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

Mgr. Alojz Slaninka

Autoreferát dizertačnej práce

## VYUŽITIE INOVATÍVNYCH DETEKČNÝCH SYSTÉMOV PRI VYRAĎOVANÍ JADROVÝCH ZARIADENÍ

na získanie akademického titulu philosophiae doctor

v doktorandskom študijnom programe:

5. 2. 31 Jadrová energetika

Bratislava, máj 2014

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia na Ústave jadrového a fyzikálneho inžinierstva Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave a v spoločnosti VUJE, a.s. Trnava.

- **Predkladateľ:** Mgr. Alojz Slaninka 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:** doc. RNDr. Ivan Sýkora, PhD. Univerzita Komenského v Bratislave Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Katedra jadrovej fyziky a biofyziky Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

> RNDr. Peter Gerhart, PhD. Jadrová a vyraďovacia spoločnosť, a.s. Odbor 4210 Tomášikova 22, 821 02 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný: ...... Obhajoba dizertačnej práce sa koná ...... h

	,	-			
V			 	 	 

prof. RNDr. Gabriel Juhás, PhD. dekan FEI STU

#### OBSAH

U	VOD	. 4
1	SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	. 5
2	CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	. 8
3	ZVOLENÁ METÓDA SPRACOVANIA	. 9
	3.1 ZHODNOTENIE ZÁKLADNÝCH POŽIADAVIEK PRI NÁVRHU MONITOROVACÍCH SYSTÉMOV PRE TRIEDENIE A UVOĽŇOVANIE MATERIÁLOV DO ŽP	. 9
	3.2 Monitor 200 L SUDOV	11
	3.3 Monitor 600 L Kontajnerov	13
	3.4 NÁVRH METODIKY MONITOROVANIA CELKOVEJ PLOŠNEJ KONTAMINÁCIE PRI UVOĽŇOVANÍ STAVEBNÝCH ŠTRUKTÚR	16
	3.5 METÓDY TRIEDENIA KONTAMINOVANÝCH ZEMÍN	17
	3.6 METÓDY VYLEPŠENIA RÁDIOLOGICKEJ CHARAKTERIZÁCIE VYUŽITÍM CZT DETEKTOROV	v 20
4	VÝSLEDKY DIZERTAČNEJ PRÁCE S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKOV	24
4	VÝSLEDKY DIZERTAČNEJ PRÁCE S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKOV 2 4.1 Výsledky v oblasti zvýšenia kapacity uvoľňovacieho monitorovania	<b>24</b> 24
4	VÝSLEDKY DIZERTAČNEJ PRÁCE S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKOV 4.1 Výsledky v oblasti zvýšenia kapacity uvoľňovacieho monitorovania 4.2 Výsledky v oblasti zvýšenia kapacity triediaceho monitorovania	<b>24</b> 24 25
4	<ul> <li>VÝSLEDKY DIZERTAČNEJ PRÁCE S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKOV</li></ul>	<b>24</b> 25 26
4	<ul> <li>VÝSLEDKY DIZERTAČNEJ PRÁCE S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKOV</li></ul>	<b>24</b> 25 26 26
4 5 A	<ul> <li>VÝSLEDKY DIZERTAČNEJ PRÁCE S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKOV</li></ul>	<ul> <li>24</li> <li>25</li> <li>26</li> <li>32</li> </ul>
4 5 A Z	<ul> <li>VÝSLEDKY DIZERTAČNEJ PRÁCE S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKOV</li></ul>	<ol> <li>24</li> <li>25</li> <li>26</li> <li>32</li> <li>36</li> </ol>
4 5 A Z P D	<ul> <li>VÝSLEDKY DIZERTAČNEJ PRÁCE S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKOV</li></ul>	<ol> <li>24</li> <li>25</li> <li>26</li> <li>32</li> <li>36</li> <li>37</li> </ol>

## ÚVOD

Výroba elektrickej energie v jadrových elektrárňach (JE) predstavuje významný podiel výroby elektrickej energie a pri súčasnom trende energetických nárokov ťažko nahraditeľný zdroj v Slovenskej republike, ako aj v celosvetovom meradle. Nevyhnutnou podmienkou prevádzky jadrových zariadení (JZ) je zabezpečenie radiačnej ochrany (RO). Táto požiadavka musí byť splnená vo všetkých etapách životného cyklu JZ; v projekte, počas prevádzky, ako aj v priebehu vyraďovania. Základným prostriedkom pre zabezpečenie radiačnej ochrany v každom JZ je systém radiačnej kontroly (RK). Výsledky meraní RK sú základným nástrojom pre hodnotenie efektívnosti radiačnej ochrany, sledovanie správnej a bezpečnej prevádzky JZ ako aj prvotným podkladom pre hodnotenie vplyvu prevádzky, resp. vyraďovania JZ na pracovníkov, obyvateľstvo a životné prostredie (ŽP).

Od počiatku jadrovej energetiky uplynulo už viac ako päťdesiat rokov, čo znamená, že v súčasnom období narastá počet JE a iných JZ vstupujúcich do etapy vyraďovania, pričom tento trend možno očakávať aj budúcom období. Súčasťou vyraďovania JZ je produkcia odpadových tokov, vrátane rádioaktívnych odpadov (RAO). Ich množstvo, úroveň kontaminácie a rádionuklidové (RN) zloženie závisí od typu JZ a spôsobu ukončenia jeho prevádzky (štandardné odstavenie, havária). V etape vyraďovania to znamená zvýšené požiadavky na RK v oblasti rádiologickej charakterizácie pre stanovenie rozsahu dekontaminácie a deklarovanie RN inventáru pre dlhodobé ukladanie a pre povolenie na uvoľňovanie do ŽP alebo podmienené využitie.

Prístupy k nakladaniu s RAO sa v jednotlivých krajinách líšia v závislosti od legislatívneho pozadia i ekonomických a sociálnych podmienok v danej krajine. V krajinách s obmedzenou kapacitou pre ukladanie RAO, a tým vysokými nákladmi na uloženie jednotkového množstva RAO, medzi ktoré patrí aj SR, je dôležitým aspektom nakladania s RAO jeho minimalizácia triedením a uvoľňovaním do ŽP. Pri uvoľňovaní materiálov do ŽP je potrebné preukázať, že obsah RN v nich vyhovuje prísnym uvoľňovacím úrovniam. Požiadavka monitorovania veľkých objemov materiálov v krátkom čase kladie vysoké nároky na detekčné limity, kapacitu monitorovania a spoľahlivosť používaných monitorovacích systémov.

Z uvedeného vyplýva aktuálnosť potreby vývoja metodík a monitorovacích systémov pre triedenie a uvoľňovanie materiálov do ŽP a pre rádiologickú charakterizáciu v procese dekontaminácie, ktoré vedú k zvýšeniu kapacity monitorovania, redukcii RAO, skráteniu doby vyraďovania a v konečnom dôsledku k celkovému zefektívneniu procesu vyraďovania.

Predkladaná práca sa zaoberá návrhom monitorovacích systémov a metodík pre zvýšenie kapacity triedenia a uvoľňovania materiálov do ŽP s porovnaním metrologických charakteristík vybraných typov monitorovacích systémov. Sú posúdené a navrhnuté vylepšenia metód rádiologickej charakterizácie vo vybraných aplikáciách so zameraním na určovanie distribuovanej kontaminácie a obsahu ťažko detekovateľných RN na základe priamych fyzikálnych meraní a pri vysokom radiačnom pozadí.

## 1 SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Základné požiadavky na RO definujúce základné dozimetrické veličiny a základné princípy RO sú obsiahnuté v odporúčaniach Medzinárodnej komisie pre rádiologickú ochranu (ICRP) [1], [2] z roku 1991. Tieto odporúčania sa stali základmi pre národné legislatívy v oblasti RO vo väčšine krajín. Medzinárodná agentúra pre atómovú energiu (IAEA) v snahe o harmonizáciu prístupu k RO v roku 1996 vydala v spolupráci s organizáciou Spojených národov (OSN) a jej inštitúciami publikáciu [3] stanovujúcu základné zásady a ciele pre radiačnú ochranu, ako aj požiadavky na ich dosiahnutie. Základné požiadavky na RO vydala tiež Európska únia (EÚ) [4].

V podmienkach SR vyplýva požiadavka na zabezpečenie ochrany pred ionizujúcim žiarením (IŽ) pri využívaní jadrovej energie priamo z "atómového zákona" [5]. Základné bezpečnostné požiadavky na zabezpečenie RO vychádzajú z [1] a sú podrobnejšie obsiahnuté v [6], [7]. V roku 2007 bolo prijaté nové odporučenie ICRP 103 [8] nadväzujúce na [1], ktoré aplikuje a konsoliduje najnovšie poznatky v oblasti biologických účinkov IŽ. Tieto nové odporúčania boli zohľadnené aj v revízii dokumentu IAEA [3] a publikované ako [9]. Tieto nové odporúčania doposiaľ (2014) neboli do národnej legislatívy SR implementované.

Jedným zo základných nástrojov radiačnej ochrany JZ je systém radiačnej kontroly (RK), ktorý možno chápať ako súhrn technických prostriedkov zabezpečujúcich sledovanie vhodne zvolených fyzikálnych veličín dôležitých z hľadiska radiačnej ochrany. Ich porovnávanie s príslušnými referenčnými hodnotami je základným nástrojom pre hodnotenie úrovne RO. Súčasťou RO prevádzky JZ sú aj systémy RK nakladania s RAO. Ich význam a rozsah sa zväčšuje predovšetkým v etape vyraďovania JZ, kedy vzniká najväčšie množstvo RAO. Súčasťou procesu nakladania s RAO v rámci vyraďovania JZ v mnohých krajinách vrátane SR je uvoľňovanie materiálov do ŽP s cieľom minimalizácie tvorby RAO. Nutnosť bezpodmienečného uvoľňovania vyplýva aj z narastajúceho trendu počtu JZ vstupujúcich do etapy vyraďovania a očakávaného nárastu tvorby RAO [10].

Základnou požiadavkou bezpodmienečného uvoľňovania podľa odporúčaní ICRP [8], IAEA [9], [11], Európskej komisie (EK) [12], ako aj národných legislatív mnohých krajín [13], [14], [15], vrátane SR [7] je, že v dôsledku tohto uvoľnenia nesmie byť u kritického jedinca prekročená individuálne efektívna dávka (IED) 10 µSv/rok, berúc do úvahy všetky expozičné cesty. Vzhľadom na to, že splnenie tohto kritéria v praktických podmienkach nie je jednoduché, sú na základne primárneho kritéria pre IED a výpočtových modelov zohľadňujúcich mechanizmy šírenia a biologické účinky rádionuklidov (RN) odvodené uvoľňovacie úrovne (UU) vyjadrené v jednotkách špecifickej aktivity pre jednotlivé RN.

UU sú odvodené pre rôzne scenáre uvoľňovania a preto sa ich hodnoty pre jednotlivé RN podľa rôznych medzinárodných odporúčaní a národných legislatív líšia. Vo všeobecnosti ide o nízke hodnoty na úrovni aktivít prírodne vyskytujúcich sa RN. UU v podmienkach SR sú definované pre objemovo kontaminované materiály v jednotkách hmotnostnej aktivity a pre povrchovo kontaminované predmety v jednotkách plošnej kontaminácie [7]. Napr. pre <sup>137</sup>Cs je to 300 Bq/kg, resp. 0,3 Bq/cm<sup>2</sup>. Najnovšia smernica z roku 2013 [16] stanovuje pri uvoľňovaní veľkých objemov UU pre <sup>137</sup>Cs 100 Bq/kg.

Z uvedeného vyplývajú stále prísnejšie požiadavky na spoľahlivosť, selektívnosť a dostatočne nízke detekčné limity monitorovacích systémov a metód rádiologickej charakterizácie pre deklarovanie obsahu RN v rámci uvoľňovania do ŽP. Pre

preukázanie splnenia podmienok pre uvoľňovanie je preto potrebné vyvíjať nové systémy RK a metódy rádiologickej charakterizácie materiálov spĺňajúce prísne legislatívne a metrologické požiadavky [7], [17].

Monitorovacie systémy pre deklarovanie obsahu RN vo svete sú štandardne založené na meraní hmotnostnej aktivity RN emitujúcich žiarenie gama. Aktivita RN emitujúcich žiarenie alfa a beta sa stanovuje výpočtom na základe ich známych pomerov ku kľúčovému gama RN (RN vektor), ktoré sa pre daný materiálový tok určujú systematickým odberom vzoriek a ich laboratórnou analýzou.

Uvoľňovanie v podmienkach SR je zamerané hlavne na JE A1, ktorá bola neštandardne odstavená po porušení tesnosti paliva v roku 1977 a v súčasnosti je v II. etape procesu vyraďovania. Vzhľadom na to, že došlo k rozšíreniu kontaminácie, v rámci uvoľňovania je potrebné zmonitorovať tisíce m<sup>3</sup> materiálov. Z hľadiska objemu sú najkritickejšími potenciálne kontaminované zeminy (KZ), betónová drvina a kovové materiály.

Z legislatívy SR [7] vyplýva požiadavka na preukazovanie hmotnostnej aktivity v objeme, ktorého hmotnosť nepresahuje 300 kg v prípade nerovnomernej kontaminácie a 1000 kg v prípade rovnomernej. Z tohto dôvodu sa ako štandardný transportný obal RAO používajú 200 l sudy, ktorých hmotnosť je štandardne do 300 kg. Pre monitorovanie sudov bolo zriadené centrálne monitorovacie pracovisko (CMP), vybavené monitorom sudov s tromi HPGe detektormi, klasifikovanom ako určené meradlo. Vzhľadom na kapacitu monitorovania 10 sudov/zmenu, nutnosť ich transportu na/z monitorovacieho pracoviska a objem materiálov, ktoré majú byť monitorované, je celková efektivita toho systému pomerne nízka.

Pre zvýšenie kapacity uvoľňovacieho monitorovania KZ bol v roku 2008 dodaný pásový monitor vybavený dvojicou scintilačných LaBr detektorov, klasifikovaný ako určené meradlo. Triedenie prebieha po 30 kg čiastkach pri celkovej kapacite okolo 10 t/zmenu. Priepustnosť monitora je obmedzená aj nutnosťou úprav fyzikálnych parametrov kontrolovanej zeminy (sitovanie, sušenie).

Významným zdrojom potenciálnych RAO v rámci vyraďovania je aj likvidácia a demolácia stavebných objektov. UU úrovne pre objemovo kontaminované materiály v SR [7] sú stanovené pre hmotnostnú aktivitu, ktorú možno priamo preukázať monitorovaním stavebnej sutiny vzniknutej demoláciou. Nevýhodou tohto prístupu je nutnosť zmonitorovať veľký objem sutiny, pričom zároveň dochádza k premiešaniu kontaminovaných a nekontaminovaných častí, čo v konečnom dôsledku vedie k zvýšenej produkcii RAO. Výhodnejším prístupom je odstránenie kontaminovaných štruktúr s preukázaním splnenia príslušných referenčných úrovní a následná demolácia ako štandardnej nekontaminovanej budovy. Pre tjeto účely EK odporúča meranie celkovej plošnej kontaminácie (CPK), ktorá predstavuje celkovú aktivitu v betónovej štruktúre, prepočítanú na jednotku plochy povrchu [18]. Zároveň stanovuje aj UU pre rôzne scenáre následného využitia budov. Napr. v prípade následnej demolácie budovy je pre <sup>137</sup>Cs UU 10 Bq/cm<sup>2</sup>. Tento prístup doposiaľ do legislatívy SR implementovaný nebol, avšak jeho aplikácia vyhovuje aj požiadavkám RO v SR [7], ktoré vychádzajú z primárneho kritéria pre IED 10 µSv/rok, čo je aj referenčná hodnota, od ktorej boli odvodené UU pre CPK podľa odporúčania EK [18]. Súčasťou rádiologickej charakterizácie v procese vyraďovania je aj určovanie obsahu a distribúcie ťažko detekovateľných RN (TDRN). V prípade JE A1 sú rádiologicky najvýznamnejšími <sup>241</sup>Am, <sup>238</sup>Pu, <sup>239, 240</sup>Pu, emitujúce žiarenie alfa a <sup>90</sup>Sr emitujúci žiarenie beta. Znalosť ich relatívneho zastúpenia vzhľadom na <sup>137</sup>Cs je dôležitá pre deklarovanie ich obsahu pri uvoľňovaní, ako aj pri preukazovaní plnenia limitov pre spracovanie a uloženie RAO. Zastúpenie TDRN sa štandardne určuje na základe

pomerne nákladných a zdĺhavých rádiochemických analýz odobraných vzoriek. Doterajšie skúseností z vyraďovania poukazujú na relatívne konštantný pomer zastúpenia <sup>241</sup>Am a izotopov Pu v rámci daných odpadových tokov, čo vytvára priestor pre ocenenie celkovej alfa aktivity pomocou gamaspektrometrickej metódy na základe merania aktivity <sup>241</sup>Am, ktorý emituje aj gama žiarenie 59,6 keV. Významným tokom RAO sú kalové suspenzie z podzemných nádrží, fixované cementovaním a ďalej odovzdávané na spracovanie a uloženie. Vzhľadom na typické relatívne vysoké aktivity (typická aktvita <sup>137</sup>Cs na úrovni 1E+08 Bq/kg, <sup>241</sup>Am na úrovni 1E+05 Bq/kg), nebolo priame meranie doteraz realizované a obsah RN sa určuje odberom vzoriek a následnými laboratórnymi analýzami. Ďalším významným tokom RAO sú puzdrá dlhodobého skladovania (PDS) vyhoretého jadrového paliva, predstavujúce povrchovo kontaminované kovové rúry s príkonom dávky kontaktne až na úrovni mSv/h. Obsah TDRN sa určuje na základe laboratórnych analýz vzoriek, odobraných elektrochemickou metódou.

