

**JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH**

**Zdravotně sociální fakulta**

**OPTIMALIZACE MONITOROVÁNÍ SLOŽEK ŽIVOTNÍHO  
PROSTŘEDÍ V LABORATOŘÍCH SÚJB  
ZA RADIAČNÍ MIMOŘÁDNÉ SITUACE.**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Irena Macháčová**

Vedoucí práce: Ing. Jan Matzner

**2007**

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci jsem vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové, a to v nezkrácené podobě – v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných zdravotně sociální fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

28.5.2007

.....

podpis studenta

### **Poděkování**

Vedoucímu práce Ing. Janu Matznerovi děkuji za průběžné metodické vedení, konzultace a odbornou pomoc v průběhu mé práce.

Paní Ing. Evě Šindelkové, CSc. děkuji za poskytnutí podrobných údajů o činnosti laboratoře Regionálního centra SÚJB v Č. Budějovicích.

## **Obsah**

1.	Úvod.....	5
2.	Legislativní požadavky .....	5
2.1	Atomový zákon.....	5
2.2	Vyhláška č. 319/2002 Sb., ve znění vyhlášky č. 27/2006 Sb. ....	6
2.3	Vyhláška č. 307/2002 Sb., ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb. ....	13
3.	Princip polovodičové spektrometrie gama .....	14
3.1	Polovodičové detektory .....	15
3.2	Elektronická trasa .....	17
3.3	Mnohakanálové analyzátory .....	18
3.4	Energetická kalibrace detektoru.....	18
3.5	Kalibrace účinnosti detektoru .....	20
4.	Přístrojové a programové vybavení spektrometrické laboratoře .....	22
4.1	Polovodičové detektory .....	22
4.2	Stínění detektorů .....	22
4.3	Elektronické trasy .....	24
4.4	Mnokanálové analyzátory .....	25
4.5	Doplňující hardware vybavení.....	26
4.6	Programové vybavení .....	26
5.	Analýza parametrů ovlivňujících provoz spektrometrické laboratoře.....	28
5.1	Radionuklidové složení.....	29
5.2	Aerosoly.....	29
5.3	Režim odběru vzorků aerosolů .....	34
5.4	Ostatní vzorky složek životního prostředí .....	38
5.5	Popis používaných geometrií detekce při měření vzorků.....	39
5.6	Volba vhodné geometrie .....	41
5.7	Volba doby měření jednotlivých vzorků životního prostředí .....	42
6.	Podrobný popis provozu laboratoře.....	46
6.1	Zpracování vzorku .....	47
6.2	Přenos vzorků do měřicí místnosti a výměna vzorku na detektorech.....	48
6.3	Měření spektra .....	49

6.4	Přenos spektra do PC, vyhodnocení spektra.....	49
6.5	Verifikace výsledku stanovení radionuklidů v měřeném vzorku .....	53
6.6	Zápis výsledku do databáze AŽP a přenos dat do centrální laboratoře .....	53
7.	Návrh optimálního režimu provozu spektrometrické laboratoře .....	55
7.1	Souhrn parametrů ovlivňujících provoz laboratoře .....	55
7.2	Návrh optimálního režimu provozu laboratoře – varianta A.....	56
7.3	Návrh optimálního režimu provozu laboratoře – varianta B .....	58
7.4	Další možné varianty režimu provozu laboratoře.....	58
7.5	Personální dispozice laboratoře SÚJB RC Č. Budějovice.....	60
8.	Závěr .....	64
9.	Seznam literatury .....	66
10.	Klíčová slova: .....	67
11.	Přílohy.....	68
11.1	Příloha 1 – Průvodky vzorků při radiační mimořádné situaci .....	68
11.2	Příloha 2 – Databáze Access pro radiační mimořádnou situaci.....	71

## 1. Úvod

V souladu se zadáním diplomové práce bude jejím hlavním cílem „analyzovat podrobně dispozici laboratoře spektrometrie gama v SÚJB RC České Budějovice, za účelem návrhu optimálního režimu provozu laboratoře za radiační mimořádní situace tak, aby denní počet změřených vzorků byl co největší a zároveň byly splněny požadavky na citlivost měření“.

Vlastní analýza problematiky předpokládá znalost jednak požadavků kladených na jednotlivá měření, jednak nástrojů, jež budou použity k dosažení stanoveného cíle a jež jsou nedílně tvořeny existujícím přístrojovým, metodickým, programovým a personálním vybavením laboratoře. Výsledky analýzy pak budou využity k návrhu konkrétního a v daných podmínkách optimalizovaného provozu laboratoře.

Rovněž v souladu se zadáním práce bude v jejím závěru ověřována následující hypotéza: „Optimální režim provozu laboratoře je dán technickými parametry jednotlivých detektorů a danými geometriemi měření uvažovaných vzorků životního prostředí“.

## 2. Legislativní požadavky

### 2.1 Atomový zákon

Zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů (dále jen „atomový zákon“) definuje v § 2 pod písm. m) **radiační mimořádnou situaci** jako situaci, která následuje po radiační havárii nebo po takové radiační nehodě nebo po takovém zjištění zvýšené úrovně radioaktivity nebo ozáření, které vyžadují naléhavá opatření na ochranu fyzických osob.

Podle § 2 písm. k) atomového zákona je **radiační nehoda** událost, která má za následek nepřipustné uvolnění radioaktivních látek nebo ionizujícího záření nebo nepřipustné ozáření fyzických osob.

Podle § 2 písm. l) atomového zákona je *radiační havárie* taková **radiační nehoda, jejichž následky vyžadují naléhavá opatření na ochranu obyvatelstva a životního prostředí.**

Z uvedených zákonných definic vyplývá, že v případě radiační mimořádné situace je nutné zavést řadu naléhavých opatření za účelem ochrany fyzických osob před účinky záření. Tato opatření nelze zavádět bez podrobné znalosti situace a nástrojem k získání všech potřebných informací je tzv. celostátní radiační monitorovací síť, jejíž činnost podle § 3 odst. 1 písm. l) řídí Státní úřad pro jadernou bezpečnost. Funkci a organizaci celostátní radiační monitorovací sítě pak upřesňuje prováděcí předpis k atomovému zákonu, jímž je vyhláška č. 319/2002 Sb., ve znění vyhlášky č. 27/2006 Sb.

## **2.2 Vyhláška č. 319/2002 Sb., ve znění vyhlášky č. 27/2006 Sb.**

Vyhláška č. 319/2002 Sb., ve znění vyhlášky č. 27/2002 Sb. (dále jen „vyhláška“) především v § 2 definuje používané pojmy, z nichž jsou pro tuto práci nejdůležitější:

**Monitorovací síť** je soustava měřících míst a systém prostředků odborně, technicky a personálně vybavených a organizačně propojených pro potřeby monitorování radiační situace na území České republiky.

**Monitorováním radiační situace** se rozumí měření veličin a hodnocení výsledků měření veličin pro účely usměrňování ozáření.

**Obvyklou radiační situací** je situace s výjimkou radiační mimořádné situace.

Vyhláška dále vyjmenovává tzv. *stálé* a *pohotovostní* složky monitorovací sítě.

**Stálými složkami** monitorovací sítě jsou:

- a) Síť včasného zjištění,
- b) síť termoluminiscenčních dozimetřů,
- c) měřící místa kontaminace ovzduší, potravin a vody a měřící místa na hraničních přechodech,

- d) mobilní a letecké skupiny,
- e) laboratorní skupiny,
- f) centrální laboratoř monitorovací sítě,
- g) meteorologická služba.

**Pohotovostními složkami** monitorovací sítě jsou:

- a) Mobilní skupiny,
- b) laboratorní skupiny,
- c) letecké skupiny a letecké prostředky,
- d) měřicí místa kontaminace vody, potravin a měřicí místa na hraničních přechodech,
- e) měřicí místa na uzávěrech, kterými jsou prostředky pro získávání údajů o dávkových příkonech a radionuklidové kontaminaci osob, dopravních prostředků, předmětů a materiálu na hranicích uzavřených oblastí a v okolí místa radiační havárie.

Laboratorní skupiny jsou útvary, které zajišťují odběry vzorků ze životního prostředí, provádějí spektrometrické, popřípadě radiochemické analýzy vzorků životního prostředí s cílem stanovit v nich aktivity radionuklidů.

V případě radiační mimořádné situace se provádí sběr kontaminovaných vzorků životního prostředí s následnou kvalitativní a kvantitativní analýzou na obsah umělých radionuklidů z důvodů:

- zjištění povrchové kontaminace pro přijetí včasných opatření v případě radiační mimořádné situace (v časně fázi havárie),
- přijetí následných opatření v případě radiační mimořádné situace (v pozdní fázi havárie).

Získání a zajištění reprezentativního vzorku vyžaduje provedení komplexu činností, počínaje upřesněním účelu sběru vzorku přes získání všech dostupných relevantních

údajů o vzorku, výběrem vhodných technických prostředků pro odběr až po vlastní odběr vzorku a transport do příslušné laboratoře. Samozřejmostí je řádné vedení dokumentace k danému vzorku.

Laboratorní skupiny postupují při odběru podle schválených metodik a odebírají následující vzorky životního prostředí:

- půda – povrchová vrstva (0 – 20 cm)
- voda povrchová a pitná
- potraviny – mléko, zelenina, ovoce, maso

Laboratorní skupiny jsou vybaveny přístroji na detekci dávkového příkonu a detekci povrchové kontaminace a GPS navigátorem. Pro odběry vzorků se používá spotřební materiál jako jsou nůž, nůžky, polní lopatka, metr, pravítko, peán, pipeta. Vzorky se ukládají do igelitových sáčků nebo PET lahví různého objemu, musí se dobře uzavřít, polepit samolepicími štítky a řádně popsat.

Při odběru se musí dodržovat veškeré zásady osobní ochrany tj. provádět odběr v ochranných oblecích a mít nastaveny na operativních dozimetrech příslušné hodnoty alarmu. Měřicí přístroje musí být zabaleny v igelitovém sáčku. Po zvolení místa odběru se změří dávkový příkon 1m nad odběrovým místem a hodnota se zaznamená do příslušného formuláře, určí se přesně zeměpisná poloha pomocí GPS, zapíše se datum a čas odběru. Pomůcky použité k odběru se musí dekontaminovat – opláchnout čistou vodou a otřít do papírové utěrky. Mezi jednotlivými odběry se pomůcky převážejí v igelitových sáčcích, aby nedošlo ke kontaminaci vozidla

#### ***Půda – povrchová vrstva (0 – 20 cm)***

Místo pro odběr půdy se volí tak aby se mohlo provést měření metodou spektrometrie in situ tj. místo nezastíněné stromy, keři nebo budovami, nejlépe s travnatým povrchem a sklonem ne větší než 3° s půdou propustnou pro vodu, ne však písčitou.

Pro odběr půdy se vymezí plocha 20cm x 20cm, popř. menší podle použitého odběrového zařízení. Je-li plocha menší, spojí se více odběrů z daného místa. Porost se odebere z celé plochy, kdy první vrstva se odebírá do hloubky 5 cm (tj. 0 cm – 5 cm),



druhá vrstva do hloubky 20 cm (tj. 5 cm – 20 cm). Všechny odebrané vzorky se uloží do igelitových sáčků a příslušně označí. Značení vzorků se zaznamená též do formuláře. Pokud je na odběrové ploše sníh, musí se odhrnout. Pokud sníh napadl ještě před depozicí, je třeba odebrat i vzorek sněhu do PET láhve pro další měření.

Vzorky a řádně vyplněný formulář (včetně zeměpisné polohy a dávkového příkonu) se předají analýze do určené spektrometrické laboratoře.

### ***Voda***

Určí se místo odběru, odkud se bude voda odebírat. Je několik možností:

- **Voda ze studní** - nesmí se odebírat hned u okraje,
- **povrchová voda (řeka, potok, rybník ..)** - neodebírat hned u břehu a v místech, kde dochází k velkým turbulencím; nerozdmýchat případné sedimenty,
- **pitná voda** – je možnost odběru kdekoli v distribučním systému, ale upřednostňuje se zařízení, kde se pitná voda zpracovává.

Voda se odebere do PE lahvi (1litr). Před vlastním odběrem se má odběrová nádoba několikrát odebíranou vodou vypláchnout. Pokud by byla doba mezi odběrem a měřením delší než 24 hod, je nutné přidat do vody kyselinu dusičnou v množství 10 ml HNO<sub>3</sub> na 1 l vody.

Jednoznačně popsané vzorky a řádně vyplněný formulář (včetně zeměpisné polohy a dávkového příkonu u vzorků povrchové a studniční vody) se musí co nejdříve předat k analýze do určené spektrometrické laboratoře.

### ***Potraviny (mimo mléka)***

- **Rostlinné (mimo obchodní sítě) a houby** - odebírají se části rostliny (určené ke konzumaci – ovoce, zelenina, obilí, lesní plody) přímo na poli či v lese o minimální hmotnosti 1,5 kg,
- **živočišné (mimo obchodní sítě)** - odebírá se vzorek libového masa o minimální hmotnosti 1,5 kg přímo na jatkách či u soukromníka je třeba zapsat odkud přesně zvíře pochází (obec, kraj),

- **potraviny z obchodní sítě** - odebírají se požadované vzorky potravin o minimálním množství 1,5 kg resp. 1,5 l. V případě balené potraviny musí být obal nepoškozený. Popis vzorku musí navíc obsahovat:
  - a) identifikační údaj provozovatele potravinářského podniku,
  - b) identifikační údaj výrobce a země původu,
  - c) název potraviny, pod nímž je uváděna do oběhu,
  - d) údaj o množství potraviny v balení (objem, hmotnost nebo počet kusů),
  - e) údaj o šarži
  - f) datum výroby, je-li uvedeno,
  - g) údaje o odběru vzorku,
  - h) datum a čas odběru vzorku,

Opět jednoznačně popsané vzorky a řádně vyplněný formulář (včetně zeměpisné polohy a dávkového příkonu u vzorků mimo obchodní sítě) se musí co nejdříve předat k analýze do určené spektrometrické laboratoře.

