ktorá prenikne krycou vrstvou asfaltu postupne rozpúšťa matricu (betón) obsahujúcu rádionuklidy, ktoré odplavuje cez nesaturovanú vrstvu do saturovanej vrstvy odkiaľ podzemnou vodou putujú do studne využívanej ako zdroj pitnej a úžitkovej vody. Rádionuklidy sa rozdelia medzi pevné skupenstvo a kvapalné médium na základe distribučných koeficientov. V modeli sa uvažuje s advekčne-disperzným procesom transportu rádionuklidov. Difúzia sa neuvažuje z dôvodu, že tento proces je veľmi pomalý a významne minoritný v porovnaní s advekciou v prostredí s inou ako veľmi nízkou hydraulickou vodivosťou. Pri kontakte kontaminovanej dažďovej vody s nekontaminovanou podzemnou vodou nastáva miešanie a koncentrácia rádionuklidov sa znižuje. Veľkosť tohto nariedenia určuje veličina Darcyho rýchlosť prúdenia podzemnej vody.

Sledovaným parametrom je koncentrácia rádionuklidov vo vode studne. Hodnota koncentrácie tvorí základ pre výpočet dávok z ožiarovania zo všetkých uvažovaných expozičných ciest.

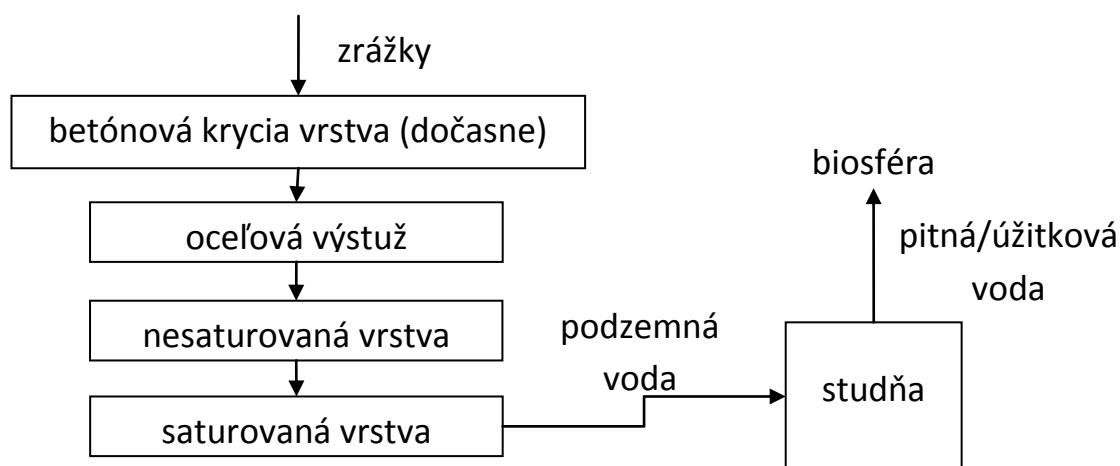
Koncepčný model scenára S1 schematicky zobrazuje Obr. 3.



Obr. 3 Schéma koncepčného modelu scenára S1

Scenár S2 - Nadzemná železobetónová konštrukcia

V scenári S2 – „Nadzemná železobetónová konštrukcia“ je využívaná podmienenne uvoľnená rádioaktívna uhlíková oceľ ako výstuž železobetónovej konštrukcie vo forme výstužných prútov. Príklad scenára si možno v reálnej praxi predstaviť ako nadzemnú časť železobetónového mosta. V koncepčnom modeli sa uvažuje s parametrami prevzatými z technickej dokumentácie k stavbe reálneho železobetónového mosta. Krycia vrstvu betónu, ktorá oddeľuje oceľovú výstuž od vonkajšieho prostredia podlieha degradácií vplyvom zmien chemizmu a agresivity vonkajšieho prostredia. Ak krycia vrstva prestáva plniť svoju funkciu a ďalej svojim chemickým stavom nechráni oceľovú výstuž, táto začína korodovať. Produkty korózie ocele odpadávajú z povrchu materiálu, prípadne sú odplavované dažďovou vodou a takto sa dostávajú do pôdy pod stavbou – nesaturovanej vrstvy tvorenej piesčitou pôdou. Ďalej je proces migrácie rádionuklidov zhodný so scenárom S1. Koncepčný model scenára S2 schematicky zobrazuje Obr. 4.



Obr. 4 Schéma koncepčného modelu scenára S2

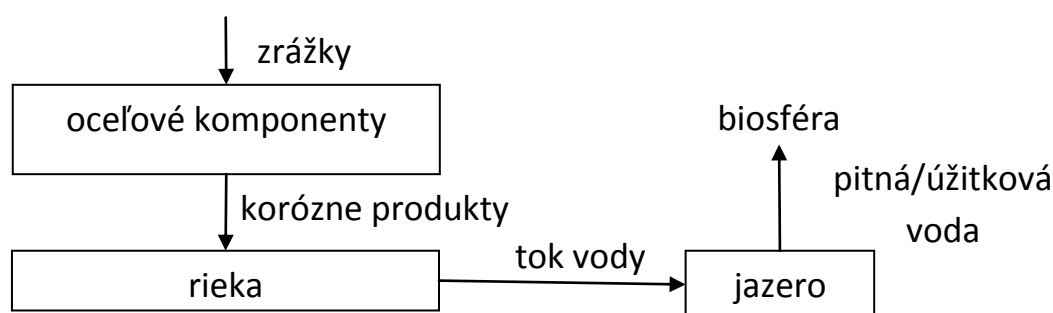
Scenár S3 - Podzemná železobetónová konštrukcia

V scenári S3 – „Podzemná železobetónová konštrukcia“ je využívaná podmienene uvoľnená rádioaktívna uhlíková oceľ ako výstuž základovej železobetónovej konštrukcie vo forme výstužných prútov. Aplikáciu si možno predstaviť vo forme základov rôznych stavieb, napr. mostov alebo protipovodňových stien. Práve veľkopriemerové pilóty v základoch mosta boli použité ako predloha koncepčného modelu tohto scenára. Krycia vrstva betónu, ktorá oddeľuje oceľovú výstuž od saturovanej vrstvy, obklopujúcej podzemnú konštrukciu, podlieha degradácii pôsobením chemizmu pôdy a podzemnej vody. Počas doby životnosti krycej vrstvy bude výstužná oceľ „zakonzervovaná“ a nebude na nej prebiehať korózia a úbytok materiálu. Potom začne nastávať korózia a úbytok materiálu. Produkty korózie dažďová voda, ktorá preniká do nesaturovanej zóny, odplavuje smerom k saturovanej zóne tvorenej ílovitou pôdou a cestou podzemnej vody migrujú do studne. Schéma koncepčného modelu scenára S3 je zhodná so schémou pre scenár S2 a zobrazuje ju Obr. 4.