Jedným z alternatívnych prístupov pri stanovení obsahu <sup>90</sup>Sr v materiáloch z vyraďovania je použitie nedeštruktívnej fyzikálnej metódy, založenej na beta spektrometri s plastickým scintilačným detektorom, ktorý bol vyvinutý a vyrobený v Kurchatovom inštitúte v Rusku, kde sa používa predovšetkým na operatívne "in situ" meranie povrchovej kontaminácie <sup>90</sup>Sr [19].

## 2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Cieľom práce je navrhnúť, odskúšať a posúdiť metodiky a vhodné spôsoby využitia detektorov pre zefektívnenie procesu triedenia a uvoľňovania materiálov do ŽP a pre vylepšenie metód rádiologickej charakterizácie s ohľadom na požiadavky v oblasti radiačnej ochrany pri vyraďovaní neštandardne odstavenej JE A1. Splnenie tohto cieľa predpokladá nasledovné jednotlivé úlohy a podúlohy.

V oblasti zvýšenia efektívnosti pri triedení a uvoľňovaní materiálov do ŽP:

- Na základe rozboru neistoty merania jedno-detektorového monitora 200 l sudov a porovnania s inými typmi monitorov (pásový monitor, troj-detektorový monitor sudov) posúdiť jeho vhodnosť ako určeného meradla pre uvoľňovanie materiálov do ŽP ako lacnejšiu alternatívu oproti troj-detektorovým monitorom.
- Posúdiť možnosti zvýšenia kapacity uvoľňovacieho monitorovania zavedením monitora, využívajúceho ako geometriu merania hranatý 600 l kontajner, vrátane návrhu metodiky metrologického overenia.
- Navrhnúť a odskúšať metódu monitorovania celkovej plošnej kontaminácie ako významný článok procesu uvoľňovania stavebných štruktúr stojacich budov podľa odporúčaní EK.
- Navrhnúť a odskúšať metódy pre zvýšenie kapacity operatívneho triedenia kontaminovaných zemín pre účely ich uvoľňovania a triedenia do príslušných kategórií RAO.

V oblasti vylepšenia metód rádiologickej charakterizácie v procese vyraďovania:

- Navrhnúť, odskúšať a posúdiť možnosti využitia vybraných typov CZT detektorov
  - a) pri ocenení obsahu <sup>241</sup>Am pri vysokej aktivite <sup>137</sup>Cs v kaloch z podzemných nádrží a na povrchoch kovových puzdier dlhodobého skladovania paliva,
  - b) pri charakterizácii "horúcich škvŕn" kontaminácie na betónových povrchoch vrátane nedeštruktívneho odhadu hĺbky kontaminácie.
- 2) Odskúšať a posúdiť možnosti detektora s plastickým scintilátorom pre operatívne merania aktivity <sup>90</sup>Sr ako lacnejšiu a rýchlejšiu alternatívu k štandardným rádiochemickým separačným metódam.

## 3 ZVOLENÁ METÓDA SPRACOVANIA

# 3.1 Zhodnotenie základných požiadaviek pri návrhu monitorovacích systémov pre triedenie a uvoľňovanie materiálov do ŽP

Monitorovacie systémy pre stanovenie obsahu RN pre účely uvoľňovania do ŽP sú z pohľadu legislatívy určenými meradlami s úradne overenou kalibráciou [17], čím sa preukazuje splnenie deklarovaných metrologických parametrov.

Účelom monitorovacích systémov, určených pre triedenie kontaminovaných materiálov, je rýchle vytriedenie tých materiálov, ktoré nie je možné uvoľniť do ŽP. Potenciálne uvoľniteľné materiály sú následne monitorované na monitorovacích pracoviskách pre uvoľňovanie materiálov do ŽP. Okrem zvýšenia celkovej kapacity monitorovania je ďalším prínosom aj redukcia nehomogenity kontaminácie materiálov, monitorovaných na pracoviskách pre uvoľňovanie, ako aj redukcia celkového objemu materiálov, ktoré majú byť monitorované na uvoľňovacích pracoviskách. Redukcia nehomogenity kontaminácie materiálov triediacim meraním je dôležitá hlavne pri nakladaní s KZ, kde vzhľadom na sypkú povahu materiálu a veľké objemy chýba dostatočný systém predbežného triediaceho monitorovania.

Na triediace monitory nie sú kladené také prísne metrologické požiadavky ako na uvoľňovacie monitory. Na základe ich merania nie je možné uvoľňovať materiály do ŽP, preto nepodliehajú metrologickému overeniu a vysoká kapacita monitorovania je dosiahnutá aj za cenu relatívne vysokej neistoty merania.

#### Voľba typu detektora

Typ a parametre detekčnej jednotky sú dané predovšetkým aplikáciou, pre ktorú je detektor určený a druhom ionizujúceho žiarenia, ktoré má byť detegované. Pri objemných vzorkách s vysokou hustotou (akými sú napr. zeminy, betón alebo kovové materiály v 200 l sudoch) sú výhodné merania založené na detekcii žiarenia gama, ktoré má v porovnaní s alfa alebo beta žiarením podstatne vyššiu prenikavosť. To umožňuje meranie vzoriek väčších objemov, na rozdiel od monitorov založených na detekcii napr. beta žiarenia, ktoré sú štandardne využívané pre meranie plošnej aktivity povrchovej kontaminácie.

Okrem toho, obzvlášť pri uvoľňovaní je potrebné stanoviť obsah jednotlivých RN. Z toho vyplýva nutnosť selektívneho merania s použitím meradiel so spektrometrickými vlastnosťami, ktoré sú schopné rozlíšiť energiu detegovaného gama žiarenia.

#### Geometria merania

Geometria merania zahŕňa vzájomné usporiadanie detektora, tienenia a meranej vzorky, vrátane ich rozmerov, vzájomných vzdialeností, materiálového zloženia, hustoty a ďalších parametrov, určujúcich účinnosť detekcie pri známom rozdelení aktivity v objeme vzorky. Pri laboratórnych meraniach sú obyčajne detektor i meraná vzorka umiestnené v uzatvorenom tienení, čo maximálne eliminuje príspevok od pozadia. Rozmery vzorky sú porovnateľné s rozmermi detektora a v laboratórnych podmienkach je možné ich dostatočne správne určiť. Tiež je jednoduchšie dodržať predpísanú vzájomnú polohu vzorky a detektora pri meraní, pre ktorú je stanovená účinnostná kalibrácia.

Pri potrebe merania vzoriek veľkých objemov, rádovo väčších v porovnaní

s objemom detektora, zohráva geometrické usporiadanie významnú úlohu. Prípadná objemovo nehomogénna kontaminácia monitorovaného materiálu môže mať významnejší vplyv na výsledky merania, nakoľko použitá kalibrácia štandardne počíta s účinnosťou detekcie, vzťahujúcou sa na homogénnu objemovú kontamináciu. Vplyv nerovnomerného rozdelenia aktivity v objeme vzorky narastá s jej rozmermi, pretože samoabsorpcia sa stáva významnejšou. Okrem toho pri meraní vzoriek veľkých objemov zvyčajne nemožno absolútnu homogenitu zaručiť, na rozdiel od laboratórnych meraní, kde je možné vzorky v závislosti od materiálu pred meraním homogenizovať.

Jedným zo spôsobov eliminácie vplyvu nehomogénneho rozdelenia aktivity v objeme vzorky na výsledky merania je zabezpečenie rovnomernej účinnosti detekcie v celom objeme vzorky. To je možné realizovať jednak použitím dostatočného počtu detektorov, ako aj ich umiestnením. Vo všeobecnosti platí, že čím väčší objem vzorka má, tým je potrebný väčší počet detektorov.

#### Citlivosť merania

Citlivosť merania vyjadrená ako registrovaná početnosť impulzov od žiarenia danej energie pripadajúca na jednotkovú aktivitu [s<sup>-1</sup>/Bq], prípadne hmotnostnú aktivitu [s<sup>-1</sup>/(Bq/kg)] je jedným zo základných parametrov meradla. Citlivosť merania musí byť dostatočná v porovnaní s príspevkom od pozadia, aby bolo možné dosiahnuť požadované detekčné limity za dostatočne krátku dobu merania.

Vysokú citlivosť merania možno dosiahnuť voľbou detektora s vysokou relatívnou účinnosťou, vhodnou voľbou geometrie merania, prípadne použitím viacerých detektorov.

#### Detekčný limit

Detekčný limit je základnou charakteristikou príslušnej metódy merania [20]. Zvlášť pri uvoľňovacích meraniach je dôležité, aby minimálna detekovateľná hmotnostná aktivita (MDA) príslušných RN bola dostatočne nízko pod stanovenými uvoľňovacími úrovňami. MDA je ekvivalentná detekčnému limitu metódy merania, L<sub>D</sub>, ktorý je obvykle vyjadrený počtom detegovaných impulzov čistého signálu za danú dobu merania:

$$MDA = \frac{L_D}{t.S} \tag{1}$$

kde:

MDA – minimálna detekovateľná hmotnostná aktivita [Bq/kg],

L<sub>D</sub> – detekčný limit,

t – doba merania [s],

S – citlivosť merania  $[(s^{-1})/(Bq/kg)]$ .

MDA, resp. L<sub>D</sub> vyjadruje najmenšiu hodnotu meranej veličiny, ktorú je možné detegovať pri daných podmienkach merania a pri danej úrovne spoľahlivosti (obvykle 95%). V gamaspektrometrickej praxi sa často využíva prístup, podľa ktorého je detekčný limit vyjadrený [21]:

$$L_{D} = k^{2} + L_{C} = k^{2} + 2k\sigma_{0} = 2,71 + 3,29\sigma_{0}$$
<sup>(2)</sup>

kde:

L<sub>D</sub> – detekčný limit,

- k kvantil normálneho rozdelenia zodpovedajúci jednostrannému 95% intervalu (k=1,645),
- L<sub>C</sub> kritická hodnota, pod ktorou nemožno spoľahlivo odlíšiť nameranú hodnotu od pozadia,
- $\sigma_0$  štandardná odchýlka pozadia.

#### Neistota merania

Neistota merania je parameter priradený k výsledku merania, ktorý charakterizuje rozptyl hodnôt, ktoré sa môžu priraďovať k meranej veličine [22]. V prípade, že ide o veličinu, ktorá nie je meraná priamo, akou je aj napr. aktivita a možno ju vyjadriť ako funkciu vstupných veličín, ktoré ju určujú,  $y = f(x_1, x_2, ..., x_n)$ , potom jej neistotu možno vyjadriť pomocou štandardnej kombinovanej neistoty  $u_c(y)$ . Ak sú jednotlivé vstupné veličiny navzájom nezávislé, potom možno štandardnú kombinovanú neistotu  $u_c(y)$  vyjadriť pomocou Gaussovho zákona šírenia neistôt [23]:

$$u_C^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)$$
(3)

Neistota merania v prípade merania aktivity je ovplyvnená rôznymi faktormi ako typ detektora, metóda kalibrácie, geometria merania, úroveň pozadia, doba merania, odchýlka reálnych parametrov vzorky od parametrov použitých pri kalibrácii a pod.

#### Faktor maximálnej neistoty merania

Jedným z parametrov pre posúdenie kvality geometrie merania je **faktor maximálnej neistoty merania – f**, ktorý vyjadruje maximálne teoretické podhodnotenie v prípade extrémneho hoci v praxi neočakávaného scenára, ktorý predpokladá výskyt BZ v neaktívnej vzorke, v polohe s minimálnou účinnosťou detekcie. Vzhľadom na to, že takýto scenár sa v reálnej praxi neočakáva, hodnota tohto faktora je udávaná nezávisle na štandardnej neistote merania.

Faktor maximálnej neistoty, f, možno vyjadriť nasledovným vzťahom [24]:

$$f = \frac{A_0}{A} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \tag{4}$$

kde

A<sub>0</sub> – skutočná hodnota aktivity BZ (celková aktivita vzorky),

A – nameraná hodnota celkovej aktivity,

 $\epsilon$  – účinnosť detekcie predpokladajúca homogénne rozdelenie aktivity v celom objeme vzorky,

 $\epsilon_0$  – účinnosť detekcie zohľadňujúca prítomnosť BZ v objeme vzorky.

#### 3.2 Monitor 200 I sudov

Pre posúdenie spôsobilosti monitorovacieho systému 200 l sudov s jedným stabilným HPGe detektorom pre uvoľňovacie monitorovanie v procese vyraďovania JZ bolo vykonané ocenenie neistoty merania a jeho citlivosti na BZ ako jedného z podkladov pre porovnanie s inými typmi monitorovacích systémov. Pritom sa predpokladalo meranie KBD uloženej v 200 l sudoch, čo predstavuje typický odpadový tok pri

vyraďovaní JZ. Pre porovnanie s referenčnou geometriou suda bola paralelne ocenená aj neistota merania monitora s jedným HPGe detektorom pri monitorovaní vzduchotechnických (VZT) filtrov.

#### Popis spôsobu monitorovania 200 l sudov a filtračných vložiek VZT filtrov

Pri meraní bol uvažovaný polovodičový HPGe detektor s relatívnou účinnosťou detekcie 30% a oloveným tienením hrúbky 5 cm a kolimačným uhlom 90°. Vzdialenosť detektora bola zvolená tak, že v jeho zornom uhle sa nachádza celý objem suda. Sud je umiestnený na rotačnom stole s rýchlosťou rotácie 0,8 min<sup>-1</sup>, čo prispieva k redukcii neistoty merania vyplývajúcej z nerovnomerného rozdelenia aktivity v radiálnom smere. Príslušná kalibračná účinnostná krivka  $\epsilon(E_i)$  definujúca závislosť účinnosti detekcie od energie gama žiarenia je volená automaticky na základe hmotnosti a hustoty materiálu uloženého v sude, ktoré sú určené elektronickou váhou, na ktorej je sud počas merania umiestnený.

Účinnostná kalibrácia bola vykonaná matematicky na základe kalibračného nástroja ISOCS (In Situ Object Counting System) [25], ktorý umožňuje pre konkrétny detektor stanoviť účinnosť detekcie v píku úplnej absorpcie na základe definovaného modelu geometrie merania a charakterizácie daného detektora.

Jednotlivé typy VZT filtrov sa síce líšia svojimi rozmermi, ale konštrukčný princíp je väčšinou zachovaný. Ďalej boli uvažované rozmery filtračnej vložky 60 x 60 x 60 cm a hustota 0.1 g/cm<sup>3</sup>. MDA pri dobe merania 15 min. a štandardnom pozadí 100 nSv/h je na úrovni 10 Bq/kg pri sudoch a 50 Bq/kg pri VZT filtroch.