### ***Mléko***

Mléko se odebírá přímo:

- **V mlékárně** - laboratorní skupina zapíše přesnou adresu a pokud možno oblast svozu,
- **u chovatele** – je třeba zapsat přesnou adresu včetně jména majitele, zjistit, jak byl příslušný skot krměn od radiační nehody . Vzorky mléka je třeba co nejdříve zchladit a spolu s řádně vyplněnými formuláři (včetně zeměpisné polohy a dávkového příkonu u vzorků mimo obchodní sítě) předat do laboratoře k měření

Centrální laboratoř pak koordinuje měření vzorků odebraných laboratorními a mobilními skupinami a zajišťuje vybraná měření těchto vzorků, dále zajišťuje hodnocení výsledků měření s cílem poskytnout podklady pro rozhodování o opatřeních vedoucích ke snížení nebo odvrácení ozáření osob a která též koordinuje a zajišťuje měření vnitřní kontaminace osob.

Podrobnosti pro monitorování za obvyklé i mimořádné radiační situace uvádí vyhláška č. 319/2002 Sb., ve znění vyhlášky č. 27/2002 Sb v příloze v části A. Jsou zde

specifikovány monitorované položky, měřená veličina, počet odběrových míst, četnost měření a požadovaná citlivost měření pro jednotlivé složky radiační monitorovací sítě. Požadavky týkající se laboratorních skupin jsou souhrnně uvedeny v tab. 1.

**Minimální detekovatelná aktivita MDA** je pak definována v Části B Přílohy vyhlášky č. 319/2002 Sb., ve znění vyhlášky č. 27/2006 Sb. Na hladině spolehlivosti 95% (tj. hladina významnosti 5%) je pro energii  $E$  záření gama pro stanovení aktivity metodou spektrometrie gama MDA dána výrazem

$$MDA = \frac{2,71 + 3,29 \sqrt{\frac{p}{2m} \left( \frac{p}{2m} + 1 \right) B + \left( P + \frac{t}{t_p} s_p^2 \right) \frac{t}{t_p}}}{\eta \cdot \gamma \cdot t \cdot V},$$

kde uvedené symboly mají tyto významy:

$MDA$  minimální detekovatelná aktivita v (Bq), resp. minimální detekovatelná hmotnostní aktivita (Bq/kg), resp. minimální detekovatelná objemová aktivita (Bq/l, Bq/m<sup>3</sup>),

$p$  počet kanálů v oblasti pro stanovení plochy píku,

$m$  počet kanálů na každé straně píku ke stanovení hodnoty pozadí  $B$ ,

$B$  obsah v  $m$ -kanálech vlevo a vpravo od oblasti píku,

$P$  plocha píku interferujícího v pozadí na energii  $E$ , vztahena k době měření vzorku

$s_p$  směrodatná odchylka stanovení plochy píku  $P$ ,

$\eta$  účinnost detekce fotonů o energii  $E$ ,

$\gamma$  zastoupení fotonů o energii  $E$  při přeměně radionuklidu,

$t$  doba měření vzorku,

$V$  velikost vzorku (např. hmotnost, objem apod.),

$t_p$  doba měření pozadí

Tab.1. Požadavky na monitorování prováděné laboratorními skupinami za mimořádné radiační situace

Položka	Měřená veličina	Počet míst	Četnost	Citlivost měření
<b>Složky životního prostředí</b>				
Aerosoly	objemová nebo hmotnostní aktivita radionuklidů	7 a dále dle pokynů Úřadu	Minimálně denně, pokud nebude stanoveno Úřadem jinak, kontinuální odběr	MDA < 0,1 Bq/m <sup>3</sup> <sup>137</sup> Cs <sup>1)</sup> MDA < 0,1 Bq/m <sup>3</sup> <sup>131</sup> I <sup>1)</sup>
Plynné formy jódu	Objemová aktivita <sup>131</sup> I	7 a dále dle pokynů Úřadu	Minimálně denně, pokud nebude stanoveno Úřadem jinak, kontinuální odběr	MDA < 0,1 Bq/m <sup>3</sup> <sup>131</sup> I <sup>1)</sup>
Spad včetně dešťové vody a sněhu	Plošná a objemová aktivita radionuklidů	7 a dále dle pokynů Úřadu	Minimálně týdně, pokud nebude stanoveno Úřadem jinak, kontinuální odběr	V závislosti na radiační mimořádné situaci
Půda a porost	Plošná aktivita radionuklidů	7 a dále dle pokynů Úřadu	Bude stanoveno Úřadem dle situace, bodový odběr	V závislosti na radiační mimořádné situaci
Porost, sněh	Plošná aktivita radionuklidů	7 a dále dle pokynů Úřadu	Minimálně týdně, pokud nebude stanoveno Úřadem jinak, bodový odběr	V závislosti na radiační mimořádné situaci
Povrchová voda	Objemová aktivita radionuklidů	7 a dále dle pokynů Úřadu	Minimálně týdně, pokud nebude stanoveno Úřadem jinak, bodový odběr	V souladu s vyhláškou č.307/2002Sb.
Pitná voda	Objemová aktivita radionuklidů	7 a dále dle pokynů Úřadu	Minimálně týdně, pokud nebude stanoveno Úřadem jinak, bodový odběr	V souladu s vyhláškou č.307/2002Sb.

1) Uvedené hodnoty MDA pro <sup>131</sup>I a <sup>137</sup>Cs odpovídají požadavku stanovit objemovou aktivitu jednotlivých radionuklidů běžně zjištěných pomocí spektrometrie gama (s energií emitovaných fotonů větší než 100keV a se zastoupením fotonů pro daný radionuklid charakteristických energií větším než 10%), která způsobí v důsledku inhalace úvazek efektivní dávky (viz § 3 vyhl. č. 307/2002 Sb., ve znění vyhl. č. 499/2006 Sb.) ne větší než 1μSv za měsíc (viz § 18 vyhl. č.307/2002 Sb., ve znění vyhl. č. 499/2006Sb.).

Tab.1. Požadavky na monitorování prováděné laboratorními skupinami za mimořádné radiační situace (pokračování)

Položka	Měřená veličina	Počet míst	Četnost	Citlivost měření
<b>Složky potravních řetězců</b>				
Mléko	Objemová aktivita radionuklidů	15 a dále dle pokynů Úřadu	Minimálně denně, pokud nebude stanoveno Úřadem jinak, bodový odběr	V souladu s vyhláškou č.307/2002Sb.
Smíšená strava	Hmotnostní aktivita radionuklidů	15 a dále dle pokynů Úřadu	Minimálně denně, pokud nebude stanoveno Úřadem jinak, bodový odběr pro jednotlivé komodity	V souladu s vyhláškou č.307/2002Sb.

### 2.3 Vyhláška č. 307/2002 Sb., ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb.

Požadavek na citlivost měření specifikovaný v Tab.1 „V souladu s vyhláškou č.307/2002Sb.“ znamená odkaz na Tab. č. 4 přílohy č. 8 jmenované vyhlášky, jež stanovuje nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace potravin pro radiační mimořádné situace. Obsah uvedené tabulky je uveden v tab.2.

V současné době funkci centrální laboratoře zajišťuje Státní ústav radiační ochrany. Jedinou laboratorní skupinu ve Státním úřadu pro jadernou bezpečnost zajišťuje personálně i přístrojově Regionální centrum v Českých Budějovicích.

Výše uvedené legislativní požadavky nám tudíž základním způsobem vymezují rámec i obsah této práce: V souladu se zadáním práce bude jejím hlavním předmětem analýza činnosti laboratorní skupiny Regionálního centra v Českých Budějovicích za mimořádné radiační situace, jako součásti radiační monitorovací sítě, s cílem optimalizovat tuto činnost tak, aby počet změřených vzorků byl co největší a celý proces monitorování plně odpovídal požadavkům předpisů.

Tab.2. Nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace potravin pro radiační mimořádné situace

Radionuklid	Nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace potravin pro radiační mimořádné situace [Bq/kg] nebo [Bq/l]				
	potraviny pro kojeneckou výživu	mléko a mléčné výrobky	pitná voda a tekuté potraviny	potraviny uvedené v tabulce č. 6	ostatní potraviny
Izotopy stroncia, zejména Sr-90	75	125	125	7500	750
Izotopy jódu, zejména I-131	150	500	500	20000	2000
Izotopy plutonia a transuranových prvků, emitující záření alfa, zejména Pu-239 a Am-241	1	20	20	800	80
Všechny ostatní nuklidy s poločasem přeměny delším než 10 dní, zejména Cs-134 a Cs-137, kromě H-3, C-14, K-40.	400	1000	1000	12500	1250

Pozn. Nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace potravin se u koncentrovaných nebo sušených potravin vztahují na výsledný produkt, který je určen pro přímou konzumaci (tj. např. po zředění).

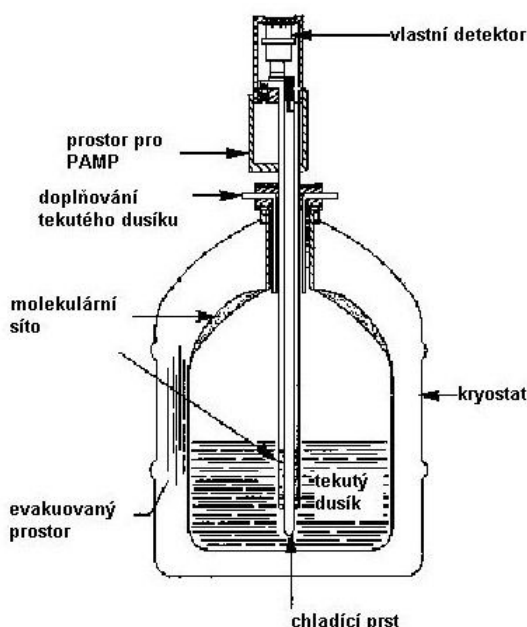
### 3. Princip polovodičové spektrometrie gama

Spektrometrií gama je obecně nazývána metoda detekce fotonů gama záření s následným rozdělením odezvy detektoru – počtu nebo četnosti impulsů – podle energie fotonů zachycených detektorem a tím možnost spektrálního zobrazení odezvy. Na základě znalosti energií fotonů uvolňovaných při přeměně jednotlivých radionuklidů lze pak určovat nejen které radionuklidy se ve vyšetřovaném vzorku nacházejí, ale analýzou spektra v dané energetické oblasti odpovídající konkrétnímu radionuklidu pak lze stanovovat i aktivitu tohoto radionuklidu.

Podle druhu použitého detektoru k detekci fotonů gama pak rozdělujeme spektrometrii gama na scintilační a polovodičovou spektrometrii gama. Scintilační spektrometrie využívá jako detektoru scintilační detektor, nejčastěji s krystalem NaI(Tl). Polovodičová spektrometrii gama pak využívá vlastností detektoru, jehož základem je krystal čistého křemíku nebo germania. Germaniové detektory se obvykle značí HPGe („High Purity“). Laboratoř, jejíž provoz máme optimalizovat, je vybavena HPGe detektory a proto v další části popíšeme základní principy polovodičové spektrometrie gama.

### 3.1 Polovodičové detektory

Schéma polovodičového detektoru v tzv. koaxiálním uspořádání je uvedeno na obr. 1.



Obr. 1. Schéma polovodičového detektoru.

Při zachycení fotonu v polovodičovém materiálu germania dochází ke tvorbě nosičů náboje - elektronů ve vodivostním pásu a děr ve valenčním pásu polovodiče. Při bipolárním – podobném diodě – uspořádání detektoru a napěťovém spádu na elektrodách pak dojde ke vzniku elektrického impulsu na nábojově citlivém předzesilovači PAMP, jenž je součástí detektoru.

Celý detektor je i s předzesilovačem (PAMP) vakuově zapouzdřen a chlazen tekutým dusíkem ( $-196^{\circ}\text{C}$ ), aby se zamezilo vzniku elektrického náboje v důsledku přijaté tepelné energie z okolí detektoru.

Spektrometrie gama je založena na následujících dvou vlastnostech detektoru:

- a) Počet uvolněných nosičů nábojů a tím i výška impulsu jsou úměrné energii absorbovaného fotonu.
- b) Aktivita zdroje je dána počtem emitovaných fotonů za jednotku času a musí být tedy úměrná počtu detekovaných impulzů za jednotku času (tzv. četnosti impulzů).

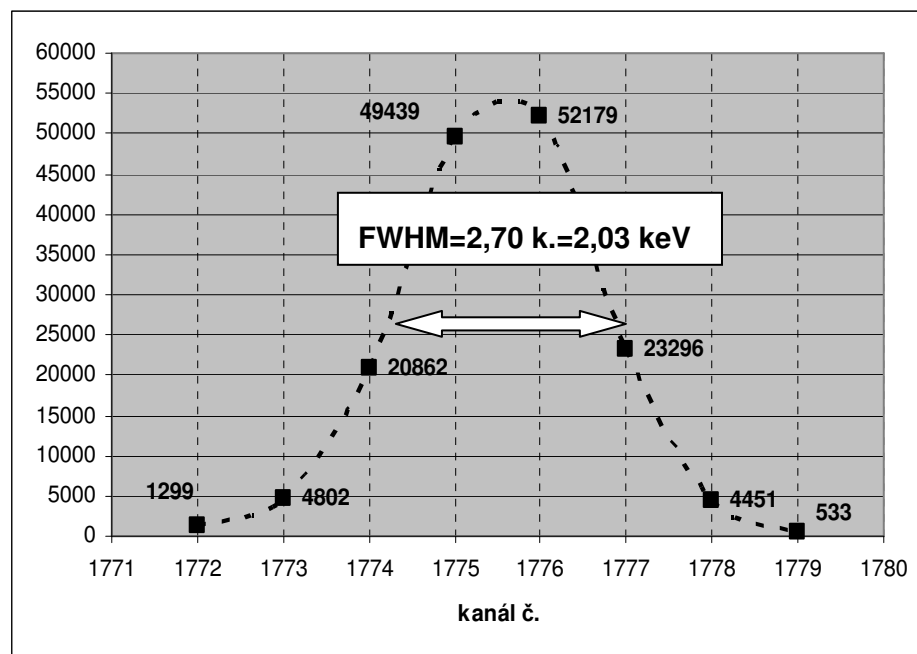
Koaxiální polovodičové HPGe detektory umožňují detekci fotonů o energii 50 keV až 10 MeV.