Scenár S4 - Nadzemná železná konštrukcia

V scenári S4 – „Nadzemná železná konštrukcia“ je využívaná podmienene uvoľnená rádioaktívna uhlíková oceľ vo forme oceľových komponentov rozličných tvarov a rozmerov. Komponenty môžu byť reálne využité napr. na konštrukciu plechovej haly skladu alebo oceľového železničného mosta. Plechové komponenty oceľového mosta boli zvolené ako predloha pre tvorbu koncepčného modelu k scenáru S4. V bežnej praxi oceľové železničné mosty

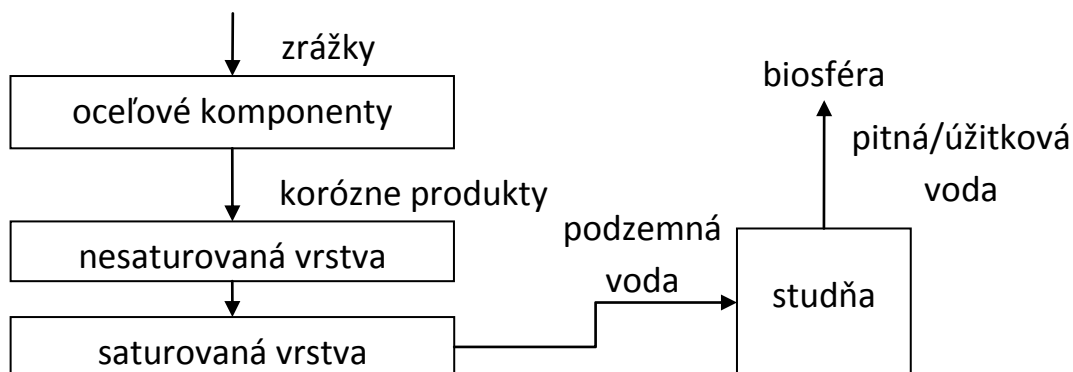
slúžia na prekonanie prírodnej prekážky – rieky. V období po skončení funkčnosti ochranného náteru nastáva korózia komponentov mosta a produkty korózie spolu so zrážkami stekajú do rieky, prípadne priamo do rieky odpadávajú menšie skorodované fragmenty materiálu. Rieka odplavuje rádionuklidy do jazera obsahujúceho sedimenty. Voda z tohto jazera je používaná ako pitná a úžitková analogicky s vodou zo studne v scenároch S1 až S3. Okrem toho sa využíva aj na chov rýb následne konzumovaných obyvateľstvom. Konceptný model scenára S4 zobrazuje Obr. 5.



Obr. 5 Schéma koncepčného modelu scenára S4

Scenár S5 - Podzemná železná konštrukcia

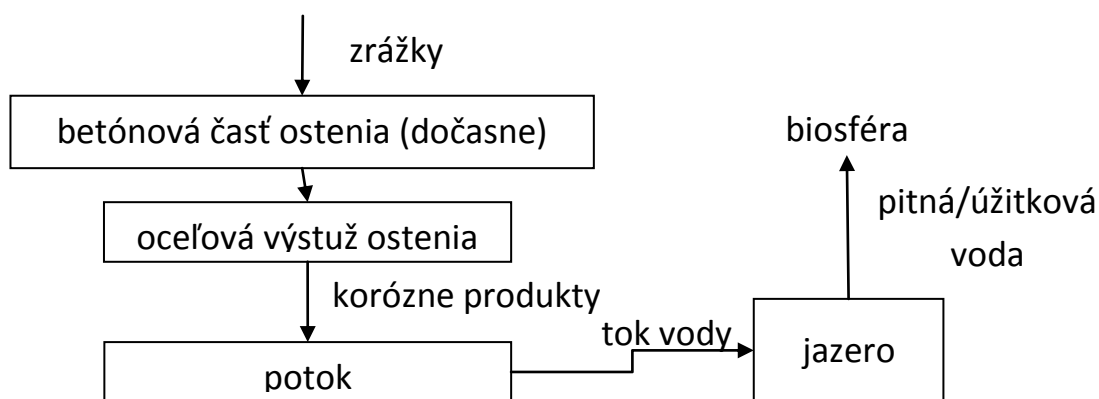
V scenári S5 – „Podzemná železná konštrukcia“ je využívaná podmienenene uvoľnená rádioaktívna uhlíková oceľ vo forme oceľových komponentov rozličných tvarov a rozmerov umiestnených pod úrovňou zeme. Príkladom z reálnej praxe sú tzv. „štetovnice“ - plechové lisované komponenty, ktoré sa využívajú napr. na spevňovanie svahov. Oceľový materiál štetovnic nemá žiadnu protikoróziu ochranu ani kryciu vrstvu, a teda začne podliehať korózii okamžite po vložení do zeme. Proces migrácie rádionuklidov je zhodný so scenárom S1. Konceptný model scenára S5 zobrazuje Obr. 6.



Obr. 6 Schéma koncepčného modelu scenára S5

Scenár S6 - Tunel

V scenári S6 – „Tunel“ je využívaná podmienenne uvoľnená rádioaktívna uhlíková oceľ ako oceľová výstuž primárneho ostenia tunela. Výstuž je realizovaná formou armovacích sietí tvorených prútmi. Tunel je umiestnený v horskom masíve, cez vrstvy ktorého preteká pôvodom zrážková voda. Táto voda preniká k osteniu tunela, ktorý vzhľadom k svojej vysokej hydraulickej vodivosti predstavuje prirodzenú bariéru pre prúdenie vody. Betónová krycia vrstva chrániaca oceľovú výstuž pred koróznym pôsobením vody postupne degraduje a prestáva plniť svoju funkciu. Produkty korózie sa dostávajú do prítomnej vody a sú odplavované. Voda obtekajúca ostenie tunela je sústreďovaná v odtokových potrubiach a odvádzaná do potoka v blízkosti stavby. Voda z potoka sa sústreďuje v jazere obsahujúcom sedimenty. Voda z tohto jazera je používaná ako pitná a úžitková analogicky s vodou zo studne v scenároch S1 až S3 a S5. Konceptný model scenára S6 zobrazuje Obr. 7.



Obr. 7 Schéma konceptného modelu scenára S6

3.1.5. Tvorba matematického modelu podmieneného uvoľňovania materiálov

Výpočtový model transportných mechanizmov

Základnými mechanizmami transportu rádionuklidov v inžinierskych systémoch jednotlivých scenárov sú prúdenie podzemnej vody - advekcia, ktorá je spôsobená tlakovým gradientom a difúzia inicializovaná koncentračným gradientom. Často sú relevantné obidva mechanizmy súčasne, pričom je potrebné zvažovať aj celý rad sprievodných dejov, ako sú disperzia a sorpcia [12]. V scenároch, v ktorých sa rádionuklidy dostávajú do rieky alebo potoka je týmto mechanizmom prúdenie povrchových vôd.

Advekcia

Advekcia je transport vo vode rozpustených kontaminantov prúdením v poréznom prostredí. V kontexte bezpečnostných analýz, pohyb vody v prostredí bude riadený výhradne rozdielom hydraulických gradientov. Pri posudzovaní advekčného transportu v nesaturovanej vrstve je potrebné brať do úvahy aj vlhkosť horninového prostredia.

Rýchlosť advekčného transportu je obvykle daná rýchlosťou pohybu vody v prostredí. Rýchlosť vody používaná v bezpečnostných analýzach však musí byť vzťahovaná na efektívnu porozitu prostredia, takúto rýchlosť nazývame Darcyho rýchlosť. Dôvodom je skutočnosť, že nie všetky póry v horninovom prostredí sú schopné umožniť prúdenie vody.

Prúdenie vody je popísané Darcyho zákonom (2), ktorý vzťahuje celkovú volumetrickú rýchlosť prúdenia vody „q“ jednotkovou plochou kolmou na smer prúdenia k hydraulickej vodivosti „k“ a tlakovému gradientu „J“:

$$q = k \cdot J, \quad (2)$$

kde: q - rýchlosť prúdenia vody [m/rok];

k - hydraulická vodivosť [m/rok];

J - tlakový gradient [-].