#### Ocenenie neistoty merania monitora sudov s jedným HPGe detektorom

Hodnotenie neistoty merania sa vzťahuje k referenčnému RN <sup>137</sup>Cs, ktorý emituje žiarenie gama (661,7 keV) a je dominantným RN vo väčšine odpadových tokoch pri vyraďovaní JE A1. Pri ocenení štandardnej kombinovanej neistoty merania hmotnostnej aktivity sa vychádzalo zo vzťahu pre určenie hmotnostnej aktivity A<sub>m</sub>:

$$A_m = \frac{A}{m} = \frac{N}{my\varepsilon t}$$
(5)

kde

A<sub>m</sub> – hmotnostná aktivita [Bq/kg],

A – celková aktivita [Bq],

m – hmotnosť monitorovaného materiálu [kg],

N – počet zaznamenaných impulzov v píku úplnej absorpcie,

- y výťažnosť príslušnej energetickej čiary (pravdepodobnosť emisie fotónu pri premene),
- ε účinnosť detekcie pre dané geometrické usporiadanie (početnosť zaznamenaných impulzov na jeden emitovaný fotón),
- t doba merania [s].

Relatívnu štandardnú kombinovanú neistotu merania hmotnostnej aktivity,  $u(A_m)$  možno po aplikovaní vzťahu (3) na vzťah podľa rovnice (5) vyjadriť nasledovne:

$$u(A_{m})^{2} = u(N)^{2} + u(y)^{2} + u(t)^{2} + u(m)^{2} + u(\varepsilon)^{2}$$
(6)

Členy na pravej strane rovnice (6) sú relatívne štandardné neistoty veličín

vystupujúcich na pravej strane rovnice (5) a ich hodnoty sú uvedené v Tab. 1.

Tab.	1	Hlavné	zdroje	neistoty	pri	urč	ení	šta	ndardne	j kombinova	nej	neisto	ty m	erania
		hmotno	stnej al	ctivity <sup>137</sup>	Cs I	KBD	v 2	00	sudoch	a filtračných	vlo	žkách	VZT	filtrov
		stabilný	m HPGe	detektor	om,	pre d	obu	me	erania 15	min. [24]				

		Relatívna	štandardná
Veličina	Popis	neistota (%)	
		200 L sud	VZT filter
u(N) – neistota početnosti	Určuje sa automaticky spektrometrickým	5.0	5.0
impulzov	SW na základe analýzy energetického		
	spektra.		
u(y) – neistota	Prebrané z Nuclear Data Center – BNL.	0.3	0.3
pravdepodobnosti emisie			
fotónu			
u(m) – neistota stanovenia	Určená rozlišovacou schopnosťou váhy	0.2	6.7
hmotnosti	použitej váhy (0.2 kg).		
u(ε) – neistota účinnostnej	Diskutovaná v texte ďalej.	9.4	6.7
kalibrácie (účinnosti v píku			
úplnej absorpcie)			
u(A <sub>m</sub> ) – relatívna	štandardná kombinovaná neistota	10.7	10.7
hmotnostnej aktivity, A <sub>m</sub>			

Relatívna štandardná neistota účinnostnej kalibrácie,  $u(\varepsilon)$ , bola ocenená ako relatívna štandardná kombinovaná neistota použitej kalibračnej metódy,  $u_{ISOCS}(\varepsilon)$ , a štandardných neistôt jednotlivých vstupných parametrov, vstupujúcich do výpočtu účinnosti.

#### 3.3 Monitor 600 I kontajnerov

Ďalším krokom pre zvýšenie kapacity monitorovania a uvoľňovania do ŽP objemovo kontaminovaných sypkých materiálov bol návrh a vývoj boxového monitora. Nevyhnutnou súčasťou uvedenia do prevádzky tohto monitora bolo posúdenie neistoty merania a návrh spôsobu metrologického overenia.

#### Popis zostavy boxového monitora a spôsob monitorovania

Jadrom monitora sú dve gamaspektormetrické trasy obsahujúce dvojicu tienených polovodičových HPGe detektorov typu GC3020. Základné technické údaje zvolenej geometrie sú pre kontajner a sud v Tab. 2.

Monitor je určený pre meranie hmotnostnej aktivity RN emitujúcich žiarenie gama v energetickom rozsahu 200 keV – 2 MeV v homogénne kontaminovaných materiáloch uložených v 600 l hranatých kontajneroch a 200 l sudoch. Geometrické usporiadanie detektorov bolo zvolené na základe požiadavky maximalizácie účinnosti detekcie a požiadavky dosiahnutia rovnomernej odozvy po výške 200 l suda a dĺžke 600 l kontajnera. Kolimátor z prednej strany tienenia a vzdialenosť detektorov od kontajnera, resp. suda boli navrhnuté tak, aby sa v zornom poli kolimovaných detektorov nachádzal iba práve monitorovaný objekt, čo čiastočne zabezpečuje odtienenie pozadia vlastnou absorpciou monitorovaného materiálu. Energetický

rozsah bol zvolený s ohľadom na rozmery monitorovaných objektov a ich samoabsorpčné vlastnosti. Monitor je určený pre meranie hmotnostnej aktivity najvýznamnejších očakávaných RN, hlavne <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co, <sup>134</sup>Cs, <sup>110m</sup>Ag, <sup>54</sup>Mn, <sup>124</sup>Sb, <sup>152</sup>Eu. Riadiaci SW obsahuje nadstavbovú časť pre dopočet ťažko detekovateľných RN (TDRN). Protokol merania obsahuje tiež záverečné zhodnotenie, či monitorovaný materiál spĺňa podmienky pre uvoľnenie do ŽP. Materiál vyhovuje uvoľneniu do ŽP iba v prípade, že sú splnené kritériá súčtového pravidla a homogenity určenej porovnaním odozvy z jednotlivých detektorov.

Účinnosť v píku úplnej absorpcie bola stanovená výpočtom pomocou kalibračného SW ISOCS/LabSOCS [25] na základe charakterizácie použitých detektorov. Kalibračné krivky boli počítané v rozsahu hustôt 0,5 – 2,0 g/cm<sup>3</sup>, s krokom 0,025 g/cm<sup>3</sup>.

Tab. 2 Základné parametre merania monitora 600 l kontajnerov a 200 l sudov

PARAMETER	SUD	KONTAJNER
kolimátor	53°	53°
vzdialenosť detektor - plášť suda, kontajnera	25 cm	30 cm
doba merania	10 min	2 x 10 min
hmotnosť sudov	100 - 400 kg	300 - 1000 kg
materiál vzorky	Hlavne sypké m	ateriály, KZ a KBD

#### Ocenenie neistoty merania boxového monitora

Pri ocenení neistoty merania kontajnerového monitora bol aplikovaný rovnaký prístup ako v prípade sudového monitora. Štandardná kombinovaná neistota merania hmotnostnej aktivity a jej zložky sú pre meranie kontajnerov a sudov uvedené v Tab. 3.

Tab.	3	Hlavné	zdroje	neistoty	pri	určení	štandardnej	kombinovanej	neistoty	merania
hmotnostnej aktivity <sup>137</sup> Cs kontajnerovým monitorom										

	Relatívna štandardná neistota		
ZIOŻKA HEISTOTY	SUD	KONTAJNER	
u(m) – neistota určenia hmotnosti, m (rozlišovacia schopnosť váhy 0.2 kg)	1.0%	1.0%	
u(N) – neistota stanovenia čistej plochy píku, N (pri $A_{\rm m}^{~137}{\rm Cs}$ na úrovni UU 300 Bq/kg)	5.0%	5.0%	
u(ε) – neistota detekčnej účinnosti, ε	10.9%	13.5%	
u(t) – neistota doby záznamu spektra, t (živá doba merania je určovania spektrometrickou trasou na 0.01 s)	zanedbateľná		
u(y) – neistota výťažnosti, y (prebrané z Nuclear Data Center – BNL)	3.5%	3.5%	
$u(A_{m})$ – relatívna štandardná kombinovaná neistota hmotnostnej aktivity, $A_{m}$	11.8%	14.9%	

#### Návrh metodiky metrologického overenia boxového monitora

Prvotným krokom pri návrhu spôsobu overenia monitora pre meranie 600 l kontajnerov bolo určenie takej polohy overovacích štandardov, ktorá reprezentuje

rovnomerné rozdelenie aktivity v objeme kontajnera. Pritom je potrebné zabezpečiť jednoduché umiestnenie štandardov do meracej polohy a ich čo najnižší nevyhnutný počet.

Porovnaním profilu účinnosti vo všetkých smeroch kontajnera možno ukázať, že k najväčšej zmene účinnosti dochádza v smere jeho šírky (hrúbky). Ide o takmer exponenciálny pokles v dôsledku nárastu vzdialenosti od detektorov ako aj nárastu hrúbky absorpčnej vrstvy. Z toho vyplýva najvhodnejší smer umiestnenia v smere šírky kontajnera, pretože zmena výslednej účinnosti detekcie pri zmene polohy tyčových etalónov (TE) je najvýznamnejšia pri ich umiestnení po dĺžke alebo výške kontajnera.

Pre výrobu overovacieho fantómu 600 l kontajnera bol zvolený návrh predpokladajúci navzájom rovnomerné rozmiestnenie 6 x 4 TE v smere osi detektorov (v smere šírky kontajnera). Vypočítaná odchýlka účinnosti detekcie od účinnosti pre homogénne rozdelenie aktivity bola pre všetky energie pri hustote 1.2 g/cm<sup>3</sup> nižšia ako 5%. V prípade použitia 6 x 10 TE by to bolo 1%. Overovací kontajner bol vyrobený úpravou štandardného kontajnera pripevnením plastových rúr s Ø22 mm s uzatvárateľnými otvormi do určených pozícií cez celú šírku kontajnera. Kontajner bol naplnený drveným kamením frakcie 4 – 8. Meraním hmotnosti overovacieho fantómu kontajnera bola určená jeho hustota 1.3 g/cm<sup>3</sup>, čo vhodne reprezentuje hustotu štandardne monitorovaných materiálov. Model umiestnenia TE v overovacom kontajneri a samotný overovací kontajner umiestnený v meracej polohe sú na Obr. 1.



Obr. 1 Model umiestnenia TE v objeme 600 l kontajnera (vľavo) a overovací fantóm kontajnera umiestnený v polohe merania, použitý pri metrologickom overení monitora (vpravo)

Metrologické overenie gamaspektrometrickej zostavy bolo vykonané SMÚ Bratislava. Pre overenie správnosti účinnostnej kalibrácie pre geometrie 600 l kontajnera a 200 l suda bol použitý navrhnutý a vyrobený overovací fantóm kontajnera a existujúce fantómy 200 l sudov a referenčné zdroje <sup>152</sup>Eu a <sup>137</sup>Cs. Pre overenie samotnej kalibračnej metódy ISOCS boli kontrolované aj jednotlivé detektory pomocou ampuliek s roztokom <sup>85</sup>Sr, <sup>88</sup>Y a <sup>241</sup>Am. Monitorovacia zostava bola overená ako gamaspektrometrická zostava s meradlom triedy presnosti 20%.

# 3.4 Návrh metodiky monitorovania celkovej plošnej kontaminácie pri uvoľňovaní stavebných štruktúr

Vzhľadom na potrebu monitorovania stavebných štruktúr a obmedzenia pri priamom meraní hmotnostnej aktivity a meraní povrchovej kontaminácie na základe detekcie beta žiarenia, bolo v súlade s odporúčaním EK [18] navrhnuté meranie celkovej plošnej kontaminácie (CPK) pomocou prenosnej gamaspektrometrickej zostavy s netieneným scintilačným detektorom, čo vzhľadom na prenikavosť žiarenia gama umožňuje aj detekciu žiarenia zo zdrojov hlbšie pod povrchom. Navrhnutý spôsob merania CPK je súčasťou komplexnej metodiky rádiologickej charakterizácie monitorovania a uvoľňovania stavebných štruktúr na JE A1.

#### Popis gamaspektrometrickej zostavy pre monitorovanie CPK

Pre monitorovanie CPK bola použitá prenosná gamaspektrometrická zostava s mnohokanálovým analyzátorom (MCA) typu InSpector1000 s LaBr 1.5" x 1.5" scintilačným detektorom.

Pri monitorovaní CPK bolo navrhnuté meranie kontaktne na stenu, čo predstavuje maximálnu citlivosť a jednoduché zabezpečenie opakovateľnosti geometrie merania. Pre kalibráciu bol použitý kalibračný nástroj ISOCS/LabSOCS [25]. Vzhľadom na to, že ide o monitorovanie konštantného materiálu (betónové povrchy), neočakáva sa významná variabilita v prvkovom zložení a jeho hustote. Navyše dominantným monitorovaným RN je <sup>137</sup>Cs, emitujúci prenikavé gama žiarenie energie 661,7 keV, a preto prípadná variabilita hrúbky kontaminovanej vrstvy nemá významný vplyv na citlivosť merania.

Hustota monitorovacej siete 1 x 1 m<sup>2</sup> bola optimalizovaná aj s ohľadom na rozdelenie odozvy od monitorovanej plochy vzhľadom na pozíciu merania. Za predpokladu rovnomernej plošnej kontaminácie na monitorovanej ploche majoritná časť odozvy pochádza z najbližšej plochy cca 1 m<sup>2</sup>, čo možno pokladať za efektívne monitorovanú plochu. Základné charakteristiky navrhnutého merania CPK sú zhrnuté v Tab. 4.

# Tab. 4 Základné charakteristiky navrhnutej metódy merania CPK <sup>137</sup>Cs na betónových povrchoch

	2
Hustota monitorovacej siete	1 x 1 m <sup>-</sup>
Efektívne monitorovaná plocha	1 m <sup>2</sup> (cca 80% celkovej odozvy)
Citlivosť merania (pri hrúbke kontaminácie 1 cm a hustote betónu 2,35 g/cm <sup>3</sup>	3,13 s <sup>-1</sup> /(Bq/cm <sup>2</sup> )
MDA (pri 100 s meraní a úrovni pozadia 0,1 μSv/h)	0,5 Bq/cm <sup>2</sup>
Produktivita merania	~40 m <sup>2</sup> /zmenu

#### Ocenenie neistoty merania pri meraní CPK <sup>137</sup>Cs

Pri ocenení relatívnej štandardnej kombinovanej neistoty merania celkovej plošnej kontaminácie <sup>137</sup>Cs, podľa vyššie popísanej metodiky, boli zohľadnené najvýznamnejšie zdroje neistoty. Pritom sa predpokladala hrúbka kontaminácie 1 cm a rovnomerné rozdelenie aktivity na monitorovanom povrchu, ktoré je v praxi kontrolovateľné napr. monitorovaním PK. Najvýznamnejšie zdroje neistoty a vstupné podmienky pre ich ocenenie sú v Tab. 5. Výpočtom ocenená hodnota neistoty merania CPK <sup>137</sup>Cs podľa navrhnutej metodiky bola na úrovni 20%.

Vzhľadom na to, že ide o určené meradlo, bolo potrebné zabezpečiť jeho metrologické overenie [17]. Prvotné overenie zostavy bolo vykonané SMÚ a zostava bola overená ako meradlo triedy presnosti 15%.

# Tab. 5 Hlavné zdroje neistoty pri ocenení štandardnej kombinovanej neistoty merania CPK <sup>137</sup>Cs betónových povrchov pomocou prenosnej gamaspektrometrickej zostavy

Zdroj neistoty	Hodnota neistoty
Neistota kalibračnej metódy ISOCS (pre 661,7 keV)	6%
Neistota v dôsledku zmeny hustoty (2.35 ± 0.5) g/cm <sup>3</sup>	8%
Neistota v dôsledku zmeny hĺbky kontaminácie (1 ± 0.3) cm	13.3%
Neistota v dôsledku zmeny polohy sondy (kontaktne ± 2 cm)	3.7%
Neistota čistej plochy píku (100 s, CPK = 8 Bq/cm <sup>2</sup> )	3%
Štandardná kombinovaná neistota merania CPK, u(CPK), (pri homogénnom rozdelení aktivity na monitorovanom povrchu)	17%
Neistota vyplývajúca z nerovnomerného rozdelenia aktivity na monitorovanom povrchu	9%
Štandardná kombinovaná neistota merania CPK, u(CPK), (s uvážením nehomogénneho rozdelenia aktivity na danom povrchu)	20%

#### 3.5 Metódy triedenia kontaminovaných zemín

#### Využitie "in situ" gamaspektrometrie pre triedenie KZ

Jedným z riešení operatívneho triedenia KZ priamo počas výkopových prác bolo zavedenie *"in situ"* monitorovania s cieľom stanovenia hmotnostnej aktivity <sup>137</sup>Cs priamo na mieste a následné rozhodnutie o ďalšom nakladaní s KZ.