Základními parametry charakterizujícími vlastnosti detektoru patří rozlišení detektoru a účinnost detektoru. Rozlišení je konvenčně udáváno v keV jako změřená šíře píku  $^{60}\text{Co}$  energie 1332,5 keV v polovině jeho výšky a označuje se FWHM. Detektory s velkým rozlišením – malou hodnotou FWHM – umožňují detekovat i fotony blízkých energií a naopak. Za kvalitní HPGe detektory lze považovat detektory s rozlišením menším než 2,2 keV, spodní dosažitelná mez je cca 1,8 keV.

Na obr. 2 je uvedena odezva konkrétního HPGe detektoru D1 (viz část 4) na fotony energie 1332,5 keV izotopu  $^{60}\text{Co}$ , spektrum bylo sbíráno 80000 s. Hodnota rozlišení FWHM je 2,70 kanálů, což při použité energetické kalibraci odpovídá 2,03 keV.

Účinnost detektoru pak vyjadřuje, kolik fotonů je detektorem zachyceno z celkové počtu fotonů emitovaných zdrojem. Účinnost je stanovována v (%) relativně ke konvenční účinnosti scintilačního detektoru NaI(Tl) rozměrů 3x3“ a energetickou linii 1332,5 keV bodového zdroje  $^{60}\text{Co}$  ve vzdálenosti 25 cm od čela detektoru.





Obr. 2. Rozlišení FWHM detektoru D1.

### 3.2 Elektronická trasa

Využití vlastností detektoru popsaných v části 3.1 k určení radionuklidu a stanovení jeho aktivity vyžaduje další elektronické součásti, jež jsou obecně nazývány elektronickou trasou. Tu tvoří tři základní součásti:

- a) zdroj vysokého napětí,
- b) zesilovač impulsů,
- c) digitálně analogový převaděčem (ADC).

Zdroj vysokého napětí zajišťuje pracovní napětí pro detektor, které se obvykle pohybuje v rozsahu 3 až 5 kV.

Zesilovač zajišťuje nejen nastavení vhodného zesílení – hrubě po skocích a jemně plynule, ale umožňuje i tvarování impulsu vstupujícího do ADC. Tvarování se dělá vhodně nastavenou časovou konstantou a funkcí Puls/Zero.

Analogově digitální převodník (ADC) třídí a rozděluje impulzy tak, že původní analogovou informaci mění na číslo úměrné jejich napět'ové amplitudě. Jemnost rozdělení je volitelná a nazývá se převodním zesílením. Roztříděné impulzy jsou pak ukládány do tzv. kanálů. Počet kanálů spektra pro polovodičovou spektrometrii bývá nejméně 2048 (zkráceně 2K), obvykle 4096 (4K) nebo 8192 (8K). Počet impulsů resp. četnost impulsů v konkrétním kanále pak odpovídá počtu fotonů o určité energii zachycených detektorem.

Celý proces zpracování impulsů z detektoru je náročný na linearitu zpracování, tj. nesmí dojít ke ztrátě původní informace o výšce impulsu.

### **3.3 *Mnohakanálové analyzátory***

V průběhu měření jsou impulzy ukládány do paměti za účelem jejich další analýzy. Tu lze provádět dvěma způsoby:

- a) Pomocí tzv. mnohakanálových analyzátorů (MCA), které umožňují sledovat na displeji počty impulsů v jednotlivých kanálech, graficky zobrazovat spektrum a řadu dalších funkcí, jako je např. kalibrace čísla kanálů v jednotkách energie (keV), analýzy spektra, identifikaci radionuklidů, výpočet aktivity jednotlivých radionuklidů atd.
- b) Osobním počítačem a vhodným programovým vybavením umožňujícím všechny potřebné kroky pro spektrometrii gama, jako je kalibrace detektoru, analýza spektra, tvorba a správa knihoven radionuklidů, stanovení minimálních detekovatelných aktivit, výpočet aktivit pro jednotlivé radionuklidy atd. Tomuto způsobu je v posledních letech dáována přednost před používáním klasických MCA.

### **3.4 *Energetická kalibrace detektoru***

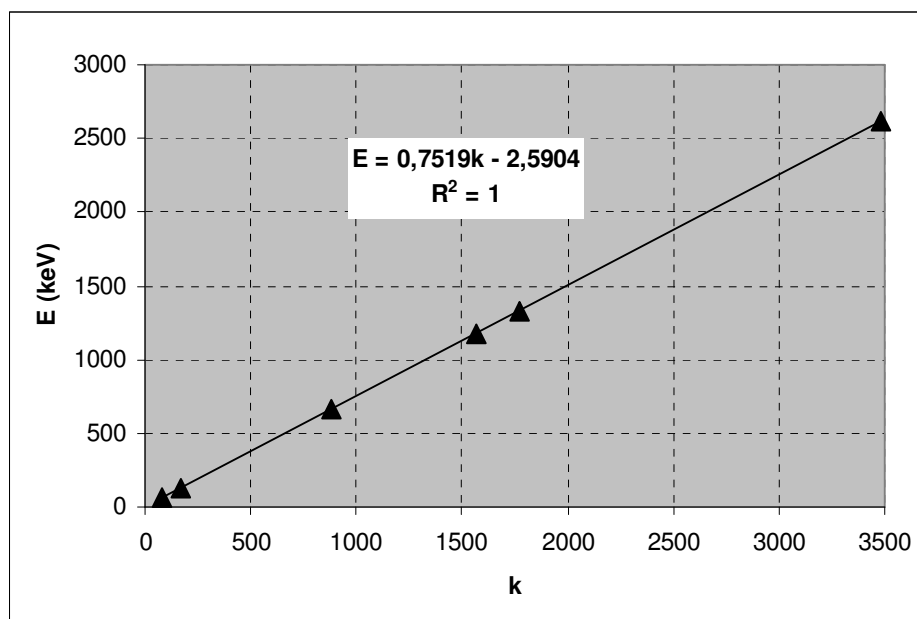
Jednotlivým kanálům, do kterých byly uloženy detekované impulzy způsobem popsaným v části 3.2, je nutné přiřadit hodnotu energie fotonů. Linearita mezi číslem kanálu – pozicí na ose x spektra a energií detekovaných fotonů je nutnou vlastností celé elektronické trasy. Vlastní energetická kalibrace – přiřazení číslu kanálu konkrétní

hodnotu energie, pak slouží nejen k rychlé orientaci ve spektru, ale rovněž k ověření linearity. Energetická kalibrace se prakticky provádí měřením spektra radionuklidu resp. radionuklidů se známou energií emitovaných fotonů při přeměně těchto radionuklidů, s následným proložením přímky a získáním vztahu určující hodnotu energie v (keV) jako funkci pozice na ose x, tj. čísla kanálu. K základnímu nastavení zesilovače a ADC lze výhodně využít radionuklidu  $^{60}\text{Co}$  s energetickými liniemi fotonů 1173,2 keV a 1332,5 keV. Budeme-li mít k dispozici MCA např. se 4096 kanály a požadujeme-li měřicí rozsah do cca 3000 keV, pak energie odpovídající jednomu kanálu je  $3000/4000=0,75$  keV/kanál. Postupnou změnou zesílení musíme tedy dosáhnout, aby vrcholy fotonů  $^{60}\text{Co}$  byly od sebe vzdáleny o  $\Delta k=(1332,5-1173,2)/0,75=212$  kanálů. Posunutím celého spektra v ose x (umožňuje funkce Zero na ADC) docílíme toho, aby byl přibližně vrchol prvního píku v kanále  $1173,2/0,75=1564$  a vrchol druhého píku v kanále  $1564+212=1776$ .

Jako příklad jsou v tab. 3 uvedena vstupní data použita pro kalibraci a na obr. 3 je uveden výsledek kalibrace pro konkrétní detektor D1 (viz část 4), při volbě spektra délky 4096 kanálů. Koeficient korelace rovný 1 potvrzuje linearitu v celém rozsahu energií použitých pro kalibraci, tj. od 59,5 do 2614,5 keV.

Tab. 3. Data použitá pro energetickou kalibraci detektoru D1.

č. kanálu	E (keV)	radionuklid
83	59,5	Am-241
166	121,8	Eu-152
882	661,7	Cs-137
1564	1173,2	Co-60
1776	1332,5	Co-60
3481	2614,5	Tl-208



Obr. 3. Energetická kalibrace detektoru.

### 3.5 Kalibrace účinnosti detektoru

Účinnost detekce fotonů o dané energii (tzv. fotopíková účinnost) je bezrozměrná veličina udaná podílem počtu fotonů dané energie zachycených detektorem ku počtu fotonů stejné energie emitovaných zdrojem za jednotku času. Počet registrovaných fotonů za jednotku času je dán hodnotou plochy píku dělenou dobou měření. Počet fotonů emitovaných zdrojem za jednotku času je dán součinem aktivity zdroje a tzv. výtěžku (používá se též výraz zastoupení) emise fotonů, který udává počet fotonů emitovaných zdrojem při jednom rozpadu, je tabelován a uvádí se bezrozměrně nebo v (%). (Převrácená hodnota účinnosti v bezrozměrném vyjádření pak udává, kolikátý každý foton je v daném uspořádání detektor-vzorek zaznamenán detektorem.) Účinnost je tudíž obecně funkcí energie, závislost na energii je dána konkrétními vlastnostmi detektoru a geometrií měření. Obecně platí, že maximum účinnosti HPGe detektoru se nachází v oblasti 100 až 250 keV a směrem k nižším a vyšším energiím účinnost klesá. Pro konkrétní detektor a konkrétní geometrii měření vzorku se tak musí provést kalibrace účinnosti pomocí etalonů o známém složení radionuklidů a známé jejich

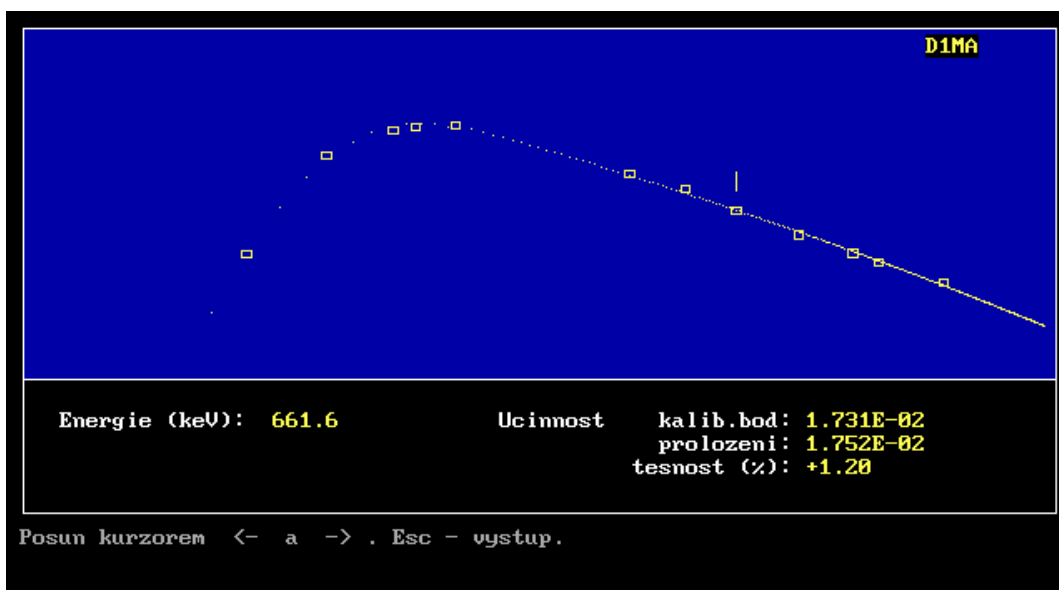
aktivitě. V logaritmickém měřítku lze závislost proložit vhodnou kombinací polynomů různých stupňů, např. parabola a přímka, dvě paraboly apod. (Matzner, 2004).

Závislost účinnosti  $\varepsilon$  konkrétního detektoru D1 na energii fotonů  $E$  pro geometrii měření v Marinelliho nádobě (označenou MA a popsanou v části 5.6), danou jako proklad dvěma parabolami se společným bodem účinnosti pro energii fotonů 169,5 keV lze matematicky popsat vztahy

$$\log(\varepsilon) = -24,56 + 21,72 \cdot \log(E) - 5,07 \cdot (\log(E))^2 \quad \text{pro } E \leq 169,5 \text{ keV a}$$

$$\log(\varepsilon) = -0,478 + 0,007 \cdot \log(E) - 0,135 \cdot (\log(E))^2 \quad \text{pro } E > 169,5 \text{ keV,}$$

zobrazení uvedených rovnic je na obr. 4. Proklad experimentálně naměřenými body nemůže být nikdy absolutní, na uvedeném obr. 4 je patrné, že např. pro energii 661,6 keV fotonů emitovaných  $^{137}\text{Cs}$  je hodnota účinnosti proložení  $1,752 \cdot 10^{-2}$  o 1,20% vyšší než hodnota experimentální  $1,731 \cdot 10^{-2}$ . V daném konkrétním uspořádání detektor-vzorek je pak detektorem detekován přibližně každý  $1/0,01731 = 58$ . foton emitovaný při přeměně  $^{137}\text{Cs}$ .



Obr. 4. Účinnost detektoru D1 pro geometrii měření v Marinelliho nádobě.

## 4. Přístrojové a programové vybavení spektrometrické laboratoře

### 4.1 Polovodičové detektory

V Regionálním centru SÚJB v Českých Budějovicích je v současné době v provozu 5 polovodičových detektorů, jejichž identifikace a parametry jsou uvedeny v tab. 4.