Lineárny Darcyho zákon platí v určitých medziach tlakového gradientu a jeho platnosť je tiež obmedzená na oblasť laminárneho prúdenia. Pre prúdenie vody veľmi jemnozrnným materiálom s nízkou vodopriepustnosťou existuje limitná hodnota tlakového gradientu, pri ktorej prúdenie vody ustáva. Vo väčšine prípadov prúdenie vody v úložnom systéme nepresahuje tieto medze, takže je možné Darcyho zákon úspešne aplikovať [12].

Sorpcia

Pod procesom sorpcia sa v riešenej problematike rozumejú všetky heterogénne reakcie medzi rozpustenými rádiokontaminantmi a pevnou matricou horninového prostredia, ako sú: chemisorpcia, fyzikálna sorpcia, precipitácia alebo iónová výmena. Tieto javy a procesy sú charakterizované lineárnym sorpčným parametrom (distribučný koeficient), ktorý sa označuje K_d a ktorý sa najčastejšie používa pri matematickom modelovaní s použitím softvérových prostriedkov. Koeficient K_d je definovaný ako miera koncentrácie kontaminantov nasorbovaných na pevnú fázu vo vzťahu k ich koncentrácii v kvapalnej fáze podľa vzťahu (3). Základným predpokladom pri týchto úvahách

je, že uvedený pomer koncentrácií zostáva stále konštantný. Mernou jednotkou koeficientu K_d môže byť $[m^3.kg^{-1}]$ alebo $[ml.g^{-1}]$ [12]:

$$K_d = q_i / c_i, \quad (3)$$

kde: q_i - miera koncentrácie rádionuklidu „i“ v kvapalnej fáze $[g/m^3]$;

c_i - miera koncentrácie rádionuklidu „i“ v pevnej fáze $[g/kg]$.

Disperzia

Disperzia je jav pozorovateľný pri advekčnom prenose kontaminantov. Tento jav sa vyskytuje v smere prúdenia vody (pozdĺžna disperzia), alebo kolmo na smer prúdenia (pričná disperzia). Disperzia má niekoľko vplyvov na prenos kontaminantov v prostredí:

- Ostré lokálne maximá v koncentrácii rádionuklidov sa stávajú vplyvom disperzivity viac plochými (dochádza k znižovaniu vysokých koncentrácií).
- Rádionuklid môže dosiahnuť určitý bod skôr než by vyplývalo z rýchlosti prúdenia, čo môže byť významné najmä pri sledovaní doby potrebnej pre prienik do biosféry.
- Rádionuklidy sa môžu rozšíriť na väčšej ploche [12].

Výpočtový model v prostredí GOLDSIM

Koncepčné modely tvoria základ pre počítačové modelovanie, ktorý je potrebné riešiť pomocou matematických vzťahov s počiatočnými a okrajovými podmienkami. Modelovanie bolo realizované vo výpočtovom prostriedku GOLDSIM. Transport kontaminantov – rádionuklidov z podmienene uvoľneného materiálu sa uskutočňuje v prostredí GOLDSIM medzi jednotlivými elementmi vytvorenej geometrie – bunkami (Cells). Rovnica (4) je základným vzťahom popisujúcim hmotnostný tok v bunke „i“:

$$m'_{is} = -m_{is}\lambda_s + \sum_{p=1}^{NP_s} m_{ip}\lambda_p f_{ps} R_{sp} \left(\frac{A_s}{A_p} \right) + \sum_{c=1}^{NF_i} f_{cs} + S_{is} \quad (4)$$

kde: m'_{is} – zmena hmotnosti kontaminantu „s“ v bunke „i“ $[M/T]$;

m_{is} – hmotnosť kontaminantu „s“ v bunke „i“ $[1/T]$;

λ_s – konštanta premeny kontaminantu „s“ $[-]$;

NP_s – počet priamych materských rádionuklidov kontaminantu „s“ $[-]$;

f_{ps} – podiel z materského rádionuklidu „p“, ktorý sa premieňa na kontaminant „s“ $[-]$;

R_{sp} – stochimetrický pomer medzi počtom molov vzniknutého kontaminantu „s“ a počtom molov premeneného materského rádionuklidu „p“ [-];

A_s – molekulová (atómová) hmotnosť kontaminantu „s“ [M/mol];

A_p – molekulová (atómová) hmotnosť rádionuklidu „p“ [M/mol];

NF_i – počet objemových tokov do/z bunky „i“;

f_{cs} – prísun hmoty kontaminantu „s“ (do bunky „i“) cez objemový tok „c“ [M/T];

S_{is} – priamy prísun hmoty kontaminantu „s“ do bunky „i“ z externých zdrojov [M/T].

Prvá časť rovnice (4) reprezentuje rádioaktívnu premenu sledovaného kontaminantu – rádionuklidu „s“, druhá časť rovnice ošetruje nárast hmoty rádionuklidu „s“, tretia časť reprezentuje presun hmoty do vnútra alebo von z bunky cez hmotnostné toky a posledná časť reprezentuje priamy prísun hmoty sledovaného rádionuklidu „s“ z iných zdrojov [13].

Advekčný hmotnostný tok „ f_s “ kontaminantu „s“ z bunky „i“ do bunky „j“ je v programe GOLDSIM počítaný podľa nasledovného vzorca (5):

$$f_{s,i \rightarrow j} = c_{ims} q + \sum_{t=1}^{NPT_{im}} PF_t \cdot c_{its} \cdot vm_t \cdot cp_{imt} q_c \quad (5)$$

kde: q – miera advekcie (prúdenia média) pre hmotnostný tok [L^3/T pre hmotnostné toky kvapalín a M/T pre hmotnostné toky pevných látok];

c_{ims} – celková koncentrácia rozpusteného, sorbovaného alebo precipitovaného kontaminantu „s“ v médiu „m“ v bunke „i“ [M/ L^3 ak „m“ je kvapalina a M/M ak „m“ je pevná látka];

NPT_{im} – počet druhov pevných látok rozpust. v médiu „m“ v bunke „i“ [-];

NPT_{jn} – počet druhov pevných látok rozpust. v médiu „n“ v bunke „j“ [-];

PF_t – „Boolovská značka“ (0 alebo 1), ktorá indikuje či advekcia pevnej látky „t“ rozpustenej v kvapalnom médiu (m alebo n) je povolená vo zvolenom hmotnostnom toku [-];

c_{its} – koncentrácia kontaminantu „s“ nasorbovaného na pevnej látke „t“ v bunke „i“ [M/M];

vm_t – číslo násobiace rýchlosť advekcie rozpustenej pevnej látky „t“ [-];

cp_{imt} – koncentrácia pevnej látky „t“ rozpustenej v kvapalnom médiu „m“ v bunke „i“ [M/ L^3].

V koncepčných modeloch je uvažované aj s priamym transportom sledovaného materiálu do kvapaliny (napr. opadávanie čiaščiek korodujúcej ocele do rieky). Priamy transport „f_s“ kontaminantu „s“ z bunky „i“ do bunky „j“ je v programe GOLDSIM počítaný podľa nasledovného vzorca (6):

$$f_{s,i \rightarrow j} = T_{ij,s} m_{is} \quad (6)$$

kde: $T_{ij,s}$ – podiel kontaminantu „s“ transportovaného z bunky „i“ do bunky „j“ za jednotku času [1/T];
 m_{is} – celková hmotnosť kontaminantu „s“ v bunke „i“ [M].

Výpočtový model biosféry

Na výpočet dávkového zaťaženia osôb z koncentrácie sledovaných rádionuklidov vo vode boli použité nasledovné prepočtové vzťahy [14].