Pre tento účel bola navrhnutá prenosná gamaspektrometrická zostava použitá aj pre merania CPK betónových povrchov (kap. 3.4). Detekčná účinnosť bola stanovená na základe zvolenej geometrie merania a predpokladaných parametrov monitorovanej pôdy pomocou kalibračného SW ISOCS [25], Tab. 6. Geometria merania bola optimalizovaná s ohľadom na dosiahnutie čo najvyššej citlivosti merania, ktorá klesá so vzdialenosťou detektora od povrchu.

Možno ukázať, že pri hrúbke kontaminovanej vrstvy 30 cm a hustote KZ 1,2 g/cm<sup>3</sup> predstavuje približne 300 kg. 90% odozvy pochádza z plochy s priemerom okolo 2 m, čo približne zodpovedá 1000 kg.

Navrhnutá metóda je zaťažená výraznou neistotou merania vyplývajúcou hlavne z toho, že v praktických podmienkach je náročné kontrolovať zhodu reálnej geometrie merania s použitým kalibračným modelom. V porovnaní s monitorovacími systémami pre meranie hmotnostnej aktivity chýba znalosť zloženia a hustoty KZ. Na rozdiel od merania CPK betónových povrchov s relatívne konštantným zložením materiálu, kde rovný povrch do značnej miery znamená opakovateľnosť geometrie merania, v prípade monitorovania KZ s členitým povrchom terénu toto zabezpečené nie je. Hodnotenie poukázalo na neistotu merania na úrovni desiatok %, čo tiež naznačuje, že navrhnutá metóda môže byť aplikovateľná iba pre operatívne triediace merania.

## Tab. 6 Základné charakteristiky merania pri "in situ" triedení KZ pomocou prenosnej gamaspektrometrickej zostavy s LaBr 1,5" x 1,5" scintilačným detektorom

Hustota pôdy:	1,2 g/cm <sup>3</sup>
Hrúbka monitorovanej vrstvy:	30 cm
Predpokladané rozdelenie aktivity v pôde:	homogénne
Priemer efektívne monitorovanej kruhovej plochy:	103 cm
	Netienený detektor: 0,014 s <sup>-1</sup> /(Bq/kg),
	z kruhovej plochy Ø103 cm pochádza 79%
Citlineat marania pro <sup>137</sup> Co	celkovej odozvy
Cilivosi merania pre Cs	Tienený detektor: 0,0073 s <sup>-1</sup> /(Bq/kg),
	z kruhovej plochy Ø103 cm pochádza 92%
	celkovej odozvy
Vzdialanosť dotoktor novrob:	5 cm bez tienenia
vzdialenost detektor - povičn.	10 cm s tienením
Produktivita merania v pravidelnej sieti 1 x 1 m <sup>2</sup>	40 – 50 m² za zmenu (2 pracovníci)
Rozsah použitia v poli so zvýšeným PD pri použití	$\sim 1 + Sy/b$
Pb tienenia hrúbky 4 cm a 180° kolimátora	

## Návrh metódy triedenia KZ s vysokou kapacitou merania - Lyžicový monitor pre triedenie KZ

Vzhľadom na obmedzenia vyššie popísanej metódy *"in situ"* monitorovania (nízka produktivita merania v porovnaní s produktivitou výkopovej techniky, nutnosť verifikácie laboratórnym meraním pre vylúčenie vplyvu externého zdroja na výsledky merania) bolo nutné navrhnúť vhodnú metódu triedenia KZ s dostatočne vysokou produktivitou merania.

Pre tento účel bolo posúdených niekoľko koncepcií veľkokapacitného monitorovania a ich modifikácií. Z porovnania jednotlivých koncepcií vzhľadom na náklady na zhotovenie, nárokov na obslužný personál, mobilnosť zostavy a kapacitu monitorovania bola ako najperspektívnejšia zvolená koncepcia stacionárneho monitora výkopovej lyžice.

Navrhnutý monitorovací systém pozostáva z dvojice tienených scintilačných Nal(TI) detektorov. Detektory s cylindrickými tieneniami sú umiestnené v oceľovom ochrannom ráme, na ktorý sa pokladá lyžica nakladača typu UNC s rozmermi 180 x 75 x 50 cm s KZ určenou na monitorovanie. Pre tento účel bola vybraná lyžica s plochým dnom, ktorá zabezpečuje tvar zeminy v lyžici podobný kvádru, ktorý bol použitý ako referenčná geometria pri stanovení účinnosti detekcie pomocou kalibračného nástroja ISOCS [25] a simulačných výpočtov Monte Carlo. Vzhľadom na to, že objem a hmotnosť KZ nabratej do lyžice sa môže prípad od prípadu líšiť, bola uvažovaná vrstva hrúbky 30 cm, čo približne zodpovedá nasýtenej vrstve KZ pre <sup>137</sup>Cs (661,7 keV). Základné charakteristiky monitorovacieho systému sú v Tab. 7.

Po uvedení monitora do prevádzky nie je potrebný žiadny ďalší obslužný personál okrem pracovníka obsluhujúceho nakladač. Krátka doba merania a MDA na úrovni UU znamená, že monitor je vhodným prostriedkom na predtriedenie sypkých materiálov pred transportom na pracovisko pre uvoľňovacie monitorovanie, Obr. 2. Chýbajúca kontrola hustoty, hmotnosti a hrúbky vrstvy KZ v lyžici ako aj krátka doba merania znamenajú pomerne vysokú neistotu merania (Tab. 8), ktorá je ale prijateľná pre daný účel monitorovania, ktorým je predovšetkým vysoká produktivita merania, jednoduchá obsluha ako aj nízke obstarávacie náklady.

#### Tab. 7 Základné charakteristiky merania lyžicového monitora

\_

Hrúbka vrstvy kontrolovanej zeminy	30 cm
Hustota kontrolovanej zeminy	1.2 g/cm <sup>3</sup>
Tvar vrstvy kontrolovanej zeminy	KZ v lyžici, kváder kolmo nad detektorom (75 x 30 x 180
	cm)
Vzdialenosť čela detektora a dna lyžice	5 cm
Hrúbka dna lyžice	1 cm
Hrúbka ochranného plechu	2 mm
Typ detektorov	Nal(Tl)2"x2" / Nal(Tl)3"x3"
Тур МКА	InSpector2000
Vzdialenosť osí detektorov	120 cm
Tienenie	Pb 6 cm, v 2π usporiadaní (180° kolimátor)
Doba merania	30 s
Citlivosť merania <sup>137</sup> Cs (661.7 keV)	0,009 s <sup>-1</sup> /(Bq/kg), Nal(TI)2"x2"
	0,027 s <sup>-1</sup> /(Bq/kg), Nal(TI)3"x3"
MDA <sup>137</sup> Cs (pri pozadí 0,1 µSv/h)	200 Bq/kg, Nal(Tl)2"x2"
Kapacita monitorovania	10 – 70 t za zmenu pri 0,2 t/lyžicu a dobe merania vrátane
	manipulácie 1 – 5 min.



Obr. 2 Schéma toku materiálov v procese triedenia a uvoľňovania KZ

# Tab. 8 Ocenenie štandardnej kombinovanej neistoty merania hmotnostnej aktivity <sup>137</sup>Cs pomocou lyžicového monitora s dvojicou Nal(TI)2"x2" podľa Tab. 7

Zložka neistoty merania (podmienky)	Neistota
Neistota čistej plochy píku (Am = 500 Bq/kg <sup>137</sup> Cs)	10%
Neistota v dôsledku zmeny hrúbky vrstvy (predpokladaná hrúbka vrstvy 30 cm $\pm$ 10 cm)	5%
Neistota v dôsledku zmeny hustoty (predpokladaná hustota 1.2 g/cm <sup>3</sup> s predpokladaným rozpätím hodnôt 0.8 - 2.0 g/cm <sup>3</sup> )	7%
Neistota v dôsledku zmeny tvaru vrstvy zeminy (pri čiastočnom vysypaní z lyžice)	25%
Neistota kalibračnej metódy	6%

Zložka neistoty merania (podmienky)	Neistota
Štandardná kombinovaná neistota (homogénne rozdelenie aktivity)	28.6%
Neistota v dôsledku nehomogénnej kontaminácie	34%
Štandardná kombinovaná neistota (nehomogénne rozdelenie aktivity)	45%

#### 3.6 Metódy vylepšenia rádiologickej charakterizácie využitím CZT detektorov

Základné charakteristiky a označenia CZT detektorov použitých pri experimentálnych prácach sú v Tab. 9. Planárne detektory CZT125 s CAPture<sup>TM</sup> a CPG1000 s CPG technológiou sú štandardne dodávané výrobcom (eV Products). Hemisferické detektory CZT60 a CZT20 štandardne dodávané (RITEC) v puzdre z nerezovej ocele, boli na požiadanie vyrobené s tenkým 0.5 mm hliníkovým puzdrom pre zvýšenie účinnosti detekcie gama žiarenia nízkych energií.

Detektor	Typové označenie a výrobné číslo	Objem kryštálu a rozmery sondy	Poznámky
CZT125	CZT SPEAR CAPture <sup>™</sup> ; No B2827	5 x 5 x 5 mm <sup>3</sup> (125 mm <sup>3</sup> ); Ø12 na 89 mm	Rozlíšenie 4 % @ 122 keV; energetický rozsah 10 – 670 keV; planárny detektor s rozšírenou katódou; VN: +750 V; 4096 kanálov
CPG1000	Co-Planar Grid; model: LAB-CPG; No 10005	10 x 10 x 10 mm <sup>3</sup> (1000 mm <sup>3</sup> ); Ø38 na 160 mm	Rozlíšenie 2 - 4 % @ 661,7 keV; energetický rozsah 30 keV – 3 MeV; planárny detektor s CPG technológiou; VN: -1300 V; 1024 kanálov
CZT60 smer maximálnej odozvy je horizontalny, kolmý na os puzdra	SDP 310/Z/LS60 S; No 991	5 x 5 x 2.5 mm <sup>3</sup> (60 mm <sup>3</sup> ); Ø8 na 83 mm	Rozlíšenie 8.5 keV @ 661,7 keV; hemisferický detektor; CZT kryštál orientovaný kolmo na os puzdra sondy, hliníkové puzdro hrúbky 0.5 mm; VN: +300 V; 4096 kanálov
CZT60 smer maximálnej odozvy je vertikálny, rovnobežný s osou puzdra	SDP 310/Z/LS60 S; No 1006	5 x 5 x 2.5 mm <sup>3</sup> (60 mm <sup>3</sup> ); Ø10 na 78 mm	Rozlíšenie 10.3 keV @ 661,7 keV; hemisferický detektor; CZT kryštál orientovaný v smere osi puzdra sondy, hliníkové puzdro hrúbky 0.5 mm; VN: +300 V; 4096 kanálov
CZT20 smer maximálnej odozvy je horizontálny, kolmý na os puzdra	SDP 310/Z/LS20 S; No 1021	3 x 3 x 1.5 mm <sup>3</sup> (20 mm <sup>3</sup> ); Ø8 na 83 mm	Rozlíšenie 8.4 keV @ 661,7 keV; hemisferický detektor; CZT kryštál orientovaný kolmo na os puzdra sondy, hliníkové puzdro hrúbky 0.5 mm; VN: +200 V; 4096 kanálov

#### Tab. 9 Základné charakteristiky CZT detektorov použitých pri experimentálnych prácach

#### Poloempirická kalibračná metóda založená na jednobodovom modeli CZT detektora

Pre určovanie špecifických aktivít bolo navrhnuté určovanie detekčnej účinnosti pomocou poloempirického modelu bodového detektora s efektívnou polohou v geometrickom strede kryštálu CZT. Model predpokladá, že rozdiel v účinnosti detekcie na BZ a objemový zdroj, odhliadnuc od samoabsorpčných vlastností vzorky, je daný iba geometrickým faktorom určeným rozmermi a polohou oboch zdrojov. Geometrický faktor ako aj rozdiel v účinnosti detekcie pre bodový a objemový zdroj pre danú energiu vyplývajúci zo samoabsorpcie vzorky a absorpcie v tienení detektora, boli zohľadnené pomocou výpočtového nástroja VISIPLAN [26].

Model predpokladá, že účinnosť detekcie možno vyjadriť kalibračným koeficientom pre BZ,  $P_0$ , ktorý vyplýva zo vzťahu (7) pre vyjadrenie účinnosti pre BZ vo vzdialenosti *h* pred detektorom pri danej energii žiarenia *E*:

$$I_B(h) = \frac{N_B(h)}{A_B \times z} = \frac{P_0}{h^2}$$
(7)

kde

 $I_{B}(h)\,$  - účinnosť detekcie pre BZ vo vzdialenosti, h, od stredu detektora, [1],  $A_{B}$  - aktivita BZ [Bq]

z - pravdepodobnosť emisie fotónu pri jednej premene [s<sup>-1</sup>/Bq],

N<sub>B</sub>(h) - početnosť impulzov v píku úplnej absorpcie [s<sup>-1</sup>],

- h vzdialenosť BZ od efektívneho stredu detektora [m] (v osi detektora h =  $x+x_0$ , kde x je vzdialenosť nad detektorom a  $x_0$  je vzdialenosť efektívneho stredu a čela detektora),
- P<sub>0</sub> poloempirická kalibračná konštanta detektora (zohľadňuje tiež absorpciu v plastovo-hliníkovom puzdre detektora hrúbky okolo 0.5 mm) [m<sup>2</sup>],

Účinnosť detekcie potom možno pre objemový zdroj,  $I_{VK}$ , a kolimovaný detektor určiť nasledovne:

$$I_{VK} = \frac{I_B(h) \times A_B}{PD_B(h)} \times \frac{PD_{VK}}{A_V} = \frac{P_0}{DF} \times \frac{PD_{VK}}{A_V}$$
(8)

kde

- $P_0$ ,  $I_B(h)$ ,  $A_B sú$  definované podľa rovnice (7) na základe empirických meraní BZ [m<sup>2</sup>],
- PD<sub>B</sub>(h) je príkon dávky spôsobený nerozptýlenými fotónmi v mieste tieneného detektora s kolimátorom od BZ vo vzdialenosti *h* od efektívneho stredu detektora [mSv/h],
- DF je dávkový faktor BZ [(mSv/h) / (Bq) x m<sup>2</sup>] vypočítaný pomocou programu Visiplan ( $DF = PD_B(h) / A_B x h^2$ ),
- PD<sub>VK</sub> je príkon dávky spôsobený nerozptýlenými fotónmi v mieste tieneného detektora s kolimátorom od objemového zdroja vypočítaný programom VISIPLAN [mSv/h],
- Av aktivita objemového zdroja uvažovaná pri výpočte PDvk [Bq].

Kalibračný model bol odskúšaný pomocou merania objemových betónových zdrojov v tvare kvádra a valčeka tieneným aj netieneným CZT detektorom. V prípade energie

661,7 keV bola dosiahnutá prijateľná zhoda medzi nameranou a vypočítanou hodnotou účinnosti detekcie,  $I_{VK}$ , na úrovni menšej ako 20% až 30%. V prípade energie 32 keV a netieneného detektora sa namerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie,  $I_{VK}$ , v dôsledku výraznej uhlovej závislosti odozvy detektora výrazne líšia, a to až niekoľkonásobne. V prípade energie 32 keV bola odskúšaná aj korekcia parametra  $P_0$  podľa jeho empiricky určenej uhlovej závislosti. Korigovaná hodnota  $P_0$ (cor), zohľadňujúca uhlovú závislosť odozvy, bola určená ako vážený priemer hodnôt  $P_0$  v rozsahu 0° - θ, podľa vzťahu:

$$P_{0}(cor) = \frac{\sum_{i=1}^{\theta} P_{0}(\theta_{i}) * (S(\theta_{i}) - S(\theta_{i-1}))}{\sum_{i=1}^{\theta} (S(\theta_{i}) - S(\theta_{i-1}))}$$
(9)

kde  $P_0(\theta)$  a  $S(\theta)$  predstavujú hodnoty parametra  $P_0$  a povrch *S* kruhovej plochy vzorky zodpovedajúcej zornému uhlu  $\theta$ .  $\theta$  je daný kolimačným uhlom tienenia a vzdialenosťou vzorky. Táto zjednodušená korekcia predpokladá, že odozva [s<sup>-1</sup>] z danej plochy povrchu vzorky je proporcionálna tejto ploche, čo je v skutočnosti dosiahnuté iba pri tenkých vzorkách so zanedbateľnou hrúbkou, t.j. nezohľadňuje samoabsorpciu vo vzorke. Po tejto korekcii bola pre všetky prípady s tieneným detektorom dosiahnutá zhoda na úrovni porovnateľnej s 661,7 keV.