Tab. 4. Parametry používaných koaxiálních polovodičových detektorů

označení	výrobce	rozlišení (keV)	účinnost (%)	stínění
D1	Ortec, USA	2,0	30	Pb+Fe
D3	Canberra Packard, USA	2,0	37	Pb+Fe
D4	Canberra Packard, USA	2,0	50	Pb+Fe
D5	Ortec, USA	2,0	105	Fe-biofer
D6	Ortec, USA	2,0	64	Fe-biofer

Pozn. V současné době je mimo provoz – z důvodu stavby olověného stínění - detektor označení D2, výrobce Canberra Packard, USA, s rozlišením 2,0 keV a účinností 20%.

### 4.2 Stínění detektorů

Detektory D5 a D6 (tj. ty s větší účinností) jsou stíněny speciálně k tomuto účelu vybíraným železem o celkové tloušťce 30 cm (tzv. biofer), a to včetně dusíkových kryostatů, v tzv. stínící dvojkobce. U ostatních detektorů je použito ke stínění vlastního detektoru olovo o celkové tloušťce 10 cm, kryostat detektoru je pak dostíněn kombinací železa a olova o minimální tloušťce 10 cm. Uvedené základní dva způsoby stínění jsou zobrazeny na obr. 5, celkový pohled na detektory a jejich kompletní stínění je na obr. 6.

Důležitým parametrem ovlivňujícím hodnotu minimální detekovatelné aktivity je odezva detektorů ve stínění bez přítomnosti vzorku – tzv. pozadí. Pozadí je předmětem pravidelného (interval cca 1 měsíc) měření v laboratoři za normální radiační situace.

Spektrum pozadí se jednak ukládá, aby mohlo být použito při výpočtu aktivit radionuklidů ve vzorcích, jednak je standardně zaveden výpočet četnosti pozadí v rozsahu 40 až 4090 kanálů, což odpovídá přibližně 40 až 3070 keV energetického rozsahu. Zjištěná hodnota této četnosti pak slouží - porovnáním s hodnotou z posledního



Obr. 5. Stínění detektorů.



Obr. 6. Detektory se stíněními v měřicí místnosti (zleva D4, D3, D5, D6 a D1)

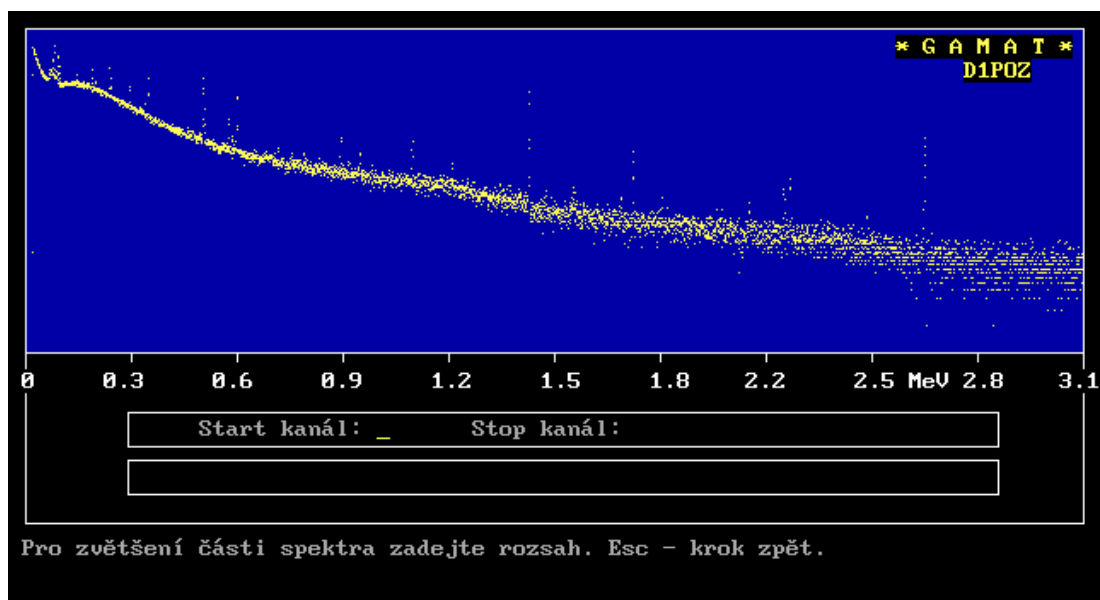
měření – ke kontrole, zda od posledního měření pozadí nedošlo k jeho změně v důsledku např. kontaminace detektoru nebo vnitřní části stínění nebo vůbec kvůli změnám vlastností detektoru.

Aktuální četnosti pozadí pro jednotlivé detektory jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 5. Aktuální hodnoty četnosti pozadí v rozsahu 40 až 3070 keV

detektor	účinnost (%)	stínění	četnost pozadí (s <sup>-1</sup> )
D1	30	Pb+Fe	2,2
D3	37	Pb+Fe	2,1
D4	50	Pb+Fe	2,6
D5	105	Fe-biofer	4,1
D6	64	Fe-biofer	2,5

Na obr. 7 je uvedeno spektrum pozadí detektoru D1 ve stínění Pb+Fe.

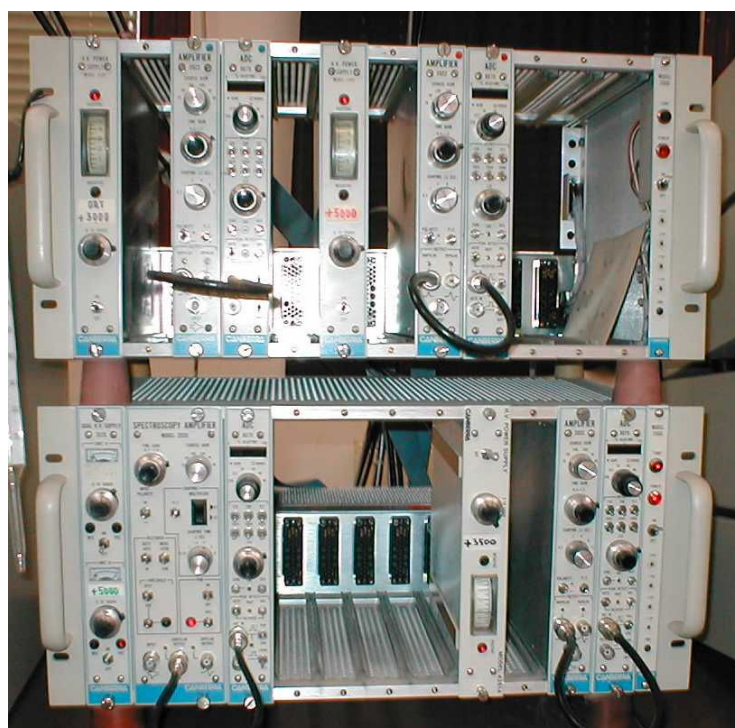


Obr. 7. Spektrum pozadí detektoru D1 v Pb+Fe stínění.

### 4.3 Elektronické trasy

K dispozici je celkem 6 elektronických tras tvořených zdrojem vysokého napětí, zesilovačem a analogově digitálním převodníkem pro každý polovodičový detektor. Uvedené součásti jsou fyzicky provedeny v modulech a umístěny a propojeny v rámu – tzv. NIM-BIN, který obstarává napájení jednotlivých modulů – obr. 8.





Obr. 8. Elektronická trasa.

#### 4.4 Mnokanálové analyzátory

V provozu jsou tři mnohakanálové analyzátory typu MCA35Plus amerického výrobce Canberra Packard (obr. 9), které jsou však již používány jen jako mezičlánek pro sběr a ukládání spekter, vlastní vyhodnocování se pak děje prostřednictvím vhodného programového vybavení na osobním počítači. Každý MCA35Plus má paměť 8K dělenou na dvě poloviny, takže celkem je umožněno na 3 MCA sbírat a ukládat 6 spekter velikosti 4K.

Jako náhrada za starší MCA35Plus je připravena modernější verze - multiport MPII4E téhož výrobce, který řízen osobním počítačem s příslušným software (GENIE 2K Canberra Packard , viz část 4.6) umožňuje sběr spekter ze 4 elektronických tras. Multiport v sobě obsahuje ADC pro každou trasu a komunikace s PC se děje buď přes rozhraní USB nebo po síti (ethernet).



Obr. 9. Mnohakanálový analyzátor MCA35Plus.

#### ***4.5 Doplnující hardware vybavení***

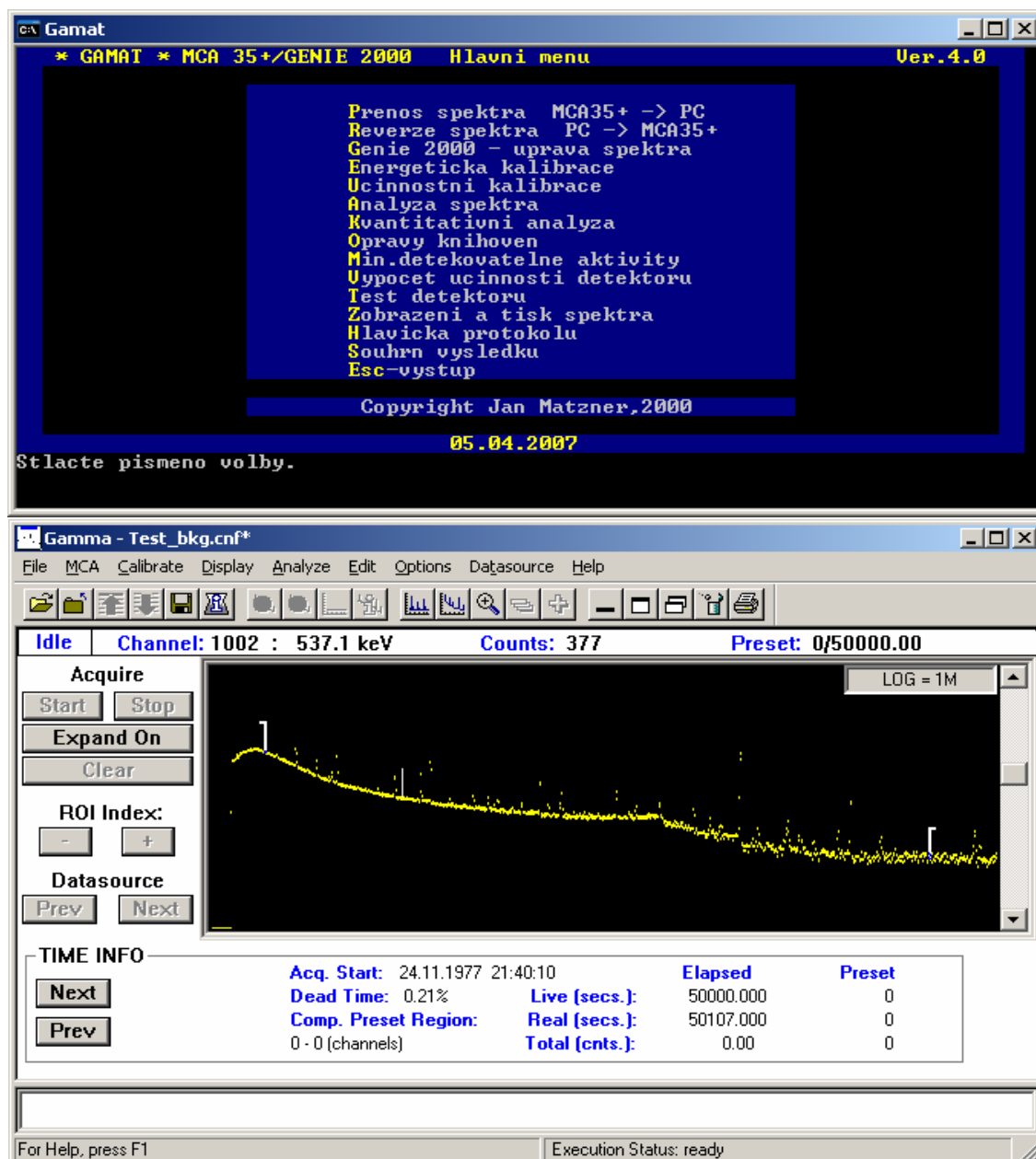
Spektrometrická laboratoř je vybavena dvěma osobními počítači. Elektronické trasy a MCA35Plus resp. multiport MPII4E jsou napájeny na vnější elektrické síti nezávislým napájením na principu UPS, tvořeným soupravou olověných akumulátorů a střídačem. Kapacita použitých akumulátorů dovoluje zásobovat uvedené součásti elektrickou energií nepřetržitě cca 12 hodin. Nezávislé napájení rovněž zajišťuje, že krátkodobé výpadky sítě nepřerušují měření. Trvalý provoz je navíc ideální pro aktivní elektronické prvky vysoké integrace, kterými jsou osazeny jednotlivé moduly a významnou měrou tak přispívá ke stabilitě parametrů celé trasy.

#### ***4.6 Programové vybavení***

K dispozici jsou dvě programová vybavení, GENIE 2K Canberra Packard a GAMAT V4.0, která umožňují komunikaci PC s MCA35Plus resp. multiportem MPII4E a jsou vybavena řadou dalších utilit – analýza spekter, kalibrace detektorů, tvorba a úprava vlastních knihoven radionuklidů atd.. Rutinně je používán GAMAT V4.0, který umožňuje jak přímou komunikaci s MCA35Plus, tak konverzi záznamu spektra GENIE 2K. Spektra ze všech 6 elektronických tras jsou přenášena do jednoho PC a tam jsou

vyhodnocována. Existuje i možnost rozdělení přenosů do 2 PC a vyhodnocování odděleně na těchto dvou počítačích.

Pro ilustraci jsou na obr. 10 zobrazeny hlavní moduly obou používaných programových vybavení.



Obr. 10. Ilustrace používaných programových vybavení.

Výsledky analýz spekter jsou, společně s dalšími informacemi o vzorku (datum měření, lokalita, druh vzorku podle hrubého a jemného třídění, datum odběru vzorku, doba měření spektra), automaticky z programu GAMAT V4.0 přenášeny do databáze Microsoft Office Access, v současné době je takto archivováno téměř 11000 výsledků od r. 1988. Jednotlivá spektra vzorků jsou navíc komprimována a ukládána na různých médiích (CD ROM, ZIP) mimo PC. Databáze výsledků slouží k rychlému vyhledávání výsledků měření konkrétních složek životního prostředí pomocí dotazů. Tato databáze však slouží pouze k místním účelům laboratoře, do centrální laboratoře ve Státním ústavu radiační ochrany v Praze jsou výsledky předávány pomocí jednotné celostátní aplikace AŽP. Tento postup však vyžaduje poměrně pracné vypisování všech atributů i výsledků měřeného vzorku, jedná se tudíž o časově značně náročnou operaci.