Externé ožiarenie z pôdy E_{ExtSoil} spôsobené gama žiarením je počítané na základe vzťahu (7):

$$E_{\text{ExtSoil}} = C_{\text{soil}} O_{\text{out}} DC_{\text{exts}} \quad (7)$$

kde: C_{soil} – koncentrácia rádionuklidu v pôde [Bq/m³];
 O_{out} – doba pobytu osoby na kontaminovanej pôde [h/rok];
 DC_{exts} – dávkový konverzný faktor pre ext. ožiar. z pôdy [Sv.h⁻¹/Bq.m⁻³].

Externé ožiarenie kože E_{Skin} spôsobené beta a gama žiarením je počítané na základe vzťahu (8) [11]:

$$E_{\text{Skin}} = h_{\text{skin}} w_{\text{skin}} f_{\text{skin}} t_e L_{\text{dust}} f_d f_c \rho \cdot e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda \cdot t_2} \quad (8)$$

kde: E_{Skin} – individuálna efekt. dávka z kontaminácie kože [μSv.rok⁻¹/Bq.g⁻¹];
 h_{skin} – suma dávkových konverzných faktorov pre ožiarenie kože od beta a gama žiarenia [μSv.h⁻¹/Bq.cm²];
 w_{skin} – váhový faktor pre ožiarenie kože [-];
 f_{skin} – plocha kontaminovanej kože [-];
 t_e – doba, počas ktorej je koža vystavená ožarovaniu [h/rok];
 L_{dust} – hrúbka prachovej vrstvy na koži [cm];
 f_d – faktor riedenia [-];
 f_c – koncentračný faktor [-];
 ρ – hustota prachovej vrstvy [g/cm³];
 λ – konštanta premeny rádionuklidu [1/rok];

t_1 – doba, počas ktorej prebiehala rádioaktívna premena pred začatím scenára [rok];

t_2 – doba, počas ktorej prebiehala rádioaktívna premena v scenári [rok].

Dávka z ožiarenia E_{Dust} spôsobená inhaláciou kontaminovaného prachu je počítaná na základe vzťahu (9):

$$E_{Dust} = C_{air} O_{out} Inh_{sed} DC_{inh} \quad (9)$$

kde: C_{air} – koncentrácia rádionuklidu vo vzduchu [Bq/m^3];

O_{out} – doba pobytu osoby na kontaminovanom vzduchu [h/rok];

Inh_{sed} – objem vdychovaného vzduchu za jednotku času [m^3/h];

DC_{inh} – dávkový konverzný faktor pre inhaláciu [Sv/Bq].

Dávka z ožiarenia E_{Wat} spôsobená ingesciou kontaminovanej vody je počítaná na základe vzťahu (10):

$$E_{Wat} = C_w Ing_{wat} DC_{ing} \quad (10)$$

kde: C_w – koncentrácia rádionuklidu v pitnej vode [Bq/m^3];

Ing_{wat} – objem vypitej vody za jednotku času [m^3/rok];

DC_{ing} – dávkový konverzný faktor pre ingesciu [Sv/Bq].

Dávka z ožiarenia $E_{CowProd}$ spôsobená ingesciou živočíšnych produktov (mäsa a mlieka) je počítaná na základe vzťahu (11):

$$E_{CowProd} = \chi_{cowprod} Ing_{cowprod} DC_{ing} \quad (11)$$

kde: $\chi_{cowprod}$ – koncent. rádionuklidu v živočíšnych produktoch [Bq/kg ; Bq/l];

$Ing_{cowprod}$ – objem spotrebovaného živočíšneho produktu za jednotku času [kg/rok ; l/rok];

DC_{ing} – dávkový konverzný faktor pre ingesciu [Sv/Bq].

Dávka z ožiarenia E_{Fish} spôsobená ingesciou rýb je počítaná na základe vzťahu (12):

$$E_{Fish} = Ing_{fish} \cdot C_{water} \cdot TF_{fish} \cdot DC_{ing} \quad (12)$$

kde: Ing_{fish} – objem spotrebovaných rýb za jednotku času [kg/rok];

C_{water} – koncentrácia rádionuklidu vo vode [Bq/l];

TF_{fish} – koncentračný faktor pre ryby [m^3/kg];

DC_{ing} – dávkový konverzný faktor pre ingesciu [Sv/Bq].

Dávka z ožiarenia E_{Crop} spôsobená ingesciou rastlinných produktov (obilnín a zeleniny) je počítaná na základe vzťahu (13):

$$E_{Crop} = \chi_{crop} Ing_{crop} DC_{ing} \quad (13)$$

kde: χ_{crop} – koncentrácia rádionuklidu v rastlinných produktoch [Bq/kg; Bq/l];
 Ing_{crop} – objem spotrebovaného rastlinného produktu za jednotku času [kg/rok; l/rok];
 DC_{ing} – dávkový konverzný faktor pre ingesciu [Sv/Bq].

3.1.6. Realizácia výpočtov dlhodobého pôsobenia podmienene uvoľnených materiálov

Koncepčné modely jednotlivých scenárov boli implementované do prostredia výpočtového prostriedku GOLDSIM, ktorý sa ukázal ako vhodný pre realizáciu všetkých výpočtových súčastí analýzy. V prostredí bol vytvorený model, ktorý je v rámci svojej štruktúry delený na 6 vetiev, pričom každá z vetiev reprezentuje jeden scenár. Základná štruktúra výpočtového modelu pozostáva zo štyroch základných častí tzv. „kontajnerov“:

- Materiály
- Vstupné parametre
- Geometrie
- Výstupné parametre

4. VÝSLEDKY DIZERTAČNEJ PRÁCE S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKOV

4.1. Vypočítané uvoľňovacie úrovne a identifikácia kritickej expozičnej cesty

Výsledným parametrom výpočtov realizovaných v rámci dizertačnej práce je individuálna efektívna dávka z ožiarenia obdržaná jedincom z kritickej skupiny obyvateľstva. Táto dávka je limitovaná požiadavkami legislatívy na úroveň 10 $\mu\text{Sv/rok}$ prípadne 50 $\mu\text{Sv/rok}$ v prípade, že je dokázané, že spôsob a proces uvoľňovania je optimálny z hľadiska radiačnej ochrany. Legislatíva okrem limitov individuálnej efektívnej dávky uvádza aj tabuľku hodnôt hmotnostnej aktivity jednotlivých tried rádionuklidov. V prípade, že hodnoty hmotnostnej aktivity zo spomínanej tabuľky nie sú pri uvoľňovaní presiahnuté, automaticky sa predpokladá, že limit individuálnej efektívnej dávky nie je presiahnutý a netreba tento fakt iným spôsobom preukazovať.

Úrovně hmotnostnej aktivity – uvoľňovacie úrovně platné na základe legislatívy [1] pre nepodmienené uvoľňovanie boli zvolené ako vhodný parameter pre porovnanie s uvoľňovacími úrovnami pre podmienené uvoľňovanie získanými z výpočtu. Nariadenie vlády SR č. 345/2006 [1] vychádza zo Smernice Rady EÚ č. 96/29/EURATOM [4]. Samotné zaradenie jednotlivých rádionuklidov do skupín, inými slovami stanovenie uvoľňovacích úrovní pre nepodmienené uvoľňovanie vychádza z vypočítaných hodnôt niekoľkých samostatných štúdií zosumarizovaných v dokumente IAEA [15] a teda hodnoty vypočítané v rámci dizertačnej práce sú porovnávané s výsledkami podobných výpočtov realizovaných skupinami zahraničných expertov v iných výpočtových prostrediach.