Výsledky testovacích meraní preukázali, že navrhnutý postup je v uvedenom rozsahu neistôt aplikovateľný pre určovanie účinnosti detekcie CZT detektora (a tým i kvantifikáciu údajov merania CZT detektorov) na bežné objemové žiariče a tieniaci kolimátor definovateľný v SW pre výpočet príkonov dávky od nerozptýlených fotónov.

#### Využitie CZT detektorov pri charakterizácii škvŕn kontaminácie betónových povrchov

Vzhľadom na relatívne vyššiu účinnosť detekcie CZT detektorov v oblasti nízkych energií, je možné ich využiť pre odhad efektívnej hrúbky povrchovej kontaminovanej vrstvy na základe pomeru odozvy v píkoch úplnej absorpcie energie 661,7 keV a 32 keV s rozdielnymi absorpčnými vlastnosťami v betóne. Takéto meranie poskytuje možnosť nielen nedeštruktívneho odhadu hĺbky kontaminácie, ale aj určenia inventáru RN vrátane obsahu transuránových prvkov (TRU), reprezentovaných <sup>241</sup>Am emitujúcim, aj gama žiarenie energie 59,6 keV. Znalosť efektívnej hĺbky kontaminácie je pri detekcii nízkych energií gama žiarenia významnejšia, pretože absorpcia gama žiarenia energie 59,6 keV v betóne je výrazne vyššia v porovnaní s energiou 661,7 keV.

Pre odtienenie interferujúceho žiarenia z okolitých zdrojov bol s ohľadom na rozdelenie odozvy z monitorovanej plochy betónového povrchu ako aj empiricky určeného priestorového rozdelenia odozvy vybraných detektorov navrhnutý a vyrobený tieniaci kolimátor.

Pre stanovenie závislosti pomeru odozvy v píkoch 32 keV a 661,7 keV od efektívnej hĺbky kontaminácie bola zvolená empirická kalibrácia na základe vyrobených betónových referenčných zdrojov s rôznou hrúbkou a so známou aktivitou <sup>137</sup>Cs a <sup>241</sup>Am. Referenčné údaje boli stanovené na základe dávkovania známych množstiev aktivity do betónovej zmesi a laboratórnej gamaspektrometrickej analýzy betónových valčekov odliatych z betónovej kaše každej referenčnej kalibračnej dosky.

## Využitie beta spektrometra pre operatívne nedeštruktívne stanovenie obsahu <sup>90</sup>Sr v materiáloch z vyraďovania JZ

Pre meranie rádiologicky významného <sup>90</sup>Sr emitujúceho beta žiarenie 546 keV bol použitý beta spektrometer pozostávajúci z detektora s plastickým scintilátorm [19] a MCA InSpector2000 s 512 kanálovým spektrom. Detektor pozostáva zo scintilačného detektora v tvare disku s priemerom Ø3" a hrúbkou 3,5 mm svetlotesne uzavretého tenkou titánovou fóliou (50 µm).

Meranie aktivity <sup>90</sup>Sr je založené na meraní beta spektra jeho dcérskeho produktu <sup>90</sup>Y emitujúceho žiarenie 2.27 MeV, ktorý je vzhľadom na jeho krátku dobu polpremeny (2.67 dňa) v porovnaní so <sup>90</sup>Sr (28.74 rokov) s ním v rádioaktívnej rovnováhe.

Meranie je vykonávané v dvoch krokoch:

- a) meranie s hliníkovým filtrom hrúbky 3 mm (meranie pozadia, detekcia gama žiarenia),
- b) meranie bez filtra (hlavné meranie, detekcia gama + beta žiarenia).

Zložka beta žiarenia spektra sa získa odčítaním spektra pozadia (γ) od hlavného spektra ( $\beta$ +γ). Stanovenie aktivity <sup>90</sup>Sr je založené na nameranej početnosti impulzov od žiarenia beta od <sup>90</sup>Y v pracovnom energetickom intervale  $\Delta E_e$  0.9 – 2.0 MeV. Detektorom je možné merať tenké vzorky (filtre, otery), u ktorých sa predpokladá povrchová kontaminácia a ktoré predstavujú zanedbateľnú absorpčnú vrstvu pre žiarenie beta (v týchto prípadoch je vyhodnocovaná celková aktivita [Bq]), ako aj objemovo kontaminované vzorky (pôdy, betóny, kvapaliny), u ktorých sa predpokladá rovnomerná kontaminácia v objeme a ktorých hrúbka predstavuje nasýtenú vrstvu pre žiarenie β (v týchto prípadoch sa vyhodnocuje hmotnostná aktivita [Bq/kg]).

MDA merania pre rôzne typy vzoriek a typické doby merania sú uvedené v Tab. 10. Energetická kalibrácia je vykonávaná na základe tvaru gama spektra <sup>137</sup>Cs+<sup>60</sup>Co alebo <sup>22</sup>Na. Pre kontrolu účinnostnej kalibrácie bol použitý plošný etalón <sup>90</sup>Sr typu EZ1. Kalibrácia meradla bola metrologicky overená SMÚ Bratislava pre tenké aj objemové vzorky.

Dania marania	Rozsah merania		
Popis merania	Hodnota	Jednotka	
Hmotnostná aktivita <sup>90</sup> Sr (vzorka neobsahuje prírodné RN)	6.0E+01 - 3.0E+06	Bq/kg	
Celková aktivita 90Sr (vzorka neobsahuje prírodné RN)	5.0E-01 – 2.0E+04	Bq	
Prítomnosť <sup>137</sup> Cs (< 100 Bq/kg) vo vzorke	MDA = ~75	Bq/kg	
Prítomnosť <sup>60</sup> Co vysokej aktivity vo vzorke	MDA = ~160	Bq/kg	

Tab. 10 MDA	<sup>90</sup> Sr beta	spektrometra	pre rôzne	podmienky	merania [19]
-------------	-----------------------	--------------	-----------	-----------	--------------

## 4 VÝSLEDKY DIZERTAČNEJ PRÁCE S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKOV

## 4.1 Výsledky v oblasti zvýšenia kapacity uvoľňovacieho monitorovania

Ako lacnejšia alternatíva k štandardným monitorom sudov, vybavených 3 stabilnými alebo jedným pohyblivým HPGe detektorom, bol navrhnutý prenosný monitor, vybavený iba jedným detektorom. Nižšie náklady znamenajú možnosť zriadenia paralelne viacerých pracovísk pre uvoľňovacie monitorovanie. Prenosnosť monitora znamená aj elimináciu nákladov na transport na a z monitorovacieho pracoviska. Použitie iba jedného detektora zároveň znamená nižšiu citlivosť merania a absenciu kontroly homogénneho rozdelenia aktivity v kontrolovanom objeme, ktoré pri vzorkách s veľkým objemom predstavujú najvýznamnejší zdroj neistoty merania. Rozbor neistoty merania ukázal, že pri zavedení vhodného triediaceho monitorovania zabezpečujúceho, že na uvoľňovacie monitorovanie budú dodávané iba potenciálne uvoľniteľné materiály rovnakej úrovne kontaminácie, možno pri porovnateľnej dobe merania dosiahnuť detekčné limity pod úrovňou UU a neistotu merania na úrovni do 20%.

Pre kvantitatívne ocenenie citlivosti monitorovacieho systému na BZ bol zavedený faktor maximálnej neistoty merania vyjadrujúci maximálne teoretické podhodnotenie výsledkov merania v dôsledku výskytu BZ v mieste objemu vzorky s najnižšou účinnosťou detekcie. Stanovené hodnoty tohto parametra pre kritické polohy BZ pre vybrané monitorovacie systémy líšiace sa počtom detektorov a geometriou merania sú zhrnuté v Tab. 11.

# Tab. 11 Faktor maximálnej neistoty merania, *f*, vyjadrujúci maximálne teoretické podhodnotenie výsledku merania v prípade konzervatívneho scenára predpokladajúceho výskyt BZ v monitorovanom objeme, pre vybrané monitorovacie systémy a geometrie merania

Typ monitora	Geometria merania	f	Poznámka	
Monitor sudov s 3 stabilnými detektormi	200 l sud	3	Zvislá os suda	
Monitor sudov s 1 pohyblivým detektorom	200 l sud	2	Zvislá os suda	
Monitor sudov s 1	200 l sud	12	V osi suda, naspodku alebo navrchu	
stabilným detektorom	VZT filter rozmerov 60 x 60 x 60 cm <sup>3</sup>	4	Roh VZT filtra vzdialený od detektora	
Pásový monitor KZ s dvomi detektormi	Monitorovaná vrstva KZ 40 x 60 cm <sup>2</sup> hrúbky 5 cm	2	Na okraji pásu, na spodku vrstvy KZ	
Monitor kontajnerov a sudov s 2 detektormi	200 l sud	6	V osi suda, naspodku alebo navrchu	
	600 l kontajner	23	V strede šírky, na okraji kontajnera	

Vidno, že maximálna hodnota f bola dosiahnutá pri najobjemnejšej geometrii merania

so 600 l kontajnerom. V prípade 200 l sudov vidno, že tento parameter je možné redukovať zväčšením počtu detektorov, no úplne ho nemožno eliminovať ani pri drahých monitorovacích systémoch s viacerými detektormi. Najnižšia hodnota *f* spomedzi porovnávaných bola dosiahnutá pri tenkej geometrii pásového monitora (5 cm vrstva zeminy) a v prípade filtračných vložiek VZT s hustotu 0.1 g/cm<sup>3</sup>. Tenká vrstva a nízka hustota materiálu znamenajú nízku samoabsorpciu žiarenia v monitorovanom materiáli a relatívne rovnomerné rozdelenie účinnosti detekcie v celom objeme kontrolovaného materiálu, čo zabezpečuje vyššiu citlivosť na výskyt prípadných BZ. Koncepcia monitora sudov s jedným detektorom bola odskúšaná pomocou gamaspektrometrickej zostavy s LaBr detektorom, popísanej v kap. 3.4. Výsledky skúšobného merania sudov v porovnaní s výsledkami merania týchto sudov na uvoľňovacom pracovisku CMP, vybavenom 3 HPGe detektormi, ukázali odchýlky na úrovni do 20%.

Pre ďalšie zvýšenie kapacity uvoľňovacieho monitorovania bol navrhnutý a dodaný monitor využívajúci ako meraciu nádobu 600 l hranatý kontajner s výklopným dnom. Cenou za veľký objem meracej nádoby je podobne ako u 200 l suda pomerne veľká samoabsorpcia žiarenia v matrici a z toho vyplývajúca neistota merania v dôsledku nerovnomerného rozdelenia aktivity v monitorovanom objeme, ktorú je potrebné kontrolovať vhodným predchádzajúcim triediacim monitorovaním. Kontrola homogenity, založená na porovnaní odozvy z jednotlivých detektorov, je súčasťou procesu vyhodnotenia merania.

Rozbor hlavných zdrojov neistoty ukázal, že pri uvedených postupoch procesu uvoľňovania môže byť dosiahnutá neistota merania na úrovni do 20%. Vzhľadom na to, že ide o prototyp určeného meradla vyžadujúci metrologické overenie, bol navrhnutý a vyrobený overovací fantóm kontajnera s otvormi pozdĺž celej šírky kontajnera pre vkladanie referenčných tyčových etalónov vyplnený drveným kamením. Overovacími skúškami vykonanými SMÚ bolo preukázané, že monitor spĺňa podmienky určeného meradla triedy presnosti 20%.

## 4.2 Výsledky v oblasti zvýšenia kapacity triediaceho monitorovania

Pre operatívne triedenie KZ bolo navrhnuté "in situ" meranie v pravidelnej sieti bodov 1 x 1 m<sup>2</sup> pomocou prenosnej gamaspektrometrickej zostavy so scinitlačným detektorom umiestneným tesne nad povrchom monitorovanej vrstvy KZ.

Metodika je vhodná hlavne pre prieskumné monitorovanie na miestach, kde sa výskyt kontaminácie neočakáva a cieľom meraní je toto potvrdiť, prípadne identifikovať miesta lokálne zvýšenej kontaminácie. Produktivita merania je cca 40 – 50 m<sup>2</sup> za pracovnú zmenu. Rádiologický prieskum založený iba na odbere vzoriek a ich laboratórnej analýze je z hľadiska potrebného času i nákladov niekoľkokrát náročnejší (odber vzoriek, ich spracovanie a následná laboratórna analýza).

Nevýhodou metódy je nutnosť potvrdenia identifikovaného miesta kontaminácie na základe odberu vzorky pre vylúčenie prípadného externého zdroja interferujúceho žiarenia. Pre použitie v podmienkach so zvýšeným pozadím PD (do 1 µSv/h) bolo navrhnuté a vyrobené prenosné 4 cm Pb tienenie, ktoré redukuje vplyv bočných interferujúcich zdrojov.

Metodika bola úspešne aplikovaná pri operatívnej kontrole odkopávaných KZ počas odkopávania podzemných nádrží N1, N2 v obj. 41 JE A1, kde cieľom meraní bolo hlavne identifikovať a vytriediť KZ > 300 Bq/kg <sup>137</sup>Cs. Metodika bola obdobne aplikovaná pre operatívnu kontrolu zeminy počas odkopávania a odstraňovania potrubných kanálov v rámci vyraďovania JE A1. Pri monitorovaní vo výkope kanála

možno použiť netienený detektor, nakoľko steny výkopu predstavujú dostatočnú absorpčnú vrstvu pre odtienenie zdrojov interferujúceho žiarenia nachádzajúcich sa na povrchu.

Pre zvýšenie kapacity triedenia KZ bol navrhnutý a vyrobený lyžicový monitor s Nal(Tl) scintilačnými detektormi umiestnenými v Pb tienení hrúbky 6 cm, umožňujúci operatívne stanovenie hmotnostnej aktivity <sup>137</sup>Cs KZ v lyžici nakladača po jej spustení na merací stôl aj v podmienkach zvýšeného PD. Relatívne vysoká citlivosť merania umožňuje nastavenie požadovanej triediacej úrovne aj na úrovni uvoľňovacích limitov. Teoretická produktivita meraní je na úrovni desiatok ton za zmenu, čo znamená možnosť operatívneho triedenia pri nasadení výkopových mechanizmov. Samotný monitor je možné podľa potreby transportovať na miesto aktuálne prebiehajúcich výkopových prác.

Monitor bol aplikovaný pri triedení KZ z odkopávania podzemných nádrží N6/1, N6/2 v obj. 41 JE A1 s cieľom vytriediť KZ > 10 000 Bq/kg<sup>137</sup>Cs, kde sa použitie "in situ" merania vzhľadom na rôznorodosť úrovne a distribúcie kontaminácie ukázalo ako neefektívne. Monitor bol prevádzkovaný tiež pre vytriedenie potenciálne uvoľniteľných zemín (triediaca úroveň < 500 Bq/kg). Takto vytriedené potenciálne uvoľniteľné zeminy boli transportované na pracoviská pre vykonanie uvoľňovacích meraní.