Mimo uvedené počty vzorků jsou pravidelně prováděná kalibrační měření a měřena požadová spektra, tyto informace jsou ukládány v aktuální formě na disku PC a historicky jsou archivovány v hard copy dokumentech každého detektoru.

## **5. Analýza parametrů ovlivňujících provoz spektrometrické laboratoře**

Návrh optimálního režimu spektrometrické laboratoře při měření vzorků složek životního prostředí za radiační mimořádné situace vyžaduje znalost všech parametrů ovlivňujících tento režim, především:

- a) radionuklidové složení, jež lze očekávat v měřených vzorcích životního prostředí,
- b) různé geometrie používané pro jednotlivé vzorky,
- c) doba měření pro jednotlivé vzorky složek životního prostředí a jí odpovídající minimální detekovatelná aktivita jednotlivých radionuklidů.

Znalost výše uvedených parametrů a jejich porovnání s požadavky legislativy pak bude základem pro stanovení optimálního režimu provozu laboratoře tak, aby v daných podmínkách byla kapacita – počty změřených vzorků - co největší.

### 5.1 Radionuklidové složení

Jako základ k dalším úvahám bylo uvažováno radionuklidové složení inventáře aktivní zóny jaderného reaktoru po jeho (havarijním) odstavení a pro tyto účely byl zvolen reaktor typu VVER 1000, tj. typ, jimž jsou vybaveny oba bloky jaderné elektrárny Temelín. Z hlediska radiační mimořádné situace je to v podmínkách ČR největší potenciální zdroj pro možnou radiační mimořádné situaci. Vlastním zdrojovým členem je pak inventář aktivní zóny po odstavení reaktoru – radionuklidové složení tohoto inventáře a aktivity jednotlivých radionuklidů. Z (ESTE,2006) bylo převzato radionuklidové složení inventáře aktivní zóny a doplněno – s ohledem na dispozici spektrometrické laboratoře – dalšími údaji, poločasem přeměny radionuklidů, energií fotonů emitovaných těmito radionuklidy a zastoupením fotonů na přeměně radionuklidů (Nuchart,1995). Izotopy vzácných plynů – kryptonu a xenonu – nebyly uvažovány, protože v uvažovaných vzorcích životního prostředí nemohou být přítomné. V souladu se zněním poznámky č.7 v Tab.č.2 přílohy vyhlášky č. 319/2002Sb., ve znění vyhlášky č. 27/2002 Sb. byly vybrány jen linie fotonů s energií větší než 100 keV a zastoupením větším než 10%.

Popsaným způsobem provedený výběr je v souladu s technickou dokumentací IAEA-TECDOC-1092 (IAEA, 1999). Výsledný přehled o vybraných radionuklidech je uveden v tab. 5.

### 5.2 Aerosoly

Měření objemové aktivity aerosolů se provádí prosátím známého objemu vzduchu filtrem pomocí odběrového zařízení a následným spektrometrickým měřením filtru.

Poznámky č.7 v Tab.č.2 přílohy vyhlášky č. 319/2002Sb., ve znění vyhlášky č. 27/2002 Sb. stanovuje, že objemová aktivita jednotlivých radionuklidů v aerosolu ( $Bq/m^3$ ) musí být stanovena s takovou citlivostí, aby inhalace vzduchu s takovou objemovou aktivitou nezpůsobila za měsíc úvazek efektivní dávky větší než  $1 \mu Sv$ . Vyhláška č. 307/2002 Sb., ve znění vyhl. č. 499/2006 Sb. pak stanovuje – nejsou-li známa přesnější data odpovídající konkrétní situaci – množství vzduchu vdechovaného v průběhu roku

v závislosti na věku. Údaje jsou uvedeny v tab. 6, kde je pro další úvahy uveden i vdechovaný objem za jeden měsíc (zaokrouhlený na jednotky m<sup>3</sup>).

Tab. 5. Charakteristiky jednotlivých radionuklidů

radionuklid	poločas přeměny	energie fotonů (keV)	zastoupení (%)
Ba-140	12,752 d	537,3	24,39
Cs-134	2,062 r	604,7	97,60
Cs-137	30,00 r	661,7	85,21
I-131	8,04 d	364,5	81,21
I-132	2,295 h	772,6	75,61
I-133	20,80 h	529,9	87,00
I-134	52,60 m	847,0	95,42
I-135	6,57 h	1260,4	28,90
La-140	1,678 d	1596,2	95,40
Mo-99	65,94 h	739,6	12,13
Nb-95	34,975 d	765,8	99,81
Rh-105	35,36 h	318,9	19,10
Ru-103	39,26 d	497,1	91,01
Ru-105	4,44 h	724,3	47,30
Sb-127	3,85 d	685,8	35,30
Sb-129	4,40 h	812,9	43,01
Sr-91	9,63 h	1024,3	33,42
Tc-99m	6,01 h	140,5	89,06
Te-132	3,204 d	228,2	88,00
Y-90m	3,19 h	202,5	97,30
Y-91m	49,71 m	555,6	94,90
Zr-95	64,02 d	756,7	54,46
Zr-97	16,91 h	743,4	93,06

Hodnoty úvazku efektivní po příjmu inhalací radionuklidu o jednotkové aktivity jsou tabelovány, zkráceně se nazývají konverzní faktory a jsou uváděny v odpovídajících

jednotkách, tj. v (Sv/Bq). Pro jednotlivé radionuklidy je absorpce v plicích vyjádřena v závislosti na rychlosti, se kterou radionuklid přechází z plic do tělesných tekutin a podle modelových výpočtu jsou konverzní faktory uváděny pro přechod s velkou rychlostí (značeno F), se střední rychlostí (M) a malou rychlostí (S). Protože úvazek efektivní dávky závisí i na hmotnosti jednotlivých ozářených orgánů, jsou konverzní faktory uváděny v závislosti na věkových skupinách. Pro skupinu pro naše účely vybraných radionuklidů byly pro jednoduchost vybrány největší hodnoty konverzních faktorů podle parametrů F, M a S. S výjimkou izotopů jódu a <sup>132</sup>Te (jako mateřského radionuklidu pro <sup>132</sup>I) jsou to vesměs hodnoty konverzních faktorů pro pomalou rychlost přechodu z plic do tělesných tekutin. U jmenovaných výjimek je tomu naopak, protože rychlý přechod do tělesných tekutin pak způsobí větší ozáření štítné žlázy – do níž za cca 6 hodin přejde polovina aktivity jódu z tělesných tekutin. Přehled konverzních faktorů pro jednotlivé radionuklidy a v závislosti na věku je uveden v tab. 7, kde je pro názornost uveden i typ přechodu z plic do tělesných tekutin, kterému odpovídá největší konverzní faktor.

Tab. 6. Vdechované množství vzduchu v závislosti na věku

věk (roky)	vdechované množství vzduchu za 1 rok (m <sup>3</sup> )	vdechované množství vzduchu za 1 měsíc (m <sup>3</sup> )
méně než 1	1000	83
1 až 2 včetně	2000	167
2 až 7 včetně	4000	333
7 až 12 včetně	6000	500
12 až 17 včetně	8000	667
více než 17	8500	708

Mezi úvazkem efektivní dávky  $E_C$ , konverzním faktorem pro příjem inhalací  $h$ , objemovou aktivitou radionuklidu ve vdechovaném vzduchu  $a_V$  a objemem vdechnutého vzduchu za 1 měsíc  $V_m$  platí vztah

$$E_C = a_V \cdot V_m \cdot h .$$

Tab. 7. Konverzní faktory (Sv/Bq) pro příjem inhalací v závislosti na věku

radionuklid	typ	<1 rok	1-2roky	2-7roků	7-12roků	12-17roků	dospělí
Ba-140	S	2,90E-08	2,20E-08	1,20E-08	8,60E-09	7,10E-09	5,80E-09
Cs-134	S	7,00E-08	6,30E-08	4,10E-08	2,80E-08	2,30E-08	2,00E-08
Cs-137	S	1,10E-07	1,00E-07	7,00E-08	4,80E-08	4,20E-08	3,90E-08
I-131	F	7,20E-08	7,20E-08	3,70E-08	1,90E-08	1,10E-08	7,40E-09
I-132	F	1,10E-09	9,60E-10	4,50E-10	2,20E-10	1,30E-10	9,40E-11
I-133	F	1,90E-08	1,80E-08	8,30E-09	3,80E-09	2,20E-09	1,50E-09
I-134	F	4,60E-10	3,70E-10	1,80E-10	9,70E-11	5,90E-11	4,50E-11
I-135	F	4,10E-09	3,70E-09	1,70E-09	7,90E-10	4,80E-10	3,20E-10
La-140	M	8,80E-09	6,30E-09	3,10E-09	2,00E-09	1,30E-09	1,10E-09
Mo-99	S	6,90E-09	4,80E-09	2,40E-09	1,70E-09	1,20E-09	9,90E-10
Nb-95	S	7,70E-09	5,90E-09	3,60E-09	2,50E-09	2,20E-09	1,80E-09
Rh-105	S	2,40E-09	1,70E-09	8,00E-10	5,60E-10	4,50E-10	3,50E-10
Ru-103	S	1,30E-08	1,00E-08	6,00E-09	4,20E-09	3,70E-09	3,00E-09
Ru-105	S	1,40E-09	9,80E-10	4,80E-10	3,20E-10	2,20E-10	1,80E-10
Sb-127	S	1,10E-08	7,90E-09	4,20E-09	3,00E-09	2,30E-09	1,90E-09
Sb-129	S	2,10E-09	1,50E-09	7,20E-10	4,60E-10	3,00E-10	2,50E-10
Sr-91	S	3,50E-09	2,50E-09	1,20E-09	7,70E-10	4,90E-10	3,70E-11
Tc-99m	S	1,30E-10	1,00E-10	5,20E-11	3,50E-11	2,50E-11	2,00E-11
Te-132	F	2,20E-08	1,80E-08	8,50E-09	4,20E-09	2,60E-09	1,80E-09
Y-90m	S	7,50E-10	6,00E-10	2,90E-10	1,90E-10	1,20E-10	1,50E-09
Y-91m	S	7,40E-11	5,90E-11	3,10E-11	2,00E-11	1,40E-11	1,10E-11
Zr-95	S	2,40E-08	1,90E-08	1,20E-08	8,30E-09	7,30E-09	5,90E-09
Zr-97	S	8,20E-09	5,60E-09	2,90E-09	1,90E-09	1,20E-09	8,90E-10

Podmínka stanovení objemové aktivity radionuklidu v takových hodnotách, abychom byli schopni postihnout ozáření minimálně v hodnotách úvazku efektivní dávky 1  $\mu$ Sv v důsledku inhalace vzduchu v průběhu jednoho měsíce, je pak podmínkou pro hodnotu minimální detekovatelné objemové aktivity radionuklidu  $MDa_V$  v aerosolu a lze ji vyjádřit



$$a_v \leq \frac{10^{-6}}{h.V_m}, \quad \text{tj. } MDa_v = \frac{10^{-6}}{h.V_m}.$$

Poslední uvedený vztah byl použit pro stanovení minimálních detekovatelných objemových aktivit námi uvažovaných radionuklidů a pro jednotlivé věkové skupiny. Výpočet byl proveden v prostředí Microsoft Excel a výsledek je uveden v tab. 8.

Tab. 8. Minimální detekovatelné objemové aktivity radionuklidů v (Bq/m<sup>3</sup>).

radionuklid	<1 rok	1-2roky	2-7roků	7-12roků	12-17roků	dospělí
Ba-140	0,4	0,5	1,0	1,4	1,7	2,1
Cs-134	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Cs-137	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	0,2	0,3	0,3	0,3
I-131	0,2	0,2	0,3	0,6	1,1	1,6
I-132	11,0	12,6	26,8	54,8	92,7	128,2
I-133	0,6	0,7	1,5	3,2	5,5	8,0
I-134	26,2	32,6	66,9	124,2	204,2	267,7
I-135	2,9	3,3	7,1	15,3	25,1	37,7
La-140	1,4	1,9	3,9	6,0	9,3	11,0
Mo-99	1,7	2,5	5,0	7,1	10,0	12,2
Nb-95	1,6	2,0	3,3	4,8	5,5	6,7
Rh-105	5,0	7,1	15,1	21,5	26,8	34,4
Ru-103	0,9	1,2	2,0	2,9	3,3	4,0
Ru-105	8,6	12,3	25,1	37,7	54,8	66,9
Sb-127	1,1	1,5	2,9	4,0	5,2	6,3
Sb-129	5,7	8,0	16,7	26,2	40,2	48,2
Sr-91	3,4	4,8	10,0	15,6	24,6	325,6
Tc-99m	92,7	120,5	231,7	344,2	481,9	602,4
Te-132	0,5	0,7	1,4	2,9	4,6	6,7
Y-90m	16,1	20,1	41,5	63,4	100,4	8,0
Y-91m	162,8	204,2	388,7	602,4	860,6	1095,3
Zr-95	0,5	0,6	1,0	1,5	1,7	2,0
Zr-97	1,5	2,2	4,2	6,3	10,0	13,5

Z tab. 8 vyplývá, že největší nároky na  $MD_{av}$  (tučně zvýrazněné nejmenší hodnoty) jsou pro inhalaci aerosolu obsahujícího  $^{137}\text{Cs}$ , a to jednotlivcem do 2 roků věku. **Bude-li objemová aktivita  $^{137}\text{Cs}$  v aerosolu měřena s minimální detekovatelnou objemovou aktivitou  $0,1 \text{ Bq/m}^3$ , pak budou splněny i podmínky citlivosti měření pro ostatní radionuklidy.** Tento výsledek je v souladu s odůvodněním požadavku uvedeného ve vyhlášce č. 319/2002 Sb., ve znění vyhlášky č. 27/2002 Sb. (výťah viz tab. 1). Podmínky budou rovněž splněny pro měření plynných forem jódu, poněvadž požadovaná  $MD_{av}$  pro  $^{131}\text{I}$  je dvojnásobně větší než pro  $^{137}\text{Cs}$  (viz tab. 7).