Cieľom výpočtov je určiť maximálne hodnoty hmotnostnej aktivity uvoľňovaných materiálov (*uvoľňovacie úrovně*) aplikovateľné pri dodržaní limitov individuálnej efektívnej dávky.

Pre každý rádionuklid bola zároveň identifikovaná aj tzv. „kritická expozičná cesta“. Jedná sa o určenie cesty ožiarenia, z ktorej obdrží osoba najvyššiu efektívnu dávku od sledovaného rádionuklidu.

Štruktúra tabelárneho výstupu práce teda pozostáva z identifikácie kritickej expozičnej cesty pre každý zo sledovaných rádionuklidov, prepočítanej uvoľňovacej úrovně pre dávkové limity 10 $\mu\text{Sv/rok}$ a 50 $\mu\text{Sv/rok}$ spolu s uvedením uvoľňovacej úrovně pre nepodmienené uvoľňovanie podľa platnej slovenskej legislatívy pre porovnanie.

Vzhľadom na priestorovo obmedzené možnosti prezentácie výsledkov je ďalej v texte uvedená tabuľka výsledkov len pre scenár S5, ktorý bol zvolený ako vzorový. Výstupné tabuľky pre ostatné scenáre majú rovnakú formu a logiku.

Tab. 3 zobrazuje výsledky výpočtov pre scenár S5.

Tab. 3 Vypočítané uvoľňovacie úrovně a kritické expozičné cesty – scenár S5

Rádionuklid	Uvoľňovacia úroveň podľa 345/2006	Kritická cesta ožiarenia	Uvoľňovacia úroveň [Bq/kg]	
			10 μSv	50 μSv
H-3	3,00E+06	Ingescia	5,14E+08	2,57E+09
Be-10	3,00E+04	Ingescia	6,84E+07	3,42E+08
C-14	3,00E+05	Ingescia	8,60E+06	4,30E+07
K-40	3,00E+03	Ingescia	1,61E+06	8,05E+06
Ca-41	3,00E+05	Ingescia	1,66E+07	8,28E+07
Ni-59	3,00E+05	Ingescia	3,78E+08	1,89E+09
Ni-63	3,00E+06	Ingescia	9,74E+09	4,87E+10
Se-79	3,00E+04	Ingescia	5,69E+06	2,84E+07

Sr-90	3,00E+03	Ingescia	1,29E+06	6,44E+06
Mo-93	3,00E+04	Ingescia	5,10E+06	2,55E+07
Zr-93	3,00E+05	Inhalácia	7,01E+07	3,50E+08
Nb-93m	3,00E+04	Ingescia	1,01E+13	5,07E+13
Nb-94	3,00E+02	Externé ožiarenie	4,69E+05	2,35E+06
Tc-99	3,00E+05	Ingescia	9,68E+06	4,84E+07
Pd-107	3,00E+05	Ingescia	3,93E+08	1,97E+09
Sn-121m	3,00E+04	Ingescia	1,96E+10	9,81E+10
Sn-126	3,00E+03	Externé ožiarenie	4,03E+05	2,02E+06
I-129	3,00E+04	Ingescia	6,34E+04	3,17E+05
Cs-135	3,00E+04	Ingescia	8,59E+06	4,29E+07
Cs-137	3,00E+02	Ingescia	2,41E+11	1,20E+12
Sm-147	3,00E+02	Inhalácia	1,81E+05	9,05E+05
Sm-151	3,00E+05	Inhalácia	9,03E+10	4,52E+11
Pb-210	3,00E+02	Ingescia	7,01E+08	3,50E+09
Ra-226	3,00E+02	Ingescia	7,15E+05	3,57E+06
Ac-227	3,00E+02	Inhalácia	5,00E+10	2,50E+11
Th-229	3,00E+02	Inhalácia	3,87E+04	1,94E+05
Th-230	3,00E+02	Inhalácia	6,77E+04	3,39E+05
Pa-231	3,00E+02	Inhalácia	1,24E+04	6,22E+04
Th-232	3,00E+02	Inhalácia	6,18E+04	3,09E+05
U-233	3,00E+03	Ingescia	4,49E+05	2,25E+06
U-234	3,00E+02	Ingescia	4,58E+05	2,29E+06
U-235	3,00E+02	Ingescia	4,86E+05	2,43E+06
U-236	3,00E+03	Ingescia	4,57E+05	2,28E+06
Np-237	3,00E+02	Ingescia	1,02E+05	5,08E+05
Pu-238	3,00E+02	Inhalácia	1,41E+09	7,03E+09
U-238	3,00E+02	Ingescia	5,08E+05	2,54E+06
Pu-239	3,00E+02	Inhalácia	4,28E+04	2,14E+05
Pu-240	3,00E+02	Inhalácia	5,32E+04	2,66E+05
Am-241	3,00E+02	Inhalácia	8,26E+06	4,13E+07
Cm-244	3,00E+02	Ingescia	1,68E+21	8,38E+21

4.2. Zhodnotenie výsledkov

Z výsledkov výpočtov uvedených v Tab. 3 ako aj z výsledkov pre ostatné scenáre, uvedených v dizertačnej práci, je možné usúdiť, že v prípade prakticky všetkých sledovaných rádionuklidov je z dlhodobého hľadiska bezpečné navýšiť hodnotu uvoľňovacej úrovne voči hodnote uvedenej v legislatíve. V prípade hodnôt, ktoré prevyšujú hodnoty z legislatívy o niekoľko (typicky viac ako 5) rádov je namieste predpokladať, že tieto rádionuklidy budú pravdepodobne v procese podmieneného uvoľňovania limitované v krátkodobom horizonte a to v procese pretavby a výroby komponentov, prípadne pri výstavbe stavebného

celku. Presná charakterizácia a potrebné výpočty týchto expozičných ciest sú však mimo stanoveného rozsahu tejto analýzy. Pri tvorbe koncepcných modelov bol aplikovaný konzervatívny prístup, t.j. predpokladalo sa, že stavba bude umiestnená v prírodných podmienkach nepriaznivých z hľadiska rýchlosti a intenzity migrácie rádionuklidov ako aj z hľadiska vystavenia osôb kontaminovaným materiálom (vode, pôde a potravinám). Pri reálnej aplikácii PUM do konkrétnej stavebnej konštrukcie by bolo možné spresniť vstupné parametre výpočtov smerom k reálnej situácii a zároveň sa dá predpokladať, že výsledné dávky budú v dlhodobom horizonte nižšie ako vypočítané hodnoty v modelových scenároch.