# 4.3 Výsledky v oblasti monitorovania celkovej plošnej kontaminácie betónových štruktúr pri uvoľňovaní budov

Bolo navrhnuté a odskúšané meranie CPK <sup>137</sup>Cs pomocou metrologicky overenej prenosnej gamaspektrometrickej zostavy kontaktne na povrchu betónovej štruktúry v sieti meraní 1 x 1 m<sup>2</sup>, navrhnutej s ohľadom na rozdelenie detegovanej odozvy od povrchu monitorovanej plochy. Takýto spôsob monitorovania je tiež v súlade s odporúčaním EK [18]. Detekcia gama žiarenia umožňuje identifikáciu kontaminácie aj v podpovrchovej vrstve. Vzhľadom na to, že podľa doterajších skúseností je väčšina aktivity deponovaná práve v povrchovej vrstve hrúbky niekoľko mm až cm, predstavuje navrhnuté geometrické usporiadanie tenkú geometriu merania čo znamená dostatočnú citlivosť na výskyt prípadných škvŕn zvýšenej kontaminácie. Výhodou je tiež vysoká operatívnosť "in situ" merania, ktoré na rozdiel od odberu vzoriek a ich laboratórnych analýz poskytujú výsledky merania priamo na mieste.

Navrhnutá metóda merania CPK predstavuje jednu z kľúčových "in situ" metód pre posudzovanie úrovne kontaminácie betónových povrchov stavebných štruktúr, hodnotenie účinnosti procesu dekontaminácie a záverečné deklarovanie priemernej hodnoty hmotnostnej aktivity v súlade s požiadavkami legislatívy SR. Metóda je súčasťou komplexnej metodiky monitorovania a uvoľňovania stavebných štruktúr ako stojacích budov odstránením kontaminovaných predovšetkým povrchových štruktúr, čo výrazne redukuje tvorbu RAO, ktoré by bolo potrebné monitorovať v prípade demolácie budovy pred jej dekontamináciou. Uvedená metodika bola aplikovaná napr. pri vyraďovaní a dekontaminácii betónovej štruktúry podzemných nádrží na JE A1.

# 4.4 Dosiahnuté výsledky v oblasti vylepšenia rádiologickej charakterizácie v procese vyraďovania pomocou CZT detektorov

# Charakterizácia lokálnych škvŕn kontaminácie na betónových povrchoch stavebných štruktúr

Bol navrhnutý a odskúšaný spôsob "in situ" monitorovania škvŕn kontaminácie

pomocou tieneného CZT detektora kontaktne k povrchu s cieľom operatívneho odhadu efektívnej hĺbky kontaminácie, čo umožňuje efektívnejšie vyhodnotenie rozsahu a pôvodu kontaminácie, ako aj základ pre voľbu vhodného procesu dekontaminácie.

Odhad hĺbky kontaminácie je založený na určovaní pomeru odozvy v píkoch 32 a 661,7 keV <sup>137</sup>Cs. Znalosť efektívnej hĺbky kontaminácie umožňuje aj prípadné stanovenie obsahu <sup>241</sup>Am, emitujúceho gama žiarenie 59,6 keV, kde vzhľadom na hustotu betónu a nízku prenikavosť žiarenia, účinnosť detekcie výrazne závisí od hĺbky kontaminácie. Ocenenie obsahu <sup>241</sup>Am je významným podkladom pre odhad obsahu TRU.

Merania pomocou CZT detektorov potvrdili ich aplikovateľnosť pri operatívnom odhadu efektívnej hĺbky kontaminácie a určovaní CPK <sup>137</sup>Cs v miestach lokálnych škvŕn zvýšenej kontaminácie. Dostatočná selektivita merania bola potvrdená dobrou zhodou výsledkov "in situ" meraní s výsledkami odobraných vzoriek aj v prípade škvrny malých rozmerov s odlišnou hĺbkovou distribúciou aktivity.

#### Aplikácia CZT detektorov pri "in situ" kontrole obsahu TRU v kvapalných RAO

Experimentálne meranie kalu s tieneným CZT detektorom priloženom z boku suda ukázalo, že aktivita <sup>241</sup>Am nie je merateľná, MDA je rádovo vyššia ako typické aktivity <sup>241</sup>Am v kale, Obr. 3. MDA <sup>241</sup>Am bola vypočítaná na základe vypočítanej citlivosti merania <sup>241</sup>Am a experimentálne určenej hodnoty pozadia v oblasti <sup>241</sup>Am (59,6 keV). Citlivosť merania <sup>241</sup>Am a <sup>137</sup>Cs bola určená pomocou programu VISIPLAN a jednobodového modelu CZT detektora. Vypočítaná citlivosť merania <sup>137</sup>Cs (661,7 keV) sa zhodovala s citlivosťou určenou na základe experimentálneho merania a referenčnej hodnoty určenej gamaspektrometrickou analýzou (GSA) odobraných vzoriek na akceptovateľnej úrovni 5%.

Znižovanie MDA realizáciou dlhého niekoľkohodinového merania nie je z hľadiska účelu merania výhodné, preto bolo odskúšané meranie s vhodnou geometriou merania s tenkou vrstvou kalu, ktorá nepredstavuje významnú absorpčnú vrstvu pre žiarenie <sup>137</sup>Cs (661,7 keV). Séria meraní v geometrii Petriho misky (PM) s vnútorným priemerom Ø9 cm ukázala, že aktivita <sup>241</sup>Am v kale je merateľná, Obr. 4. S rastúcim množstvom vzorky ale rastie aj PD od takejto vzorky, ktorý pri daných špecifických aktivitách je pomerne vysoký a už aj rádiologicky významný (cca 50 µSv/h pri 10 ml vzorky kalu).

Na základe toho bola pre uvedenú geometriu PM vykonaná aj optimalizácia množstva meranej vzorky. PD a MDA v závislosti od množstva vzorky boli určené výpočtom s využitím jednobodového kalibračného modelu CZT detektora a experimentálnych údajov už vykonaných meraní. Pre použitú geometriu PM bolo ukázané, že z hľadiska dosiahnutia minimálnych hodnôt MDA <sup>241</sup>Am a zároveň s ohľadom na prístup ALARA (min. ožiarenie pracovníka pri manipulácii so vzorkou), je postačujúce meranie vrstvy hrúbky okolo cca 5 mm (30 ml).

Priebeh MDA <sup>241</sup>Am v závislosti od hrúbky vrstvy je kvalitatívne rovnaký pre rôzne aktivity <sup>137</sup>Cs v kale (t.j. hrúbka okolo 5 mm). Z Obr. 5 je zrejmé, že s narastajúcou aktivitou <sup>137</sup>Cs pod detektorom klesá minimálny detekovateľný pomer <sup>241</sup>Am na danom pozadí <sup>137</sup>Cs. Je to preto, lebo nárast pozadia v oblasti detekcie <sup>241</sup>Am je vyvážený lineárnym rastom citlivosti merania (pri tom istom pomere <sup>241</sup>Am/<sup>137</sup>Cs). Tento minimálny detekovateľný pomer klesá nepriamo s odmocninou nárastu aktivity <sup>137</sup>Cs (viď na Obr. 5 rádový pokles MDA(<sup>241</sup>Am) / A(<sup>137</sup>Cs) pri náraste aktivity <sup>137</sup>Cs o 2 rády, napr. pri hrúbke kalu 5 mm).



Obr. 3 Zaznamenané spektrum pomocou tieneného CZT125 detektora kontaktne z boku 200 l suda s kalom a zmesou kalu a vody



Obr. 4 Spektrá pre rôzne hrúbky vrstvy kalu v Petriho miske, (CZT tienené vrchnákom PM (2 mm skla)), v spektre vidno aj píky X žiarenia od olovenej tieniacej steny oddeľujúcej miesto merania od okolitého priestoru v laboratóriu; energetický rozsah 20 – 750 keV (vľavo), energetický rozsah 20 – 100 keV (vpravo)



Obr. 5 Závislosť pomeru MDA <sup>241</sup>Am ku aktivite <sup>137</sup>Cs a PD spôsobeného <sup>137</sup>Cs od hrúbky vrstvy kalu v PM, pri bežnom obsahu <sup>137</sup>Cs (vľavo) a pre rôzne špecifické aktivity <sup>137</sup>Cs v kale (vpravo), MDA sa vzťahuje pre 10 min meranie

#### Aplikácia CZT detektorov pri "in situ" kontrole obsahu TRU povrchov PDS

Významným limitujúcim faktorom priameho merania kontaminácie vnútorného povrchu PDS je vysoký PD na úrovni až ~ mSv/h zodpovedajúci relatívne vysokým aktivitám, pri ktorých dochádza k zahlteniu väčšiny typov štandardných detektorov.

Na základe toho boli posúdené možnosti využitia CZT detektorov pre tento účel. Simulačnými výpočtami bolo ukázané, že vplyv hrúbky a hustoty kontaminovanej povrchovej vrstvy hrúbky okolo 0,1 mm na citlivosť merania nie je veľmi významný. Výpočet tiež ukázal, že hrúbka ocele 6 mm je dostatočná pre odtienenie gama žiarenia 59,6 keV, čo pri umiestnení detektora v osi PDS znamená dostatočnú selektivitu merania vnútorného povrchu PDS a samotienenie okolitých zdrojov, prípadne žiarenia z vonkajšieho povrchu PDS. Z toho tiež vyplýva možnosť určenia aktivity <sup>137</sup>Cs vnútorného povrchu PDS na základe detekcie 32 keV pri meraní vo vnútri PDS. To umožňuje odhad rozdelenia aktivity <sup>137</sup>Cs na vonkajšom a vnútornom povrchu PDS na základe odozvy v píku 661,7 keV a známeho rozdelenia odozvy z vonkajšieho a vnútorného povrchu. ktoré možno pre dané geometrické usporiadanie stanoviť výpočtom, napr. pomocou nástroja Visiplan.

Pre experimentálne merania boli použité telieska fragmentov PDS s PD na úrovni desiatok až stoviek  $\mu$ Sv/h ako aj fragment PDS s PD na úrovni pozdĺž osi na úrovni 10 – 20 mSvh. Cieľom meraní bolo tiež stanoviť obmedzenia prevádzkovateľnosti detektorov vzhľadom na úroveň PD spojenou so zaťažením gamaspektrometrickej trasy.

Z experimentálnych meraní vyplynulo, že spomedzi dostupných testovaných detektorov je najvhodnejší hemisferický CZT60, ktorý je schopný prevádzky v poliach s vyšším PD v porovnaní s ostatnými (CZT20 detektor v čase experimentu nebol k dispozícii), Obr. 6. Okrem toho sa ukázalo, že smerová závislosť účinnosti detekcie pre nízke energie je u tohto detektora menej významná oproti testovaným planárnym CZT detektorom (CZT125, CPG1000), čo zabezpečuje vyššiu účinnosť detekcie pri meraní relatívne veľkých objektov, akými sú aj fragmenty PDS, kde je odozva registrovaná pod širokým priestorovým uhlom. Merania pomocou rôznych typov CZT detektorov v zásade ukázali, že priame merania <sup>137</sup>Cs je realizovateľné, pričom typická aktivita <sup>241</sup>Am bola na rádovo nižšej úrovni v porovnaní s MDA, dosiahnuteľnou pomocou CZT detektorov pri typickej dobe merania 10 min.

Namerané hodnoty aktivity <sup>137</sup>Cs pomocou CZT detektorov boli porovnané s výsledkami merania scinitlačným LaBr 1.5" x 1.5" detektorom s nezávislou kalibráciou ISOCS, pričom bola dosiahnutá zhoda na akceptovateľnej úrovni. Rádová zhoda bola dosiahnutá aj pri porovnaní dosiahnutých výsledkov s výsledkami laboratórnych analýz odobraných vzoriek. Dosiahnuté výsledky zároveň potvrdili použiteľnosť navrhnutého jednobodového poloempirického modelu CZT detektora, ktorý bol aplikovaný pri určovaní účinnostnej kalibrácie.

Z hodnotenia požiadavky kontroly limitu pre celkovú alfa aktivitu (4E+06 Bg/kg) pri fragmentov PDS do sudov vyplynulo, že ukladaní CZT detektor ai v najjednoduchšom usporiadaní (v strede fragmentu) je schopný priamo merať <sup>241</sup>Am fragmentu. Toto bolo preukázané aktivitv požadované úrovne ai experimentálnym meraním fragmentu PDS s PD na úrovni 20 mSv/h a aktivitou <sup>137</sup>Cs 5E+08 Bg/kg pomocou tieneného detektora na okraji fragmentu, kde bola dosiahnutá MDA <sup>241</sup>Am na úrovni 1E+05 Bq/kg. Takže ako je vidieť aj za týchto extrémnych podmienok je MDA stále rádovo nižšia v porovnaní s limitnou hodnotou, ktorú treba kontrolovať.



Obr. 6 Spektrá netieneného a tieneného CZT60 detektora z meraní fragmentu PDS B363/13

## Výsledky v oblasti vylepšenia rádiologickej charakterizácie pomocou operatívneho stanovenia aktivity <sup>90</sup>Sr

Detektor bol odskúšaný v "in situ" i v laboratórnych podmienkach. Meranie v "in situ" podmienkach ukázalo schopnosť merania <sup>90</sup>Sr aj na vysokom pozadí <sup>137</sup>Cs a prevádzkyschopnosť meradla aj pri vysokej úrovni pozadia PD ~ mSv/h.

Výsledky merania aktivity <sup>90</sup>Sr "in situ" meraním je pomerne zložité porovnávať s výsledkami "in situ" meraní <sup>137</sup>Cs založenými na detekcii gama žiarenia pretože odozva v prípade gama žiarenia pochádza aj z vnútornej štruktúry napr. monitorovaného betónového povrchu, pričom v prípade beta žiarenia iba z tenkej povrchovej vrstvy. Z tohto dôvodu bolo pre stanovenie pomeru <sup>90</sup>Sr k <sup>137</sup>Cs zavedené laboratórne meranie homogenizovaných vzoriek.

Pre stanovenie obsahu <sup>90</sup>Sr v kvapalných RAO bola navrhnutá a odskúšaná metóda, pri ktorej je známe množstvo vzorky nakvapkané na filtračný papier a po odparení kvapalnej fázy je vzorka meraná štandardne ako tenké vzorky. Kalibráciu na tenké vzorky možno použiť aj v prípade merania malého množstva objemovo kontaminovaného materiálu (napr. betónový prach na dne PM).

Boli vykonané tiež porovnávacie merania vzoriek rôznych druhov odpadov s rôznym obsahom <sup>90</sup>Sr. Porovnanie výsledkov s výsledkami rádiochemických analýz týchto vzoriek vykonaných KJCh PrF UK poukázalo na dobrú zhodu s priemernou odchýlkou na úrovni 4,8%.

Prevádzka beta spektrometra celkovo ukázala, že predstavuje relatívne rýchlu a spoľahlivú nedeštruktívnu metódu pre operatívne stanovenie <sup>90</sup>Sr v materiálových tokoch z vyraďovania JZ, Obr. 7. V závislosti od úrovne aktivity je možné beta spektrometrom zmerať niekoľko vzoriek za deň. V porovnaní so štandardnou rádiochemickou separačnou metódou má meradlo vyššiu MDA avšak dostatočnú pre kontrolu úrovne <sup>90</sup>Sr významnej z hľadiska radiačnej ochrany.



Obr. 7 Príklad kontroly zastúpenia <sup>90</sup>Sr v rôznych materiáloch pri vyraďovaní podzemných nádrží v obj. 41 JE A1, kontrolovaný pomer <sup>90</sup>Sr/<sup>137</sup>Cs 0,22

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

Práca sa zaoberá problematikou radiačnej ochrany pri vyraďovaní JZ so zreteľom na oblasť rádiologickej charakterizácie a uvoľňovania materiálov z vyraďovania do ŽP. K základným prínosom práce je návrh vhodných spôsobov využitia detekčných systémov pre zvýšenie kapacity triedenia a uvoľňovania materiálov do ŽP a pre vylepšenie metód rádiologickej charakterizácie pri stanovovaní TDRN v materiálových tokoch z vyraďovania.