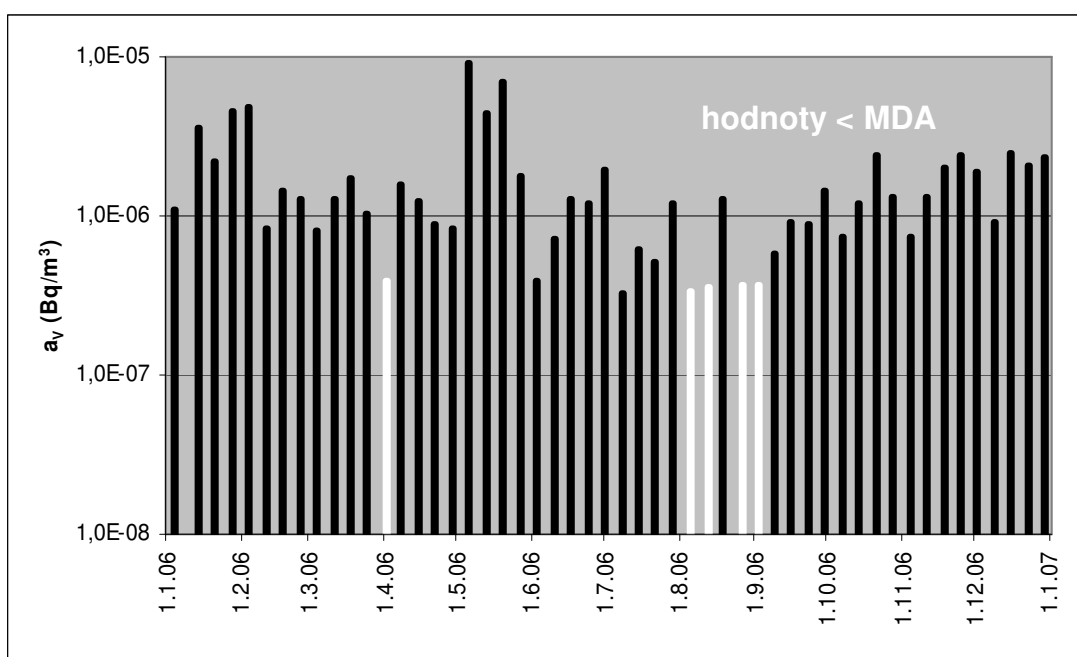
### 5.3 Režim odběru vzorků aerosolů

Minimální detekovatelná objemová aktivita radionuklidů v aerosolu, stanovená v části 4.1, je podílem minimální detekovatelné aktivity uvedeného radionuklidu při měření aerosolového filtru v daném geometrickém uspořádání a objemu vzduchu, jenž byl filtrem prosát. Odběr vzorků aerosolu se provádí v rámci radiační monitorovací sítě na tzv. měřících místech kontaminace ovzduší (MMKO), viz text v části 2.2. Regionální centrum SÚJB v Českých Budějovicích je jedním z těchto MMKO a je vybaveno zařízením pro odběr vzorků vzdušného aerosolu typu JL-150 Hunter finského výrobce SENYA, s nominální průtokem vzduchu aerosolovým filtrem  $150 \text{ m}^3/\text{h}$  a paralelním průtokem  $12 \text{ m}^3/\text{h}$  patronou s aktivním uhlím pro záchyt plynných forem jódu, viz obr. 11. Aerosolový filtr je rozměru  $230 \times 285 \text{ mm}$ , objem jodové patrony je  $0,5 \text{ l}$ .



Obr. 11. Odběrové zařízení JL-150 Hunter.

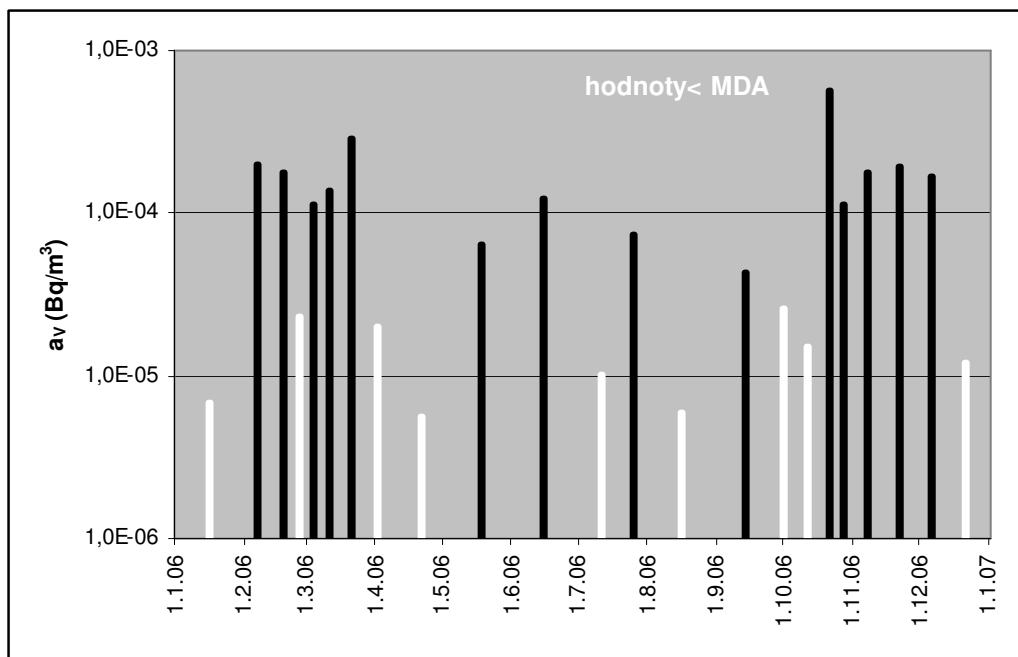
Za normální radiační situace probíhá odběr aerosolů na filtr odběrového zařízení v týdenním cyklu: Od středy do středy probíhá vlastní odběr aerosolu na filtr, do pátku každého týdne je filtr uložen za účelem poklesu aktivity krátkodobých přírodních radionuklidů – produktů přeměny radonu a poté probíhá přes víkend vlastní měření filtru. Při dodržení popsaného režimu lze dosáhnout značné citlivosti při stanovení aktivit na filtru: Objem prosátého vzduchu filtrem je cca  $3 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ , minimální detekovatelná aktivita na hladině spolehlivosti 95% pro danou geometrii měření filtru (podrobný popis v části 5.5) za dobu měření 350000 s je např. pro  $^{137}\text{Cs}$  řádově  $10^{-2} \text{ Bq}$ , takže výsledná citlivost měření aktivity aerosolu pro uvedený radionuklid je menší než  $1 \text{ } \mu\text{Bq/m}^3$ . Na obr. 12 jsou uvedeny týdenní hodnoty měření objemové aktivity  $^{137}\text{Cs}$  v aerosolu na MMKO Regionálního centra SÚJB v Českých Budějovicích v roce 2006. S výjimkou 5 týdnů v roce byla objemová aktivita  $^{137}\text{Cs}$  detekovatelná nad MDA a je patrné, že hodnoty MDA jsou skutečně menší než  $1 \text{ } \mu\text{Bq/m}^3$ .



Obr. 12. Objemová aktivita  $^{137}\text{Cs}$  ve vzdušném aerosolu (MMKO RC Č.B.)

V souladu s metodikou (VDMI074, 2003) se za normální radiační situace provádí měření plynných forem jodu pouze v případě, že na týdenním aerosolovém filtru byl zjištěn  $^{131}\text{I}$ . Taková situace v měřicím místě RC SÚJB v Č. Budějovicích v průběhu

roku nastává v důsledku blízkosti měřicího místa kontaminace ovzduší od čistírny odpadních vod areálu nemocnice, které obsahují zbytkové aktivity  $^{131}\text{I}$  v důsledku provozu oddělení nukleární medicíny, zejména po terapeutických aplikacích jódu. Na obr. 13 jsou uvedeny výsledky objemové aktivity plynných forem  $^{131}\text{I}$  za rok 2006.



Obr. 13. Objemová aktivita  $^{131}\text{I}$  v ovzduší (MMKO RC Č.B.)

Za radiační mimořádné situace však budou jiné požadavky na monitorování než jsou stávající požadavky za normální radiační situace. Proto optimalizaci režimu laboratoře při stanovení objemové aktivity aerosolu nelze navrhnout bez úvahy o optimální volbě způsobu odběru aerosolu a způsobu následného měření filtru laboratorní skupinou.

Delší doba odběru vzorku aerosolu obecně znamená větší prosátý objem vzduchu filtrem a tudíž zmenšení výsledné minimální detekovatelné objemové aktivity radionuklidů  $MD_{av}$  v měřeném filtru. Prodlužování doby odběru však může být na úkor doby měření s důsledkem nižší minimální detekovatelné aktivity.

Položme si tedy otázku, jak lze optimálně rozdělit celkový čas potřebný pro stanovení objemové aktivity radionuklidů v aerosolu mezi dobu odběru a dobu měření vzorku.

Odběrová zařízení pracují s konstantní rychlostí průtoku vzduchu filtrem, takže objem prosátý filtrem roste lineárně s časem.  $MDa_V$  je nepřímo úměrná objemu prosátého vzduchu, tedy nepřímo úměrná času odběru vzorku  $t_o$ . Minimální detekovatelná aktivita, jak plyne ze vztahu uvedeného v části 2.2, klesá s rostoucí odmocninou doby měření  $t_m$ . Souhrnně je pak  $MDa_V$  nepřímo úměrná součinu  $t_o$  a druhé odmocniny z  $t_m$ . Označíme-li nějakou konstantu  $k$  (pro další záměr ji nemusíme nijak blíže specifikovat), pak můžeme závislost vyjádřit rovnicí

$$MDa_V = \frac{k}{t_o \sqrt{t_m}}.$$

Ve všech případech, kdy informace o objemové aktivitě aerosolu musí být dostupná do nějaké doby  $t$  (nebo průběžně v každém intervalu délky  $t$ ), pak hledáme minimum  $MDa_V$  za podmínky  $t = t_o + t_m$ . Matematicky to znamená najít  $t_m$  z podmínky

$$\frac{d}{dt_m} MDa_V = \frac{d}{dt_m} \left( \frac{k}{(t - t_m) \sqrt{t_m}} \right) = 0.$$

Derivováním uvedeného vztahu a řešením rovnice pak vyjde (Matzner, 2004).

$$t_m = \frac{t}{3}.$$

Získaný závěr platí obecně, nezávisí na vlastním objemu prosátého vzduchu (tj. na rychlosti prosávání) ani na vlastní hodnotě MDA při měření filtru:

Optimální (tj. za účelem zisku nejmenší výsledné minimální detekovatelné objemové aktivity aerosolu) rozdělení doby odběru a doby měření vzorku aerosolu je v poměru 2:1 (ve prospěch doby odběru).

Je třeba zdůraznit, že uvedený závěr je irelevantní, pokud laboratorní skupina dostává ke stanovení objemových aktivit vzorky aerosolových filtrů odebraných z jiného než vlastního MMKO, tj. v případech, kdy se informace vyhodnocuje zpětně. Uvedený

závěr je však třeba zohlednit vždy v těch případech, kdy je nutné kontinuálně sledovat změny objemových aktivit v aerosolu průběžným odběrem s následujícím měřením vzorků. Taková situace může právě nastat při radiační mimořádné situaci spojené s pohybem radionuklidy kontaminovaných vzdušných hmot, kdy lze poměrně v krátkých časech očekávat významné změny objemových aktivit radionuklidů ve vzdušném aerosolu.

#### **5.4 Ostatní vzorky složek životního prostředí**

Z tab. 1 vyplývá, že laboratorní skupina musí být, na základě legislativních požadavků, připravena k měření obsahu radionuklidů – mimo již diskutovaných vzdušných aerosolů – v následujících složkách životního prostředí:

- a) spad včetně dešťové vody a sněhu,
- b) půda a porost,
- c) porost, sníh,
- d) povrchová voda,
- e) pitná voda,
- f) mléko,
- g) smíšená strava.

Pro položky uvedené pod písm. a) až c) nejsou předem stanoveny požadavky na citlivost měření a je předpokládáno, že budou stanoveny až v konkrétních případech a v závislosti na průběhu radiační mimořádné situace. Naopak, pro položky d) až g) je citlivost měření udána s odvoláním na nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace potravin při radiační mimořádné situaci, uvedené v tab. 2 v části 2.3. Z této tabulky vyplývá, že nejpřísnější požadavky jsou kladeny na potraviny pro kojeneckou výživu, budou-li tudíž požadavky na tuto složku splněny, budou automaticky splněny i pro ostatní složky potravin – pro mléko a mléčné výrobky, pro pitnou vodu a tekuté potraviny a pro ostatní potraviny.

Vyloučit z konzumace potraviny přesahující uvedené nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace bude možno pouze v případě, kdy minimální detekovatelné

(hmotnostní nebo objemové) aktivity budou nanejvýš rovny v tabulce uvedeným nejvyšším přípustným úrovním.

K předmětu zájmu této práce – optimalizace procesu měření v laboratorní skupině vybavené spektrometrií gama – se vztahují pouze následující **požadavky na minimální detekovatelné (hmotnostní nebo objemové) aktivity**, odvozené z nejvyšších přípustných úrovní:

- a) pro **izotopy jódu - 150 Bq/kg resp. Bq/l**,
- b) **pro všechny ostatní radionuklidy s poločasem přeměny delším než 10 dní**, zejména  $^{134}\text{Cs}$  a  $^{137}\text{Cs}$  (kromě  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) – **400 Bq/kg resp. Bq/l**.