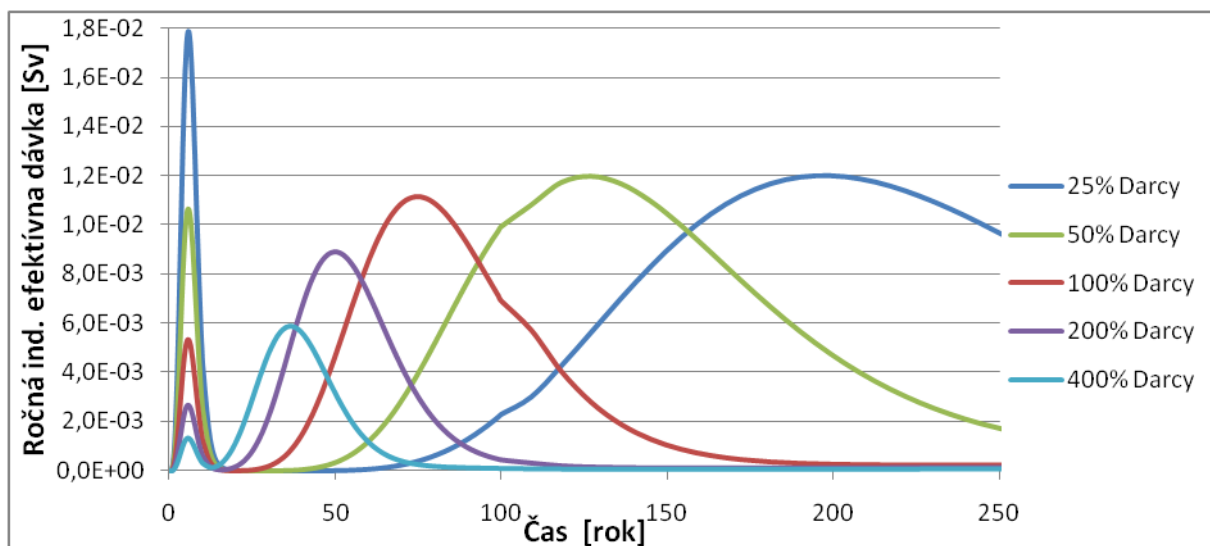
4.3. Citlivostná analýza

Cieľom citlivostnej analýzy realizovanej v rámci dizertačnej práce je zistiť vplyv vstupných veličín na hodnotu maxima individuálnej efektívnej dávky z ožiarenia jedinca z kritickej skupiny obyvateľstva, ako aj na hodnotu času, kedy bolo toto maximum dosiahnuté. Citlivostná analýza riešená v dizertačnej práci bola vypracovaná pre nasledovné vstupné parametre:

- Darcyho rýchlosť (rýchlosť prúdenia podzemnej vody);
- Prietok vody vo vodnom toku;
- Vzdialenosť studne od stavebnej konštrukcie.

Vo výpočte boli vstupné parametre menené v rozsahu 400%, 200%, 100%, 50% a 25% pôvodnej hodnoty parametra. Citlivostná analýza bola realizovaná s uvažovaním rádiologickej charakterizácie JE V1 v Jaslovských Bohuniciach [9], ktorá sa momentálne nachádza v procese vyradovania.

Vybraným výstupom riešenia je graf na Obr. 8, ktorý zobrazuje vplyv rôznych hodnôt Darcyho rýchlosti na priebeh maximálnej hodnoty celkovej dávky obdržanej členom kritickej skupiny obyvateľstva v scenári S1 – „Cestná komunikácia“. Lokálne maximum zaznamenané približne v čase 5 rokov je spôsobené rádionuklidom K-40, prirodzeným rádionuklidom nachádzajúcim sa vo väčšine betónových materiálov. Lokálne maximum v neskoršom období sú spôsobené z najväčšej časti rádionuklidom I-129 prijatým ingesciou. I-129 je dlhožijúci ($1,57 \times 10^7$ r) a pomerne vysoko mobilný rádionuklid. Maximum s rastúcou hodnotou Darcyho rýchlosti klesá, čo je spôsobené rýchlejším odplavovaním I-129. Čas dosiahnutia maxima sa s rastúcou hodnotou Darcyho rýchlosti posúva smerom doľava, t.j. pri nízkej Darcyho rýchlosti je dosiahnuté neskôr. Po uplynutí druhého lokálneho maxima už celková dávka len klesá.



Obr. 8 Vplyv Darcyho rýchlosti na celkovú dávku – S1 (Cestná komunikácia)

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

Predkladaná dizertačná práca sa zaoberá problematikou dlhodobého pôsobenia podmienene uvoľnených materiálov, opätovne použitých v rôznych stavebných konštrukciách na človeka a ŽP. Základným cieľom bolo vypracovanie metodiky hodnotenia bezpečnosti rozličných stavebných konštrukcií, ktorých súčasťou sú PUM z dlhodobého hľadiska. Táto metodika je aplikovateľná na široké spektrum využití PUM a poskytuje všeobecný pohľad na proces posudzovania vybraných veličín.

Kľúčové prínosy predkladanej dizertačnej práce pre prax a rozvoj vednej disciplíny a možnosti jej použitia je možné zhrnúť nasledovne:

- Navrhnutá metodika umožňuje zhodnotenie dlhodobej bezpečnosti podmieneného uvoľňovania materiálov z vyradovania jadrových zariadení a ich opätovného využitia v širokom spektre stavebných konštrukcií.
- Navrhnuté scenáre využitia podmienene uvoľnených materiálov, čo sa týka parametrov, vychádzali z reálnych stavebných konštrukcií. Výsledky výpočtov týchto scenárov teda umožňujú posúdenie dlhodobej radiačnej bezpečnosti v istom zmysle štandardných stavieb. Výsledky preto môžu byť priamo využité na rýchle porovnanie vhodnosti viacerých uvažovaných realizácií podobných konštrukcií v prvotnom procese rozhodovania.

- Pre potreby výpočtu sledovaných parametrov navrhovaných scenárov bol zvolený vhodný výpočtový prostriedok – GOLDSIM, ktorý spĺňa požiadavky hodnotenia dlhodobej bezpečnosti podmieneného uvoľňovania materiálov. Výpočtové modely scenárov implementované v prostredí GOLDSIM obsahujú sústavu výpočtových vzťahov a súbor vstupných parametrov potrebných pre simuláciu transportu rádionuklidov prírodným prostredím od umiestnenia stavebnej konštrukcie po biosféru.
- Ďalším prínosom je citlivosť analýza, ktorá popisuje vplyv vybraných vstupných parametrov simulácie na sledovaný výstupný parameter. Vplyv vybraných parametrov bol stanovený pre každý zo scenárov, v prípade že bol pre daný scenár relevantný. Stanovenie miery vplyvu určitého parametra na výstupné hodnoty je v procese opätovného využitia podmienene uvoľneného materiálu dôležité najmä v počiatočnej fáze rozhodovacieho procesu, kedy sa rozhoduje o type a umiestnení stavby.

Výsledky výpočtov navrhnutých scenárov ukázali, že koncept podmieneného uvoľňovania materiálov a ich opätovného využitia v rozličných stavebných konštrukciách nepredstavuje z dlhodobého hľadiska bezpečnostné riziko. Dávkové úrovne vyžadované slovenskou legislatívou ako aj medzinárodnými odporúčaniami sú za bežných okolností s veľkou rezervou dodržané. Presiahnutie dávkových limitov môže nastať za extrémnych podmienok, akými sú napr. umiestnenie stavebnej konštrukcie postavenej s využitím PUM na mieste veľmi vysokým úhrnom zrážok, nevyhovujúca kvalita a trvanlivosť materiálov využitých na výstavbu stavebnej konštrukcie, chybne alebo nedostatočne presne stanovená úroveň chemizmu podzemnej vody a iné. Práve možný výskyt extrémnych podmienok pri výstavbe a prevádzke stavebnej konštrukcie obmedzuje priame využitie výsledkov dizertačnej práce. Z hľadiska hodnotenia bezpečnosti akejkoľvek realizácie podmieneného uvoľňovania materiálov a ich opätovného využitia v stavebných konštrukciách je dôležité poznať vplyv parametrov realizácie na sledované výstupné parametre hodnotenia. V dizertačnej práci bol prostredníctvom citlivostnej analýzy sledovaný vplyv rôznych úrovní Darcyho rýchlosti toku podzemnej vody, vzdialenosti studne ako zdroja pitnej a úžitkovej vody od stavby a prietoku vody v povrchovom vodnom toku. Sledované veličiny majú nelineárny vplyv na

sledovaný výsledný parameter (obdržanú dávku), čo ich robí obzvlášť dôležitým z hľadiska hodnotenia dlhodobej bezpečnosti.