V súlade s cieľmi dizertačnej práce boli v oblasti uvoľňovania materiálov do ŽP dosiahnuté nasledovné výsledky:

- Boli zhodnotené základné požiadavky radiačnej ochrany v oblasti prevádzky a vyraďovania JZ a z nich vyplývajúce požiadavky na metodiky a monitorovacie systémy pre uvoľňovanie materiálov do ŽP. Pritom boli zohľadnené a porovnávané požiadavky medzinárodných odporúčaní (ICRP, IAEA, EK), ako aj požiadavky legislatívy a prístupy k uvoľňovaniu v jednotlivých vybraných krajinách, vrátane SR.
- 2) Pre zvýšenie kapacity uvoľňovacieho monitorovania materiálov z vyraďovania uložených v štandardných 200 l sudoch bolo navrhnuté využitie prenosného monitora sudov iba s jedným HPGe detektorom ako lacnejšia alternatíva k drahým monitorovacím systémom založeným na trojici detektorov alebo jednom pohyblivom detektore. Vykonaná analýza neistoty merania takýmto monitorom poukázala na vyššiu neistotu merania v porovnaní s detekčnými systémami s viacerými detektormi, vyplývajúcu hlavne z nižšej citlivosti merania a absencie kontroly prípadného nehomogénneho rozdelenia aktivity v monitorovanom objeme. Zároveň bolo ukázané, že pri zabezpečení vhodného systému predbežného triedenia materiálov možno aj takýmto monitorom dosiahnuť neistotu merania na úrovni < 20%, čo je akceptovateľné z pohľadu uvoľňovania. Bolo tiež ukázané, že najvýznamnejšou zložkou nerovnomerné neistotv merania prípadné rozdelenie aktivitv je v monitorovanom objeme, pričom vplyv tohto efektu rastie so zväčšujúcim sa objemom vzorky. Pre ocenenie tohto efektu bol zavedený faktor maximálnej neistoty vyjadrujúci maximálne teoretické podhodnotenie v prípade výskytu bodového zdroja v meracom objeme v mieste s najnižšou účinnosťou detekcie. Vykonaná analýza založená na porovnaní monitorovacích systémov s rôznym počtom detektorov a geometrickým usporiadaním ukázala, že efekt podhodnotenia merania v dôsledku nehomogenity je významnejší u monitora s jedným detektorom, avšak niekoľkonásobné podhodnotenie je teoreticky možné aj pri monitorovacích systémoch s väčším počtom detektorov. Z tohto dôvodu je zavedenie spomínaného predbežného triediaceho merania nevyhnutnosťou aj v prípade drahých monitorovacích systémov s väčším počtom detektorov.
- 3) Pre ďalšie zvýšenie kapacity uvoľňovacieho monitorovania sypkých materiálov bol navrhnutý boxový monitor s dvojicou HPGe detektorov, využívajúci ako meraciu nádobu hranatý 600 l kontajner s výklopným dnom, urýchľujúci manipuláciu s kontrolovaným materiálom. Vykonaná analýza neistoty merania ukázala, že pri obojstrannom monitorovaní kontajnera je možné dosiahnuť

prijateľnú neistotu merania aj pomocou tohto monitora. Vzhľadom na neštandardnú geometriu merania hranatého kontajnera s relatívne veľkým objemom bol pre účel metrologického overenia navrhnutý a vyrobený overovací fantóm, vyplnený neaktívnym drveným kamením s 24 pravidelne rozmiestnenými otvormi po celej šírke kontajnera v smere osi detektorov pre vloženie overovacích etalónov v tvare tyče. Monitor bol metrologicky overený SMÚ a jeho zaradenie do procesu vyraďovania JE A1 výrazne zvýšilo uvoľňovacie kapacity.

- 4) Pre operatívne "in situ" triedenie kontaminovaných zemín bola navrhnutá metodika založená na 5 min. meraní pomocou scintilačného LaBr detektora v pravidelnej monitorovacej sieti 1 x 1 m<sup>2</sup> s MDA <sup>137</sup>Cs na úrovni okolo 100 Bq/kg. Meranie je vhodné hlavne pre operatívnu kontrolu obmedzenej plochy povrchu s cieľom potvrdiť neprítomnosť kontaminácie, resp. identifikovať miesta zvýšenej kontaminácie. Systematické porovnávacie merania uvedenej metódy s výsledkami laboratórnych meraní potvrdili dostatočnú spoľahlivosť metódy. Metóda bola aplikovaná pri operatívnom monitorovaní KZ v priebehu vyraďovacích prác pri odkopávaní podzemných nádrží a potrubných kanálov na JE A1.
- 5) Pre veľkokapacitné triedenie sypkých materiálov bol navrhnutý a vyrobený lyžicový monitor. Meranie KZ nabratej v lyžici nakladača s plochým dnom položenej na meracom stole je zabezpečené dvojicou Nal(TI) detektorov umiestnených v olovenom tienení hrúbky 6 cm v meracom ráme, na ktorý sa pokladá lyžica. Zostava dosahuje za dobu merania 30 s MDA na úrovni okolo 100 Bq/kg <sup>137</sup>Cs, pričom priebeh a výsledky merania sú indikované svetelnou signalizáciou a pre merania je postačujúci pracovník obsluhujúci nakladač. Vytriedenie kontaminovaných časti zabezpečuje, že na uvoľňovacie monitorovanie budú dodávané iba potenciálne uvoľniteľné materiály, čo znižuje množstvo potrebných uvoľňovacích meraní a vyťaženie uvoľňovacích pracovísk. Navrhnutá zostava disponuje kapacitou triedenia na úrovni desiatok ton za deň a je využívaná pre triediace merania KZ pred uvoľňovaním. V prípade KZ je zostava využívaná tiež pre vytriedenie veľmi nízkych RAO na úrovni 10 000 Bq/kg, ktorých uskladnenie sa plánuje v budúcnosti.
- 6) Pre vylepšenie rádiologickej charakterizácie a uvoľňovania betónových štruktúr stavebných objektov JZ bolo navrhnuté meranie celkovej plošnej kontaminácie <sup>137</sup>Čs v hĺbkovom profile stavebnej štruktúry na základe detekcie gama žiarenia pomocou prenosného gamaspektrometra so scintilačným LaBr detektorom kontaktne priloženým k povrchu v pravidelnej sieti merania 1 x 1 m<sup>2</sup> v súlade s odporúčaním EK, ktoré vychádza z rovnakej požiadavky pre IED kritického jedinca 10 µSv/rok, ako tomu je aj v prípade požiadaviek legislatívy SR pre bezpodmienečne uvoľňované materiály. Detekcia gama žiarenia umožňuje na rozdiel od meradiel sumárnej beta aktivity povrchovej kontaminácie merať aj aktivitu distribuovanú v hĺbke. Výskyt majoritnej časti kontaminácie v tenkej povrchovej vrstve hrúbky niekoľko mm až cm zároveň znamená dostatočnú citlivosť merania, ako aj schopnosť identifikovať prípadné miesta zvýšenej kontaminácie. Navrhnutá metóda umožňuje stanovenie CPK <sup>137</sup>Cs na úrovni 0,5 Bg/cm<sup>2</sup> pri dobe merania 100 s a bola implementovaná do procesu rádiologickej charakterizácie stavebných štruktúr pri vyraďovaní JE A1, kde predstavuje nosnú metódu pre ocenenie úrovne kontaminácie, hodnotenie účinnosti dekontaminácie a poskytuje podklad pre

deklarovanie splnenia limitov pre hmotnostnú aktivitu. Gamaspektrometrická zostava využíva matematickú kalibráciu ISOCS, ktorá bola metrologicky overená SMÚ.

V oblasti vylepšenia techník rádiologickej charakterizácie materiálov v procese vyraďovania boli navrhnuté a odskúšané postupy a metodiky pre charakterizáciu škvŕn zvýšenej kontaminácie betónových povrchov a operatívnu kontrolu obsahu rádiologicky významných TDRN <sup>90</sup>Sr, <sup>241</sup>Am založené na využití polovodičových CZT detektorov a beta spektrometra s plastickým scintilačným detektorom. Dosiahnuté výsledky možno zhrnúť nasledovne:

- 1) Pre stanovenie CPK <sup>137</sup>Cs a nedeštruktívny odhad efektívnej hĺbky kontaminácie a prípadné stanovenie <sup>241</sup>Am v mieste lokálneho maxima škvrny kontaminácie na betónových povrchoch bolo navrhnuté využitie merania s tieneným CZT detektorom umiestneným kontaktne v mieste škvrny. Odhad efektívnej hĺbky kontaminácie je založený na detekcii pomeru odozvy v píkoch 32 a 661,7 keV <sup>137</sup>Cs. Vzťah medzi pomerom odozvy 32 keV/661,7 keV a hĺbkou kontaminácie bol určený empiricky na základe kalibračných meraní série vyrobených betónových zdrojov so známou aktivitou <sup>137</sup>Cs a <sup>241</sup>Am s rôznymi hrúbkami v očakávanom rozsahu hĺbok kontaminácie. Detektor je vďaka malým rozmerom a prevádzkovej nenáročnosti vhodný aj pre merania v podmienkach kontrolovaného pásma. Porovnávacie merania s výsledkami odobraných vzoriek jadrových odvrtov poukázali na zhodu na akceptovateľnej úrovni. Operatívny nedeštruktívny odhad hĺbky kontaminácie.
- 2) Bola odskúšaná poloempirická metóda účinnostnej kalibrácie CZT detektora, založená na aproximácii malého citlivého objemu CZT detektora jedným efektívnym bodom. Metóda využíva pre stanovenie účinnosti detekcie kalibračné merania bodových zdrojov a výpočet nerozptýlených fotónov v mieste detektora od uvažovaného objemového zdroja pomocou vhodného výpočtového nástroja. Metóda je založená na predpoklade, že pomer účinnosti detekcie pre danú energiu na bodový a objemový zdroj je proporcionálny pomeru nerozptýlených fotónov v mieste detektora na jednotku aktivity od bodového a objemového zdroja. Po aplikácii zjednodušenej korekcie na závislosť účinnosti detekcie CZT detektorov. smerovú určenú experimentálnym meraním odozvy na bodové zdroje v priestore okolo detektora, bola dosiahnutá prijateľná zhoda nameraných a vypočítaných údajov aj pre nízke energie gama žiarenia, kde je efekt smerovej závislosti významnejší.
- 3) Pre ocenenie obsahu celkovej alfa aktivity kalov z vyraďovania v procese ich cementácie a ďalšieho spracovania bolo navrhnuté priame "in situ" meranie s využitím CZT detektorov. Odhad alfa aktivity je založený na stanovení aktivity <sup>241</sup>Am emitujúceho gama žiarenie 59,6 keV a jeho známeho zastúpenia vo vzťahu k izotopom Pu. Experimentálne meranie kalu pomocou tieneného CZT detektora v geometrii 200 l suda sa ukázalo ako nerealizovateľné, nakoľko o 2 až 3 rády vyšší obsah <sup>137</sup>Cs oproti <sup>241</sup>Am a priemer suda (Ø60 cm) znamenajú významný podiel rozptýleného žiarenia v oblasti nízkych energií a vyššiu MDA <sup>241</sup>Am v porovnaní s typickými aktivitami v kale. Odskúšanie merania v tenkej geometrii, predstavujúcu malú absorpčnú vrstvu potvrdilo, že priame meranie <sup>241</sup>Am v takomto kale je realizovateľné, v laboratórnych podmienkach aj bez tienenia. Pre toto

geometrické usporiadanie bola vykonaná tiež optimalizácia množstva meranej vzorky kalu zohľadňujúca pokles MDA <sup>241</sup>Am a nárast IED pracovníka od vzorky.

- 4) Boli odskúšané možnosti priameho "in situ" merania <sup>241</sup>Am pre ocenenie obsahu alfa aktivity kontaminovaných povrchov puzdier dlhodobého skladovania PDS pomocou vybraných typov CZT detektorov. Experimentálne merania vybraných fragmentov PDS zároveň poslúžili pre posúdenie fyzikálnych možností prevádzky CZT detektorov v poliach s vysokým PD. Výsledky merania aktivity <sup>137</sup>Cs pomocou CZT detektorov s využitím jednobodového poloempirického kalibračného modelu boli porovnané s výsledkami laboratórnych analýz odobraných vzoriek, pričom bola dosiahnutá akceptovateľná zhoda, ktorá zároveň potvrdila aplikovateľnosť uvedenej kalibračnej metódy. Z hodnotenia vyplynulo, že MDA <sup>241</sup>Am pri "in situ" meraní s CZT detektorom je dostatočne nízka pre kontrolu plnenia limitov pre spracovanie PDS.
- 5) Výsledky meraní beta spektrometra s tenkým <sup>90</sup>Sr detektorom s plastickým scintilátorom ukázali, že ide o operatívnu a spoľahlivú nedeštruktívnu metódu pre stanovenie aktivity a zastúpenia rádiologicky významného TDRN <sup>90</sup>Sr v "in situ" podmienkach a v odobraných vzorkách. Výsledky porovnávacích meraní rôznych druhov vzoriek s rôznou úrovňou aktivity <sup>90</sup>Sr a <sup>137</sup>Cs poukázali na veľmi dobrú zhodu s výsledkami rádiochemickej separačnej metódy. Detektor bol metrologicky overený SMÚ ako netypické meradlo aktivity <sup>90</sup>Sr pre meranie tenkých i objemovo kontaminovaných vzoriek. Napriek vyššej MDA v porovnaní so separačnou metódou je možné za kratšiu dobu a pri nižších nákladoch vykonať väčší počet meraní.

Napriek snahám medzinárodných inštitúcií o harmonizáciu legislatívnych požiadaviek v oblasti radiačnej ochrany pri nakladaní s RAO a uvoľňovaní materiálov do ŽP, nie sú prístupy jednotlivých krajín v súčasnosti jednotné. Popri snahe o budovanie lacných úložísk veľmi nízkych RAO, v niektorých krajinách predstavuje bezpodmienečné uvoľňovanie materiálov do ŽP jeden z najvýznamnejších prostriedkov pre minimalizáciu tvorby RAO spojenej s bezpečným využitím uvoľnených materiálov. Z toho naďalej vyplýva priestor pre požiadavky vývoja monitorovacích systémov pre uvoľňovanie materiálov do ŽP, disponujúcich dostatočne nízkymi detekčnými limitmi, spoľahlivosťou merania a dostatočne vysokou kapacitou monitorovania. Značné úsilie vo svete je tiež potrebné vynakladať na vývoj nedeštruktívnych "in situ" metód merania, ktoré znamenajú operatívnu dostupnosť výsledkov, ako aj redukciu individuálnych efektívnych dávok pracovníkov pri činnostiach spojených s procesom odberu, transportu a analýzy vzoriek. Vzhľadom na očakávaný nárast počtu JZ, ktoré vstúpia v budúcnosti do etapy vyraďovania možno považovať ďalší rozvoj tejto oblasti za nevyhnutný.