### ***5.5 Popis používaných geometrií detekce při měření vzorků***

Používanou geometrií je obecně myšleno geometrické uspořádání vzorku v kontaktu s detektorem po dobu měření spektra. Uspořádání musí splňovat především tyto vlastnosti:

- a) maximální možné využití celé citlivé plochy detektoru,
- b) jednoduché plnění vzorku, pokud jsou použity vzorkovnice různých tvarů; absorpce fotonů v materiálu vzorkovnic musí být zanedbatelná,
- c) s výjimkou velmi těsných geometrií je nutné, aby rozložení aktivity ve vzorku bylo co nejvíce homogenní,
- d) musí být známa účinnost detekce pro konkrétní geometrické uspořádání vzorku, a to pro celý energetický rozsah měřícího zařízení.

Vzorkovnice se používají především pro plnění vzorky tekuté nebo sypké konzistence, případně těsným zaplněním vzorky měkké konzistence, jako je např. na kousky nakrájené maso, případně pro plnění vzorky dovolujícími je do vzorkovnice lisovat, např. seno nebo jiné sušené plodiny. V případě vzorků pevného skupenství a větších tvarů, je třeba nejprve vzorek rozemlít nebo rozdrtit, měření takových vzorků se však v případě radiační mimořádné situace nepředpokládá.

Dále popíšeme pouze tři geometrie používané pro měření složek životního prostředí, vyjmenovaných v částech 4.3 až 4.4, tj. ty geometrie, které nevyžadují náročné zpracování vzorku (např. odpaření, sušení atp.) a přicházejí tedy v úvahu v případě radiační mimořádné situace.

### ***Geometrie F1***

F1 je označena geometrie používaná pro měření aerosolových filtrů. Filtr z odběrového zařízení se překládáním složí do pásku, jehož šířka odpovídá výšce citlivé části detektoru (cca 6 cm), takto zhotovený pásek se zataví do PE folie. Pásek ve folii se pak ovine kolem přípravku válcové tvaru z tvrzeného PE, přičemž vnitřní průměr přípravku je jen o málo větší než průměr detektoru. Přípravek se nasadí na detektor, takže při měření je pak filtr ve velmi těsné konfiguraci s obvodem detektoru.

### ***Geometrie L1***

Tato geometrie využívá PE vzorkovnic objemu 0,25 l se šroubovým uzávěrem, umístěných kolem obvodu detektoru. V daném uspořádání lze umístit až 6 popsanych vzorkovnic, takže celkový objem vzorku může být 0,25 až 1,50 l. Výhodou této geometrie měření je jednak značný objem vzorku v případě použití 6 vzorkovnic (významné snížení minimální objemové nebo hmotnostní detekovatelné aktivity), jednak skutečnost, že lze použít jedné kalibrace nezávisle na počtu vzorkovnic (1 až 6) umístěných kolem detektoru. Částečnou nevýhodou je nevyužití horní citlivé části detektoru. V případě vzorků hustoty menší nebo větší než 1000 kg/m<sup>3</sup> je používána stejná geometrie, avšak s různými kalibracemi dle hustoty vzorku (označení L0, L2, L3). Ve většině případů měření vzorků za radiační mimořádné situace se však předpokládá, že se oprava na hustotu vzorků provádět nebude.

### ***Geometrie MA***

MA je označena geometrie speciální vzorkovnice, tzv. Marinelliho nádoby, která se nasouvá shora na detektor a zajišťuje kontakt stejné tloušťky vzorku jak s citlivou částí detektoru po jeho obvodu, tak i na čele. Pro různé průměry detektorů existují Marinelliho nádoby různé velikosti a tudíž i různého objemu. Standardní objem nádoby pro detektor průměru do 75 mm je 0,5 l.



Uvažované a výše popsané tři základní geometrie měření vzorků jsou pro názornost zobrazeny na obr. 14.



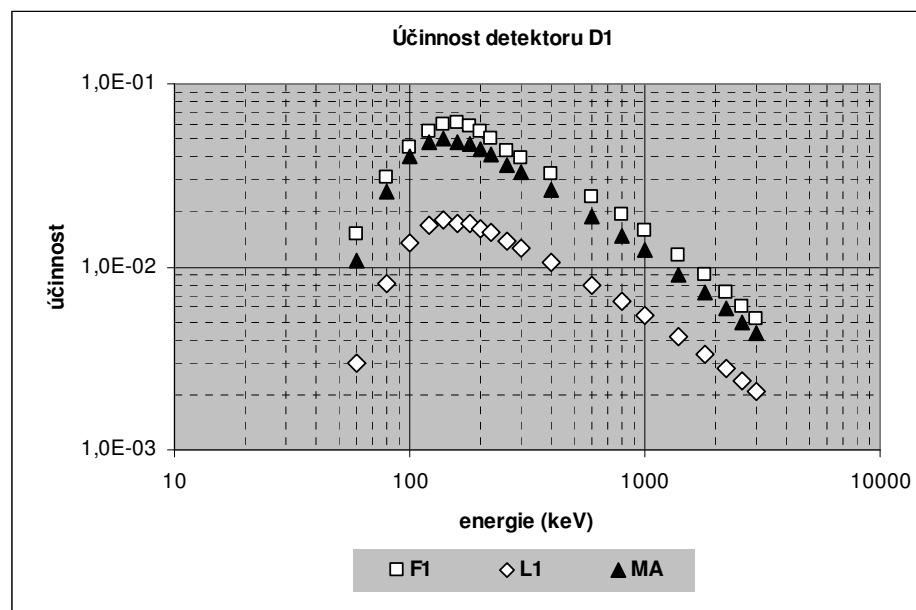
Obr. 14. Použité geometrie měření, zleva F1, L1 a MA.

### 5.6 Volba vhodné geometrie

Pro měření aerosolových filtrů je použití geometrie F1 dané – není jiná používaná alternativa.

U všech ostatních vzorků životního prostředí lze volit mezi geometriemi L1 a MA. Bude-li kritériem správné volby dosažení menší minimální detekovatelné (objemové nebo hmotnostní) aktivity radionuklidu  $MDa$ , pak lze pro rozhodování správné volby použít následující úvahu:

Ze vztahu pro  $MDa$  uvedeného v části 2.2 vyplývá, že  $MDa$  je nepřímo úměrná součinu účinnosti detektoru pro detekci fotonů dané energie a objemu (hmotnosti) vzorku. Z dokumentace o průběžných kalibracích detektoru D1 byly stanoveny účinnosti tohoto detektoru v celém energetickém rozsahu a pro všechny výše uvedené geometrie. Přehled je v grafu na obr. 15.



Obr. 15. Účinnost detektoru D1 pro tři uvažované geometrie měření.

Z obr. 15 je patrné, že účinnost geometrie MA je cca 2 až 3krát větší než geometrie L1 v celém energetickém rozsahu. Geometrie MA dovoluje max. objem vzorku 0,5 l, geometrie L1 1,5 l, tj. 3krát větší než při geometrii MA. Z uvedeného tedy vyplývají tyto závěry:

- Bude-li k dispozici vzorek objemu 0,5 až 1 l, pak je třeba dát přednost geometrii MA před geometrií L1, protože výsledná MDA bude 2 až 3krát menší.
- Bude-li k dispozici vzorek objemu 1,5 l, pak dosáhneme stejné MDA, ať zvolíme geometrii měření L1 nebo MA, tj. vzorek objemu 0,5 l v Marinelliho nádobě nebo vzorek objemu 1,5 l v šesti vzorkovnicích objemu 0,25 l. V konkrétním případě může rozhodování ovlivnit např. dispozice počtem vzorkovnic nebo jednodušší plnění vzorkovnic konkrétním druhem vzorku nebo jednodušší manipulace se vzorkovnicemi při jejich přenášení atp.

### 5.7 Volba doby měření jednotlivých vzorků životního prostředí

Pro nalezení vhodné doby měření za účelem dosažení požadovaných MDA specifikovaných v částech 4.2 a 4.4 byl jako základ vzat detektor D1 s účinností 30%.

Ostatní detektory (viz. tab. 3) mají účinnost vyšší, budou-li tudíž podmínky citlivosti jednotlivých měření splněny pro detektor D1, budou splněny i pro ostatní detektory.

V programovém vybavení GAMAT V4.0 byla pro tyto účely vytvořena speciální knihovna, do které byly uloženy údaje o radionuklidech uvedených v tab. 4. Pro všechny tři uvažované geometrie měření byly pak programem stanoveny hodnoty MDA na hladině spolehlivosti 95% a pro dobu měření spektra 2 minuty. Tato doba měření byla zvolena jako základ k úvahám jednak proto, že samotný přenos spektra z MCA trvá cca 1 minutu, jednak i pro to, že stejná doba měření je uvažována v (Rulík 2006). Hodnoty takto stanovených MDA v (Bq) jsou přehledně uvedeny v tab. 9. Výsledné minimální detekovatelné objemové resp. hmotnostní aktivity pak získáme podělením uvedené MDA objemem resp. hmotností daného vzorku.

### ***Aerosoly***

V části 5.2 bylo doloženo, že kritériem pro dodržení podmínek citlivosti měření pro všechny radionuklidy je podmínka, aby objemová aktivita  $^{137}\text{Cs}$  v aerosolu byla měřena s minimální detekovatelnou objemovou aktivitou  $0,1 \text{ Bq/m}^3$ . Z tab. 8 (geometrie F1) je zřejmé, že pro dobu měření spektra 2 minuty bude uvedené kritérium splněno, pokud měřeným filtrem bude prosáto nejméně  $22 \text{ m}^3$  vzduchu.

Odběrové zařízení Hunter JL-150 (viz část 5.3) umožňuje rychlost prosávání vzduchu filtrem nominálním průtokem  $150 \text{ m}^3/\text{h}$ , požadovaných  $22 \text{ m}^3$  vzduchu tudíž odpovídá době odběru cca 9 minut.

Bude-li nutné na měřicím místě kontinuálně sledovat změny objemové aktivity aerosolu režimem odběru vzorku a jeho následným měřením, pak je třeba zachovat pravidlo odvozené v části 5.3, tj. zachovat poměru těchto dob 2:1. V tab. 10 jsou uvedeny výsledné hodnoty  $MDa_V$  na hladině spolehlivosti 95% pro objemovou aktivitu  $^{137}\text{Cs}$  v aerosolu pro různé volby doby odběru vzorku a doby měření. Pro stanovení  $MDa_V$  byla uvažována nominální rychlost vzduchu filtrem  $150 \text{ m}^3/\text{h} = 2,5 \text{ m}^3/\text{min}$  a měření bylo předpokládáno v geometrii složeného filtru kolem detektoru (označena F1, viz část 5.5). Z praktických důvodů byl jako režim s maximální frekvencí odběru a měření uvažován režim 10 min odběru a 5 minut měření.

Tab. 9. Hodnoty minimální detekovatelné aktivity MDA pro tři uvažované geometrie měření, 95% hladina spolehlivosti, detektor D1, doba měření spektra 2 minuty.

radionuklid	energie fotonů (keV)	MDA (Bq)		
		F1	L1	MA
Ba-140	537,3	6,9	21,0	8,7
Cs-134	604,7	2,2	6,8	2,9
Cs-137	661,7	2,2	6,6	2,8
I-131	364,5	1,9	6,0	2,4
I-132	772,6	2,8	8,2	3,5
I-133	529,9	2,0	6,1	2,5
I-134	847,0	2,2	6,6	2,9
I-135	1260,4	9,4	27,0	12,0
La-140	1596,2	3,4	9,4	4,3
Mo-99	739,6	16,0	49,0	21,0
Nb-95	765,8	2,0	6,1	2,6
Rh-105	318,9	8,1	25,0	9,8
Ru-103	497,1	1,9	5,7	2,3
Ru-105	724,3	4,2	13,0	5,4
Sb-127	685,8	5,4	16,0	6,9
Sb-129	812,9	4,9	15,0	6,3
Sr-91	1024,3	7,1	21,0	9,2
Tc-99m	140,5	1,4	4,6	1,7
Te-132	228,2	1,6	5,1	1,9
Y-90m	202,5	1,3	4,5	1,7
Y-91m	555,6	1,8	5,5	2,3
Zr-95	756,7	3,6	11,0	4,7
Zr-97	743,4	2,1	6,3	2,7

Tab. 10. Výsledné hodnoty  $MDa_V$   $^{137}\text{Cs}$  pro různé doby odběru a měření vzorků aerosolu při kontinuálním režimu.

doba odběru (min)	objem vzduchu ( $\text{m}^3$ )	doba měření (min)	MDA (Bq)	$MDa_V$ (Bq/ $\text{m}^3$ )
10	25	5	1,10	4,4E-02
20	50	10	0,68	1,4E-02
40	100	20	0,44	4,4E-03
80	200	40	0,28	1,4E-03
160	400	80	0,19	4,8E-04

Výsledky uvedené v tab. 10 jsou v souladu s odhady provedenými v metodice (VDMI074, 2003).

Závěr: Legislativní podmínky pro citlivost měření objemových aktivit radionuklidů ve vzdušném aerosolu budou splněny, pokud:

1. Doba měření spektra bude nejméně 2 minuty a současně objem prosátého vzduchu filtrem bude větší než  $22 \text{ m}^3$ .
2. Při kontinuálním sledování změn radiační situace režimem odběru vzorku a jeho následným měřením bude doba odběru vzorku nejméně 10 minut a doba měření bude vždy rovna  $\frac{1}{2}$  doby odběru.

#### ***Ostatní vzorky složek životního prostředí***

V závěru části 5.4 byly uvedeny následující požadavky na minimální detekovatelné (hmotnostní nebo objemové) aktivity vyplývající z legislativy:

- a) pro izotopy jódu - 150 Bq/kg resp. Bq/l,
- b) pro všechny ostatní radionuklidy s poločasem přeměny delším než 10 dní, zejména  $^{134}\text{Cs}$  a  $^{137}\text{Cs}$  (kromě  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) – 400 Bq/kg resp. Bq/l.