Hodnotenie dlhodobej rádiologickej bezpečnosti stavebnej konštrukcie využívajúcej podmienene uvoľnené materiály, praktická realizácia ktorej sa pripravuje, vyžaduje modifikáciu jedného alebo niekoľkých scenárov navrhovaných v dizertačnej práci z hľadiska vstupných parametrov. Tieto parametre musia byť zvolené na základe konkrétnych konštrukčných parametrov uvažovanej stavby. Zároveň je potrebné do hodnotenia bezpečnosti zahrnúť prírodné a geologické podmienky stanovené meraniami. Inými slovami, hodnotenie dlhodobej bezpečnosti každej reálnej aplikácie vyžaduje využitie konkrétnych parametrov stavby ako aj prírodných pomerov územia, na ktorom je stavba umiestnená. Tieto údaje je potrebné implementovať do modelu, ako jeden z bodov navrhutej metodiky. Hodnotenie dlhodobej bezpečnosti reálnej aplikácie konceptu podmieneného uvoľňovania materiálov v praxi tvorí nevyhnutnú súčasť komplexného hodnotenia bezpečnosti zahŕňajúceho aj krátkodobé vplyvy pri výstavbe konštrukcie, prípadne počas spracovania uvoľňovaných materiálov.

Pre účely hodnotenia dlhodobej bezpečnosti podmieneného uvoľňovania materiálov bol v dizertačnej práci vytvorený súbor scenárov poskytujúci komplexný pohľad na problematiku. Štúdie vypracované vo svete na tému opätovného využitia materiálov z vyradovania jadrových zariadení uvoľnených do ŽP využívali na hodnotenie bezpečnosti systém pozostávajúci z identifikácie najhoršieho možného scenára z hľadiska dávkového zaťaženia osôb a na základe tejto dávky následne stanovovali uvoľňovacie úrovne pre jednotlivé rádionuklidy. Takýto systém hodnotenia bezpečnosti sa v podstate dá stotožniť s konceptom nepodmieneného uvoľňovania. V rámci dizertačnej práce bol zvolený nový, odlišný postup, ktorý preberá údaje z reálnych stavieb a teda sa snaží čo najviac priblížiť k budúcim možným aplikáciám v praxi, a takto sa vyhnúť nadmernej miere konzervativizmu. Tento prístup poukazuje na možnosti zvýšenia podielu uvoľňovaných a recyklovaných materiálov v rámci materiálového toku z vyradovania JZ. Zvýšenie miery recyklácie materiálov z vyradovania v sebe spája mnoho pozitív, akými sú napríklad šetrenie finančných prostriedkov inak investovaných do spracovania, úpravy a ukladania materiálu ako RAO, šetrenie kapacity špecializovaných úložísk a v neposlednom rade aj ochrana ŽP šetrením cenných prírodných zdrojov.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] *Nariadenie vlády SR z 10. mája 2006 o základných bezpečnostných požiadavkách na ochranu zdravia pracovníkov a obyvateľov pred ionizujúcim žiarením.* Zbierka zákonov č. 345/2006. 2006.
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities (ISAM).* Vienna: IAEA, 2004.
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance.* IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.7. Vienna: IAEA, 2004.
- [4] Smernica Rady EÚ 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.
- [5] EUROPEAN COMMISSION. *Recommended radiological protection criteria for the clearance of buildings and building rubble from the dismantling of nuclear installations.* Radiation protection 113. Luxembourg: EC, 2000.
- [6] EUROPEAN COMMISSION. *Definition of Clearance Levels for the Release of Radioactively Contaminated Buildings and Building Rubble.* Radiation protection 114. Luxembourg: EC, 1999.
- [7] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Radiological Assessments for Clearance of Materials from Nuclear Facilities.* NUREG – 1640. 2003.
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Derivation of Activity Limits for the Disposal of Radioactive Waste in Near Surface Disposal Facilities.* IAEA-TECDOC-1380. Vienna: IAEA, 2001.
- [9] Správa z rádiologickej charakterizácie JE V-1, technická správa, 2010.
- [10] Správa z rádiologickej situácie JE A1.
- [11] EUROPEAN COMMISSION. *Practical Use of the Concepts of Clearance and Exemption.* Radiation protection 122. Luxembourg: EC, 2000.
- [12] PRÍTRSKÝ J. *Metodológia hodnotenia palivových cyklov z hľadiska dlhodobej bezpečnosti pri ukladaní VJP a VAO.* Dizertačná práca, Bratislava, 2008.
- [13] GOLDSIM Technology Group LLC. *GoldSim Contaminant Transport Module - User`s Guide.* Washington, USA, 2010.

- [14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Regional Training Course on Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities. Vienna: IAEA, 2001.
- [15] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Clearance Levels for Radionuclides in Solid Materials. IAEA-TECDOC-855. Vienna: IAEA, 1996.

PUBLIKOVANÉ PRÁCE

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

- [1] PÁNIK, M. - NEČAS, V.: GoldSim Models of Long-Term Radiation Impact of Conditionally Cleared Radioactive Material. Odoslaný článok do časopisu Progress in Nuclear Energy

ADE Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch

- [2] PÁNIK, M. - NEČAS, V.: Long-term Radiation Impact of Conditionally Cleared Radioactive Material from Decommissioning of Nuclear Power Plants Reused in Building Industry. Prijatý článok do časopisu Progress in Nuclear Science and Technology

ADF Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch

- [3] PÁNIK, M. - NEČAS, V.: Efektívne využitie veľmi nízkoaktívnej ocele z vyradovania jadrových elektrární pri výstavbe inžinierskych konštrukcií. In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. - ISSN 1335-2547. - Roč. 17, č. 4 (2011), s. 10-11
- [4] PÁNIK, M. - ZACHAR, M. - NEČAS, V.: Modelovanie dávkovej záťaže pracovníkov spôsobenej upravenými rádioaktívnymi odpadmi. In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. - ISSN 1335-2547. - Roč. 15, č. 6 (2009), s. 8-9

AFC Publikované příspěvky na zahraničních vědeckých konferencích

- [5] HRNČÍŘ, T. - PÁNIK, M. - NEČAS, V.: Modelling of Motorway Tunnels Scenario for Utilization of Conditionally Released Radioactive Materials. In: ASME 2010 : Proceedings of the ASME 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM 2010), October 3-7, 2010, Tsukuba, Japan. - New York : ASME, 2010. - ISBN 978-0-7918-3888-4. - S. 1-7
- [6] PÁNIK, M. - ZACHAR, M. - NEČAS, V.: Dose Assessment of Personal Handling Conditioned Radioactive Waste. In: ICEM'09/DECOM'09 : 12th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management. Liverpool, United Kingdom, 11.-15.10.2009. - New York : ASME, 2009. - ISBN 978-0-7918-3865-X. - CD-Rom
- [7] PÁNIK, M. - HRNČÍŘ, T. - NEČAS, V.: Reuse of Conditionally Released Radioactive Materials from NPP Decommissioning Applied in Motorway Bridges Construction. In: ASME 2010 : Proceedings of the ASME 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM 2010), October 3-7, 2010, Tsukuba, Japan. - New York : ASME, 2010. - ISBN 978-0-7918-3888-4. - S. 1-7
- [8] PÁNIK, M. - NEČAS, V.: Evaluation of External Exposure During Building and Operation of Concrete Bridges Constructions that Reuse the Conditionally Released Steels. In: ASME 2010 : Proceedings of the ASME 14th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM 2011). Reims, France, September 25 - 29, 2011. - New York : ASME, 2011. – Order No.: I882CD, CD-Rom
- [9] PÁNIK, M. - NEČAS, V.: Evaluation of Radiation Exposure during Construction and Operation of Concrete Bridge Reinforced with Very Low Level Radioactive Steel. In: 9th International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids. Zadar, Croatia, 3.-6.6.2012. - Zagreb : Croatian Nuclear Society, 2012. - ISBN 978-953-55224-4-7. - USB flash
- [10] PÁNIK, M. - HRNČÍŘ, T. - NEČAS, V.: Radiation Impact of Very Low Level Radioactive Steel Reused in Building Industry with Emphasis on External Exposure Pathway. In: Waste Management Symposia 2012. Phoenix, USA, 26.2.-1.3.2012. – ISBN 978-0-9836186-1-4. – CD-Rom