#### ZOZNAM VYBRANEJ LITERATÚRY

- International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the Internaltional Commission on Radiological protection. ICRP Publication 60. Oxford: Pergamon Press, 1991. ISSN 0146-6453.
- [2] International Commission on Radiological Protection. Annuals Limits on Intake of Radionuclides by Workers Based on the 1990 Recommendations. ICRP Publication 61. Oxford: Pergamon Press, 1991. ISSN 0146-6453
- [3] Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Organisation, OECD Nuclear Energy Agency, Pan American Health Organisation, 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.
- [4] 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.
- [5] Zákon z 9. septembra 2004 o mierovom využívaní atómovej energie (atómový zákon) a o zmene a doplnení niektorých zákonov. Zbierka zákonov č. 541/2004.
- [6] Zákon z 21. júna 2007 o ochrane, podpore a rozvoji verejného zdravia a o zmene a doplnení niektorých zákonov. Zbierka zákonov č. 355/2007.
- [7] Nariadenie vlády SR z 10. mája 2006 o základných bezpečnostných požiadavkách na ochranu zdravia pracovníkov a obyvateľov pre ionizujúcim žiarením. Zbierka zákonov č. 345/2006.
- [8] International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Elsevier, 2007. ISBN 978-0-7020-3048-2.
- [9] International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: General Safety Requirements Part 3 No. GSR Part 3 (Interim). Vienna: IAEA, 2011. ISBN 978-92-0-120910-8.
- [10] International Atomic Energy Agency. Status of the Decommissioning of Nuclear Facilities around the World: IAEA, 2004. ISBN 92-0-108704-7.
- [11] International Atomic Energy Agency. Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Cleaaence: Safety Guide No. RS-G-1.7. Vienna: IAEA, 2004. ISBN 92-0-109404-3.
- [12] European Commission. Radiation protection 122. Practical Use of the Concepts of Clearence and Exemption – Part I: Guidance on General Clearence Levels for Practices. EC, 2000.
- [13] Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radoactive Waste Management: Report of the Federal Republic of Germany for the Fourth Review Meeting in May 2012. Berlin: 2011.
- [14] Government of Japan. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Mangement and on the Safety of Radioactive Waste Management: National Report of Japan for the Third Review Meeting. Tokyo, 2008.
- [15] Vyhláška č. 307/2002 Sb. Státního úřadu pre jadernou bezpečnost ze dne 13. července 2002 o radiační ochraně. [online]. [cit: 13. február 2014]. Dostupné na internete: <<u>https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/7\_307\_2002\_Sb.pdf</u>>.
- [16] Smernica Rady č. 2013/59/EURATOM z 5. Decembra 2013, ktorou sa stanovujú základné bezpečnostné normy ochrany pred nebezpečenstvami vznikajúcimi v dôsledku ionizujúceho

žiarenia a ktorou sa zrušujú smernice 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom, 2003/122/Euratom

- [17] Zákon zo 17. marca 2000 o metrológii a o zmene a doplnení niektorých zákonov. Zbierka zákonov č. 142/2000.
- [18] European Commission. Radiation protection 113. Recommended radiological protection criteria for the clearance of buildings and building rubble from the dismantling of nuclear installations. EC, 2000.
- [19] POTAPOV, V.N. et al. Development of Portable Beta Spectrometer for Sr-90 Activity Measurements in Field Conditions and Its Application in Rehabilitation Activities at RRC Kurchatov Institute. Waste Mangement 2006 Simposium, February 26 – March 2, Tuscon, AZ. 2006.
- [20] ISO 11929 standards on Determination of the Detection Limit and Decision Treshold for Ionising Radiation Measurements
- [21] CURIE, L. A. Limits for Qualitative Detection and Quantitative Determination. In. Journal of Analytical Chemistry, Vol. 40, pp 586-593. 1968.
- [22] ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)
- [23] Joint Committee for Guides in Metrology Evaluation of measurement data Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100:2008.
- [24] SLANINKA, A., SLÁVIK, O., NEČAS, V. Uncertainty analysis of in-situ gamma spectrometry measurements of air cleaning filter cartridges and 200 L drums by a HPGe detector. In: Applied Radiation and Isotopes. Vol. 68, pp. 1273 – 1277. Elsevier, 2010. ISSN 0969-8043.
- [25] Canberra Industries Inc. ISOCS Calibration Software: User's Manual. Meriden: Canberra Industries, Inc. 2002.
- [26] VISIPLAN 3D ALARA planning tool. [online]. SCK-CEN: Mol, Belgium [cit: 22. marec 2014]. Dostupné na internete: <<u>www.visiplan.be</u>>.

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

#### ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

- [1] SLANINKA, A., SLÁVIK, O., NEČAS, V. Uncertainty analysis of in-situ gamma spectrometry measurements of air cleaning filter cartridges and 200 L drums by a HPGe detector. In: Applied Radiation and Isotopes, ISSN 0969-8043, 2010, vol.68, pp. 1273 – 1277.
- [2] SLANINKA, A., SLÁVIK, O., NEČAS, V. Design of checking phantom for metrological certification tests of 600 L rectangular container monitoring system. Prijaté na recenziu v časopise Applied Radiation and Isotopes, máj 2014.
- [3] SLANINKA, A., SLÁVIK, O., DULANSKÁ, S., MÁTEL, L. A comparison of <sup>90</sup>Sr determination methods using separation AnaLig® SR-01 gel and non-destructive direct beta spectrometry. Prijaté na recenziu v časopise Radiation Measurements, máj 2014.

#### ADE Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch

[4] SLÁVIK, O., SLANINKA, A., LIŠTJAK, M., KRAVÁRIK, K., PÉLY, I. New free-release capacities developed for monitoring of material at NPP A-1 and their testing. Bezpečnost jaderné energie/Bezpečnosť jadrovej energie, ročník 20 (58), číslo 9/10, 2012. Praha: ISSN 1210-7085.

- [5] SLANINKA, A., SLÁVIK, O., NEČAS, V. Container monitoring system for free release of decommissioned material – uncertainties and way of verification. Bezpečnost jaderné energie/Bezpečnosť jadrovej energie, ročník 20 (58), číslo 9/10, 2012. Praha: ISSN 1210-7085.
- [6] SLANINKA, A., SLÁVIK, O., NEČAS, V. Návrh postupu účinnostnej kalibrácie CZT Capture detektora s využitím jednobodového poloempirického modelu. Bezpečnost jaderné energie/Bezpečnosť jadrovej energie, ročník 21 (59), číslo 5/6, 2013. Praha: ISSN 1210-7085.

#### AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- [7] SLANINKA, A., SLÁVIK, O., LIŠTJAK, M. Radiation monitoring during NPP A1 decommissionig.
   In: Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Youth Conference on Energetics, Budapest, Hungary, 4-6.
   6. 2009. Budapest: IYCE2009, 2009. ISBN 978-963-420-982-9.
- [8] SLÁVIK, O., BAČA, M., SLANINKA, A., JANEČKA, S., SIROTA, J. Environmental remediation and using a new sorting and free release system for contaminated soil at NPP A1 site, Slovakia. In: Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, Leverpool, October 11-15, 2009, UK. ASME, 2009. ISBN 978-0-7918-3865-X. pp. 107.
- [9] SLÁVIK, O., LIŠTJAK, M., SLANINKA, A., MORÁVEK, J., ŠOOŠ, F. Independend monitoring of radiological impact at decommissioned NPP A1 site. In: Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, Leverpool, October 11-15, 2009, UK. ASME, 2009. ISBN 978-0-7918-3865-X. pp. 117.
- [10] SLANINKA, A., SLÁVIK, O., NEČAS, V. Uncertainty analysis of in-situ gamma spectrometry measurements of air cleaning filter cartridges and 200 L drums by a HPGe detector. In: Books of Abstracts 17<sup>th</sup> International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications, Bratislava, Slovakia 7-11. 9. 2009. Bratislava: ICRM2009, 2009. pp. 70.
- [11] SLÁVIK, O., KOŠTIAL, J., SLANINKA, A. Hodnotenie vplyvu JE v SR v rámci perodického hodnotenia bezpečnosti. In: zborník abstraktov XXXII. Dni radiační ochrany, 8-12. 11. 2010, Třeboň, Česká republika. Praha: ČVUT, 2010. ISBN 978-80-01-04647-0, pp. 66.
- [12] SLÁVIK, O., LIŠTJAK, M., SLANINKA, A. Postupy merania pri uvoľňovaní budov. In: zborník abstraktov XXXII. Dni radiační ochrany, 8.-12. 11. 2010, Třeboň, Česká republika. Praha: ČVUT, 2010. ISBN 978-80-01-04647-0, pp. 74.
- [13] ŠEVEČKA, Š., SLÁVIK, O., SLANINKA, A., FÜLÖP., M. Systém radiačnej kontroly na MO34 technologická radiačná kontrola. In: zborník abstraktov XXXII. Dni radiační ochrany, 8.-12. 11.
   2010, Třeboň, Česká republika. Praha: ČVUT, 2010. ISBN 978-80-01-04647-0, pp. 71.
- [14] SLÁVIK, O., SLANINKA, A. Application of in situ gamma spectrometry for sorting measurement at NPP A1 site, Slovakia. In: Books of abstraacts of Interantional Simposium on In Situ Nuclear Metrology as a Tool for Radioecology, Dubna, Russia, 20-23 October 2010. Dubna: JINR, 2010. ISBN 978-5-9530-0263-9. pp. 86.
- [15] SLÁVIK, O., SLANINKA, A., LIŠTJAK, M., KRAVÁRIK, K., PÉLY, I. New free-release and sorting monitors developed for NPP A-1 decommissionig, Slovakia. In: Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, Reims, France, September 25-29, 2011. New York: ASME, 2011.
- [16] SLANINKA, A., SLÁVIK, O., NEČAS, V. Uncertainty analysis of activity measurement of new monitoring system for free-release for NPP A-1 desommissioning, Slovakia. In: Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, Reims, France, September 25-29, 2011. New York: ASME, 2011.

- [17] SLANINKA, A., SLÁVIK, O., MÍCHAL, V. Ecological aspects of nuclear facility decommissioning.
   In: Proceeding of 41<sup>èmes</sup> Journées des Actinides, 7.-12.4.2011. Stará Lesná, Slovakia.
   Bratislava: SFS, 2011. ISBN 978-80-970625-1-4. pp. 81-82.
- [18] SLANINKA, A., SLÁVIK, O., LIŠTJAK, M. Shovel monitor for sorting of loose decommissioning materials. In: Proceedings of ISOE European Symposium, Prague, 20-22 June 2012., Prague, Czech republic. [online]. ISOE, 2012 [cit. 19. Február 2014]. Dostupné na internete: <<u>http://www.isoe-network.net/index.php/publications-mainmenu-88/isoe-news/cat\_view/559prague-czech-republic-june-2012.html</u>>.
- [19] SLANINKA, A., SLÁVIK, O., LIŠTJAK, M. Radiation monitoring systems at operated and decommissioned NPPs – development and references.. In: Proccedings of ISOE European Symposium, Prague, 20-22 June 2012., Prague, Czech republic. [online]. ISOE, 2012 [cit. 19. Február 2014]. Dostupné na internete: <<u>http://www.isoe-network.net/index.php/publicationsmainmenu-88/isoe-news/cat\_view/559-prague-czech-republic-june-2012.html>.</u>
- [20] SLÁVIK, O., SLANINKA, A., DULANSKÁ, S. Expresné stanovenie <sup>90</sup>Sr beta spektrometrom a porovnanie so štandardnou separačnou metódou. In: zborník abstraktov XXXIV. Dny radiační ochrany, 5-9. 11. 2012, Třeboň, Jižní Čechy, Česká republika. Praha: ČVUT, 2012. ISBN 978-80-01-05140-5.
- [21] SLÁVIK, O., LIŠTJAK, M., BEŇA, J., JADRNÝ, R., SLANINKA, A. Charakterizácia sypkých RAO na JE V1 a A1. In: zborník abstraktov XXXIV. Dny radiační ochrany, 5-9. 11. 2012, Tŕeboň, Jižní Čechy, Česká republika. Praha: ČVUT, 2012. ISBN 978-80-01-05140-5.
- [22] SLANINKA, A., SLÁVIK, O. Characterisation of buildings concrete surfaces for decontamination and free-release at NPP A-1, Slovakia. Workshop on radiological characterisation for decommissioning, 17–19. 04. 2012, Studsvik, Sweden. [online]. OECD-NEA, 2012. [cit: 19. február 2014]. Dostupné na internete: <<u>http://www.oecd-nea.org/rwm/wpdd/rcdworkshop/index.html</u>>.
- [23] SLÁVIK, O., SLANINKA, A., LIŠTJAK, M., PEKÁR, A., GALBIČKA, I. Free release of contaminated underground tanks at NPP A1. In: Proceeding of International conference on Estern and Central Europe Decommissioning, 18-20. 06. 2013, Trnava, Slovakia. ECED2013, ISBN 978-80-969943-9-7. [CD-ROM]
- [24] SLÁVIK, O., SLANINKA, A. Estimation of CZT detection efficiency by point model and respective dose rate calculations. In: Proceedings of the 15th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, Brussels, Belgium, September 8-12, 2013. New York: ASME, 2013.
- [25] SLANINKA, A., SLÁVIK, O., Estimation of CZT contamination depth on concrete surfaces by collimated CZT detector. In: Proceedings of the 15th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, Brussels, Belgium, September 8-12, 2013. New York: ASME, 2013.

#### AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- [26] SLANINKA, A., SLÁVIK, O., PRÍBOJOVÁ, M., LIŠTJAK, M. Využitie spektrometra InSpector 1000 s LaBr sondou pre in situ monitorovanie vzduchotechnických filtrov z JEZ. In: zborník abstraktov XXX. Dni radiačnej ochrany, Liptovský Ján, Low Tatras, Slovakia, 10.-14. 11. 2008. ISBN 978-80-89384-01-3, pp. 138-141.
- [27] SLANINKA, A., SLÁVIK, O., PRÍBOJOVÁ, M. Využitie bioindikátorov na mapovanie kontaminácie v areáli JE A1. In: XI. Banskoštiavnické dni, zborník referátov, Banská Štiavnica, Slovenská republika, 7-9. 10. 2009. Banská Štiavnica: 2009.

- [28] SLANINKA, A., SLÁVIK, O., NEČAS, V. Kontajnerový monitorovací systém pre uvoľňovanie materiálov do ŽP – neistota merania a spôsob overenia. In: zborník abstraktov XXXIII. Dni radiačnej ochrany, 7-11. 11. 2011, Štiavnické vrchy - Vyhne, Slovenská republika. ISBN 978-80-89384-04-4.
- [29] SLÁVIK, O., SLANINKA, A., LIŠTJAK, M. Nové uvoľňovacie kapacity pre monitorovanie materiálov na JE A1. In: zborník abstraktov XXXIII. Dni radiačnej ochrany, 7-11. 11. 2011, Štiavnické vrchy - Vyhne, Slovenská republika. ISBN 978-80-89384-04-4.
- [30] SLANINKA, A., LIŠTJAK, M. Operatívny lyžicový triediaci monitor kontaminovaných zemín odskúšanie a jeho výsledky. In: zborník abstraktov XXXIII. Dni radiačnej ochrany, 7-11. 11. 2011, Štiavnické vrchy Vyhne, Slovenská republika. ISBN 978-80-89384-04-4.
- [31] LIŠTJAK, M., GÖNDOR, P., SLANINKA, A., SLÁVIK, O. Popis riadiaceho a vyhodnocovacieho SW operatívneho lyžicového monitora pre triedenie KZ. In: zborník abstraktov XXXIII. Dni radiačnej ochrany, 7-11. 11. 2011, Štiavnické vrchy - Vyhne, Slovenská republika. ISBN 978-80-89384-04-4.

#### SUMMARY

# APPLICATION OF INNOVATIVE DETECTION SYSTEMS DURING NUCLEAR INSTALLATIONS DECOMMISSIONING

Unconditional free release of the materials into the environment is the one of main approaches for radioactive waste minimization and repeated safe use of materials. Considering the generally low levels of free release limits and their decreasing trend referring to increasing of the safety requirements in field of radiation protection there is the necessity to develop the selective and sensitive monitoring systems with low detection limits and high productivity of measurements.

Thesis deals with the design of innovative using of detection systems for improvement of the free release process effectiveness and radiological characterisation techniques within the nuclear installations decommissioning.

A portable drum monitoring system with single stable HPGe detector for free release measurement was proposed. Performed uncertainty measurement analysis as well as experimental comparison measurements between single scintillation LaBr detector and drum monitor with three HPGe detectors demonstrated sufficient metrological capability for the assumption of appropriate preliminary sorting monitoring. This kind of monitoring is necessary also for expensive monitoring systems with more detectors in order to reducing the uncertainty of measurements arising from uneven activity distribution.

For next increase of free release capacity of loose materials the monitoring system with large volume counting geometry of 600 I rectangular container was designed and tested. Metrological certification testing procedure including the verification container phantom with apertures for reference rod sources inputting was designed and proposed, as well.

The shovel monitor of soil with a pair of Nal(TI) detectors for quick large capacity sorting monitoring on free release limits levels was designed and tested with aim to decrease the loading of free release monitoring systems. Monitoring procedure of building concrete structure clearance based on the measurement of total activity per unit of surface area by means of portable scintillation gamma spectrometry assembly was proposed, evaluated and tested. The measurement with shielded CZT detectors on places of elevated activity for non-destructive estimation of contamination depth was proposed and tested.

Applications of CZT detectors for radiological characterisation technique improvement with aim to estimate the alpha activity content in particular radioactive waste streams on the basis of direct "in situ" measurements of <sup>241</sup>Am at high radiation background caused by dominant <sup>137</sup>Cs were proposed and tested. The semiempirical efficiency calibration method based on single point of CZT detector was successfully tested and applied. Theoretical calculations as well as the experimental measurements proved the capability to detect 59,6 keV gamma ray of <sup>241</sup>Am on high radiation background of <sup>137</sup>Cs at thin counting geometry of sludge suspension in Petri dish and iron pipe surfaces. Sensitivity of the method is sufficient for operational checking of total alpha activity storage limit and at high background radiation.

The performance of the portable beta spectrometer with plastic scintillation detector for quick operative non-destructive <sup>90</sup>Sr content estimation was successfully tested. The results of comparison measurements were in good agreement with radiochemistry separation method.