- [11] PÁNIK, M. - NEČAS, V.: Využitie veľmi nízkoaktívnej ocele ako súčasti výstuže betónových mostov. In: Jaderná energetika, transmutační a vodíkové technologie v pracích mladé generace - 2011. Brno, Česká republika, 7.-9.12.2011. - Brno : VUT Brno, 2011. - ISBN 978-80-02-02360-9. – S. 142-149

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- [12] HRNČÍŘ, T. - PÁNIK, M. - NEČAS, V.: Application Possibilities of Conditional Release of Materials Arising from Nuclear Installations Decommissioning in Slovak Republic. In: Power Engineering 2010. International Scientific Event. - Bratislava : STU v Bratislave. - 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, CD-Rom
- [13] HRNČÍŘ, T. - PÁNIK, M. - NEČAS, V.: Comparison of Two Selected Application Possibilities of Utilization of Conditionally Released Materials Arising from Nuclear Installations Decommissioning. In: ELITECH'10 : 12th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 26.5.2010. - Bratislava : STU v Bratislave, 2010. - ISBN 978-80-227-3303-8. - CD-Rom
- [14] HRNČÍŘ, T. - PÁNIK, M. - NEČAS, V.: Recycling and Reuse of Conditionally Released Metal Radioactive Waste in Tunnel Building Scenario. In: 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. - USB flash
- [15] HRNČÍŘ, T. - PÁNIK, M. - NEČAS, V.: The Utilization of Conditionally Released Radioactive Metal Waste in Motorway Tunnel Construction. In: 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
- [16] PÁNIK, M. - NEČAS, V.: Assessment of Exposure Pathways Connected with Construction and Operation of Concrete Bridge Reinforced with Very Low Level Radioactive Steel. In: 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. 63-64
- [17] PÁNIK, M. - ZACHAR, M. - NEČAS, V.: Dávková záťaž pracovníkov spôsobená upravenými rádioaktívnymi odpadmi modelovaná vo výpočtovom prostriedku VISIPLAN. In: XI. Banskoštiavnické dni. Mierové využívanie atómovej energie. Aplikácia nukleárnych technológií a stanovovanie rádionuklidov v životnom prostredí. Environmentálne záťaže a komunálne odpady. : Banská Štavnica, 7.-9.10.2009. - Bratislava : SNUS, 2009. - ISBN 978-80-88806-80-6. - S. 145-157
- [18] PÁNIK, M. - HRNČÍŘ, T. - NEČAS, V.: Evaluation of Personnel External Exposure during Construction of Concrete Bridge which Reuse Radioactive Steels. In: 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
- [19] PÁNIK, M. - HRNČÍŘ, T. - NEČAS, V.: Optimization of Conditioned Radioactive Waste Fulfillment of Fibre-Reinforced Concrete Container. In: Power Engineering 2010. International Scientific Event. - Bratislava : STU v Bratislave. - 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, CD-Rom
- [20] PÁNIK, M. - HRNČÍŘ, T. - NEČAS, V.: Optimization of Conditioned Radioactive Waste Fulfillment of Fibre-Reinforced Concrete Container Regarding Transport and Disposal Limits. In: ELITECH'10 : 12th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 26.5.2010. - Bratislava : STU v Bratislave, 2010. - ISBN 978-80-227-3303-8. - CD-Rom
- [21] PÁNIK, M. - HRNČÍŘ, T. - PAULÍK, P.: Perspektívne využitie rádioaktívnej ocele v inžinierskych stavbách. In: 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
- [22] PÁNIK, M. - HRNČÍŘ, T. - NEČAS, V.: Reuse of Radioactive Materials from NPP Decommissioning Applied in Concrete Bridges Construction. In: 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. - USB flash
- [23] PÁNIK, M. - NEČAS, V.: Využitie podmienenene uvoľnenej ocele pri zakladaní betónových mostov. In: Odborná konferencia Mladej generácie Slovenskej nukleárnej spoločnosti [elektronický zdroj] : Častá-Papiernička, 28.4.2011. - Bratislava : Slovenská nukleárna spoločnosť, 2011. - ISBN 978-80-969943-3-5. - S. 1-10
- [24] PÁNIK, M. - NEČAS, V.: Vývoj cien jadrového paliva a jeho dopad na rozvoj jadrovej energetiky budúcnosti: využitie výpočtového kódu DESAE. In: ŠVOČ 2007. Zborník víťazných prác : Bratislava, Slovak Republic, 25.4.2007. - Bratislava : STU v Bratislave, 2007. - ISBN 978-80-227-2650-4. - CD-Rom
- [25] PAULÍK, P. - PÁNIK, M.: Využitie rádioaktívnej ocele pri výstavbe mostov. In: Betonárske dni 2010 : Zborník prednášok, Bratislava, SR, 21.-22.10.2010. - Bratislava : STU v Bratislave, 2010. - ISBN 978-80-8076-089-2. - S. 241-246
- [26] PÁNIK, M. - NEČAS, V.: Safety Assessment of Construction and Operation of Concrete Bridge Reinforced with Very Low Level Radioactive Steel. In: ELITECH'12 : 14th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 22.5.2012. - Bratislava : STU v Bratislave, 2012. - ISBN 978-80-227-3705-0. - CD-Rom

SUMMARY

Methodology of Long-Term Environmental Impact Assessment of Materials Conditionally Released from Nuclear Installation

Nowadays and also in short future, many nuclear facilities in the world will enter the decommissioning stage. Decommissioning involves production of large amount of various materials with different content of radionuclides. Desirable alternative in the process of management of these materials is their release into the environment. Materials containing the amount of radionuclides that exceeds the limits for unconditional release could be released conditionally. Conditional release represents application of released material for previously defined purpose assuming that radiological impact on the persons will not exceed the dose limits valid for release into the environment. Impact of chosen application of released material on the persons and the environment in short and long term is inevitable to determine before the application using the appropriate method, e.g. computer simulation. Dissertation thesis is focused on impact of conditional release of materials in the long term.

Dissertation thesis deals with creation of methodology for determination of long-term impact of conditionally released materials, specifically carbon steel and concrete, reused in building constructions on the environment. Part of this process was the verification of created methodology using mathematical and conceptual models of applications of conditionally released materials - scenarios. Created set of scenarios covers most of the potential applications of conditionally released materials in building constructions. Important part of the evaluation of applicability of created computational models is also the determination of extent of influence of input values on the chosen output values. This fact led to the realization of sensitivity analysis as the part of dissertation thesis.