Z tab. 8 vyplývá, že geometrii L1 (horší citlivost oproti geometrii MA) přísluší ze všech izotopů jódu největší hodnota MDA izotopu  $^{135}\text{I}$ , a to 27 Bq. V případě nejmenšího objemu vzorku 0,25 l resp. hmotnosti 0,25 kg bude minimální objemová resp.

hmotnostní aktivita 27/0,25, tj. 108 Bq/l resp. 108 Bq/kg. Podmínka ad a) bude tedy při době měření spektra 2 minuty s rezervou splněna pro obě uvažované geometrie měření L1 a MA, pokud objem vzorku bude větší než 0,25 l.

Z ostatních radionuklidů – mimo izotopy jódu a pro úplnost i včetně radionuklidů s poločasem přeměny kratším než 10 dnů – je největší MDA v geometrii L1 pro <sup>99</sup>Mo, a to 49 Bq. Pro objem vzorku 0,25 l resp. hmotnost 0,25 kg bude minimální objemová resp. hmotnostní aktivita 49/0,25, tj. 196 Bq/l resp. 196 Bq/kg.

Závěr: Podmínka ad b) bude tedy při době měření spektra 2 minuty s rezervou splněna pro obě uvažované geometrie měření L1 a MA a všechny uvažované radionuklidy (včetně radionuklidů s poločasem přeměny kratším než 10 dnů), pokud objem vzorku bude větší než 0,25 l.

Na závěr části 5 shrňme zjištěné nutné podmínky pro optimalizaci provozu spektrometrické laboratoře. Vzhledem k tomu, že podmínky byly stanoveny na základě vlastností detektoru D1, tj. detektoru s nejmenší účinností, platí uvedené podmínky obecně pro všechny detektory používané ve spektrometrické laboratoři.

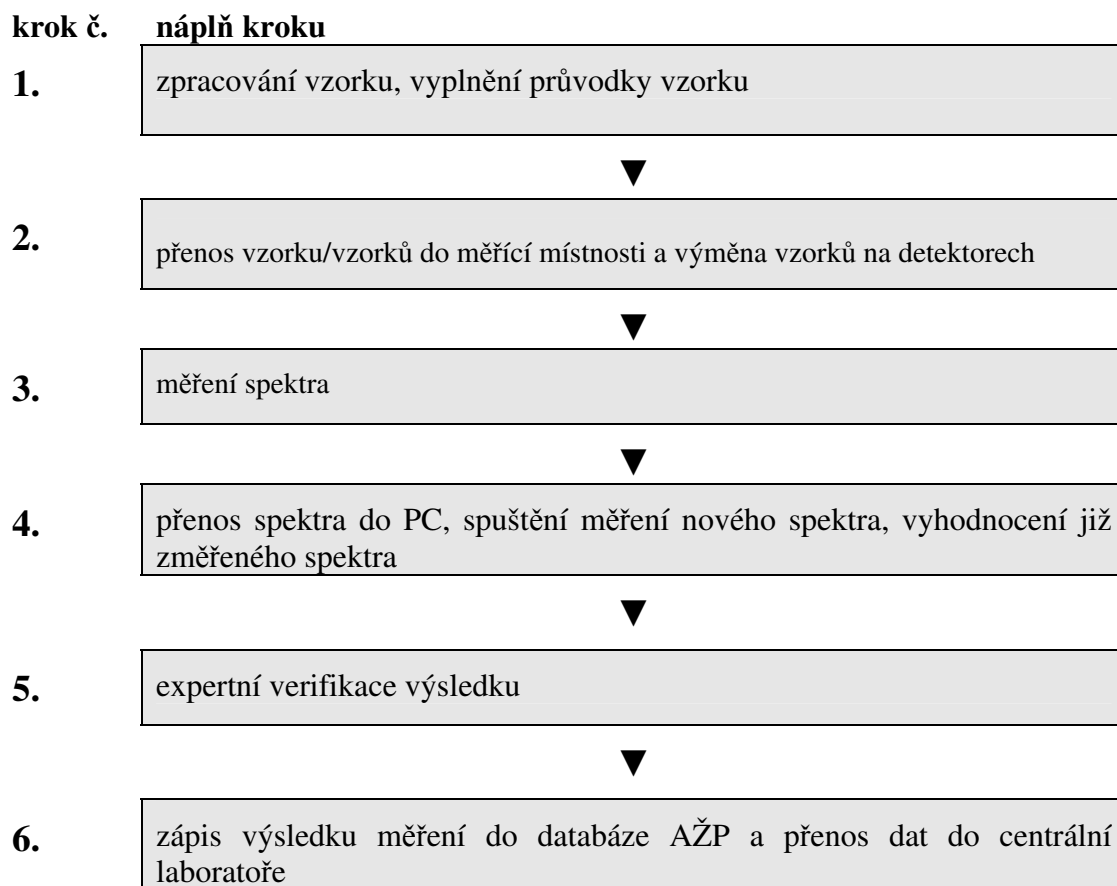
**Legislativní podmínky vztahující se k citlivosti měření vzorků metodou spektrometrie gama za mimořádné radiační situace budou splněny, pokud v uvažovaných geometriích měření bude spektrum měřeno na libovolném z provozovaných detektorů po dobu nejméně 2 minuty a současně:**

- a) **objem vzduchu prosátý aerosolovým filtrem bude nejméně 22 m<sup>3</sup>,**
- b) **objem resp. hmotnost ostatních vzorků bude nejméně 0,25 l resp. 0,25 kg.**

## **6. Podrobný popis provozu laboratoře**

Celý proces, počínaje přípravou vzorku a konče uložením výsledků do databáze, byl pro účely jeho optimalizace rozložen do 6 kroků dle schématu uvedeného na obr. 16. V dalším postupu budou podrobně analyzovány jednotlivé kroky a v závěru kapitoly bude - na základě výsledků analýzy – navržen optimální režim tak, aby byl prakticky

realizovatelný a při tom umožnil co největší počet vzorků kompletně prošlých celým procesem.



Obr. 16. Jednotlivé kroky procesu přípravy vzorků a jejich měření v laboratoři.

### 6.1 Zpracování vzorku

V případě aerosolového filtru spočívá jeho příprava ve složení filtru, jeho zatavení do PE folie, označení vzorku číslem a umístění na přípravek k měření.

V případě ostatních vzorků životního prostředí pak příprava vzorku znamená:

- a) volbu vhodné vzorkovnice – PE lavička 0,25 l (v počtu od 1 do 6 kusů) nebo Marinelliho nádoba o objemu 0,5 l, zvážení prázdné vzorkovnice,
- b) naplnění vzorkovnice vzorkem,

- c) zvážení vzorkovnice se vzorkem, její uzavření a zápis hmotnosti do průvodky vzorku,
- d) otření vzorkovnice a popis vzorkovnice číslem vzorku.

Každý vzorek bude označen číslem, jenž bude jeho unikátním identifikátorem. U každého vzorku je nutné vyplnit průvodku vzorku – formulář velikosti A4, který vzorek provází celým procesem až po zápis výsledku měření do databáze, poté je průvodka archivována. Formulář zadaný centrální laboratoří RMS je uveden v Příloze 1 této diplomové práce, pozměněný pro laboratoř RC SÚJB České Budějovice. Radionuklidy, jež mají být ve vzorcích stanovovány, budou pro konkrétní situaci určeny centrální laboratoří, uvedené tři radionuklidy v průvodce slouží pouze jako příklad.

V zájmu zabránění kontaminace pracoviště je nutné, aby se s dovezenými vzorky manipulovalo pouze v prostorách laboratoře k tomu vyhrazených a aby pracovníci připravující vzorky nevstupovali do měřicí místnosti.

Na základě zkušeností z dosavadního provozu laboratoře (Šindelková, 2007) lze odhadnout, že celý výše popsany proces přípravy vzorku vyžaduje 10 až 15 minut, je-li prováděn jednou osobou. Přibližně 1/3 z uvedené doby je třeba rezervovat na ruční vypsání všech údajů o vzorku do průvodky vzorku. Na zajištění tohoto kroku procesu se může podílet více osob. Pokud tomu tak bude, lze čas potřebný pro tento krok úměrně počtu osob zkrátit.

## **6.2 Přenos vzorků do měřicí místnosti a výměna vzorku na detektorech**

Zpracování vzorků popsané v 6.1 se provádí v laboratoři RC SÚJB ve 2. nadzemním podlaží, měření se provádí v měřicí místnosti spektrometrie gama v 1. nadzemním podlaží. Je proto nutné zajistit přenos vzorků připravených k měření do měřicí místnosti. Vzorky lze přenášet v přeprávkách a lze použít nákladního výtahu. Osoba či osoby zajišťující tento přenos budou zároveň vyměňovat vzorky na jednotlivých detektorech a zapisovat do průvodky údaje (detektor, geometrie měření a doba měření, viz Příloha 1). Vlastní transport vzorků jednou osobou vyžaduje cca 4 až 5 minut, výměna vzorku na jednom detektoru spolu se zápisem údajů o měření do průvodky pak trvá cca 2 minuty. Teoreticky může tuto část procesu zajišťovat více osob než jedna.



Prakticky to však nebude potřeba, při transportu nejméně 5 vzorků se potřebný čas na transport jednoho vzorku významně zkrátí a spolu s 2 minutami na výměnu vzorku a zápis údajů lze celkový čas odhadnout na cca 3 minuty.

### **6.3 Měření spektra**

V závěru části 5 byly stanoveny podmínky, ze kterých vyplývá, že doba měření spektra musí být minimálně 2 minuty. Měření spektra je jediný krok z celé operace, který probíhá automaticky a nevyžaduje žádnou pracovní sílu. Měření spektra lze teoreticky provádět najednou na celkem 5 detektorech.

### **6.4 Přenos spektra do PC, vyhodnocení spektra**

V programovém vybavení GAMAT V4.0 je třeba v menu pro přenos zadat číslo přenášeného spektra, číslo detektoru, geometrii měřeného vzorku a část paměti analyzátoru. Textová popisová část vzorku nebude v případě měření za mimořádné radiační situace vyplňována, všechny údaje budou na průvodce vzorku.

Vlastní přenos spektra délky 4096 kanálů z analyzátoru MCA 35+ do PC (rychlost 9600 bps) trvá cca 45 s. Vyhodnocení kvalitativní analýzy spektra pak představuje jen zadání čísla spektra, vyhodnocení hmotnostní resp. objemové aktivity pak vyžaduje v kvantitativní analýze zadání množství vzorku a příslušných jednotek, s následným zadáním konkrétní knihovny radionuklidů, jež budou ve vzorku stanovovány.

Přestože průvodka vzorku předpokládá, že výsledek měření konkrétních radionuklidů uvedených na průvodce bude do ní přepsán z obrazovky PC, zdá se provedení zápisu v tomto kroku příliš zdržujícím, zejména, je-li – pouhým stlačením klávesy – k dispozici tisk kompletního výsledku stanovení obsahu radionuklidů v měřeném vzorku. Proto za jednoznačně vhodnější řešení je nutné považovat výtisk výsledků a jejich přepis do průvodky jinou osobou a v jiném kroku (viz část 6.5 níže).

Knihovnu radionuklidů v případě mimořádné radiační situace určí centrální laboratoř (Státní ústav radiační ochrany Praha). Na obr. 17 je uvedena knihovna určená centrální laboratoří pro praktické testování kapacit jednotlivých laboratoří v r. 2007, ve formě programového vybavení GAMAT V4.0 je označena „UMC“. (Pro účely testování



k přenosu a vyhodnocování spekter bude použit více než 1 PC ! Pokud však budeme chtít zabránit ztrátovým dobám při výměně vzorků na detektoru, pak se jeví vhodným použít k měření 2 detektory, poněvadž během výměny vzorku na jednom detektoru (trvá cca 1 minutu, viz 6.2 výše) může již probíhat sběr spektra na druhém detektoru.

Při uvažovaném použití dvou detektorů se nabízí teoretická možnost použít pro každý detektor jinou měřící dobu, úměrnou účinnosti detektoru. Tato volba by však pro toho, kdo bude zajišťovat spouštění měření spekter, jejich přenosy do MCA a vyhodnocení na PC, představovala další časovou náročnost, navíc by mohla být zdrojem možných chyb a především by negativně ovlivnila plynulost celého procesu. Z uvedených důvodů se zdá být rozumným řešením nastavení stejné doby měření, bez ohledu na to, na kterém detektoru je měření prováděno.

Uvažované použití pouze dvou detektorů při měření za radiační mimořádné situace má nesporný význam rovněž v tom, že v případě použití detektorů s nižší účinností (v konkrétním vybavení detektory D1, D3 a D4), lze detektory s vysokou účinností (D5 a D6) a případně i jejich stínění vhodným způsobem zakonzervovat (např. zabalením do PE folií) tak, aby nedošlo k jejich kontaminaci. I přes přísný režim v laboratoři nelze tuto kontaminaci vyloučit a to zejména proto, že obsahy radionuklidů v měřených vzorcích budou o několik řádů větší než je tomu za normální radiační situace.

Při volbě výběru dvou detektorů z uvažovaných třech pro použití za radiační mimořádné situace se jednoznačně jako vhodné jeví použití detektorů D3 a D4, protože tyto detektory jsou ve stávajícím vybavení propojeny s jedním MCA a jsou umístěny ve stíněných situovaných těsně vedle sebe. Tyto okolnosti jsou příznivé nejen pro samotnou výměnu vzorků na detektorech, ale i pro ovládání MCA.

Z časových snímků při testování tohoto kroku v laboratoři vyplývá, že minimální doba potřebná pro přenos spektra a jeho vyhodnocení bude cca 3 minuty. Nelze však dobře předpokládat, že by tento krok s intervalem 3 minuty mohl být nepřetržitě a po celou směnu prováděn pouze jedním pracovníkem, a to především pro značnou psychickou zátěž v takovém režimu. Za náročnou, ale prakticky schůdnou volbu lze pokládat volbu

intervalu tohoto kroku 4 minuty s tím, že pro tuto činnost budou k dispozici 2 pracovníci střídající se v průběhu směny.

Náplň diskutovaného kroku, spolu s časovým snímkem jednotlivých kroků operací, byla testována na archivovaném vzorku půdy odebraném dne 23.6.1986, tj. po černobylském spadu, v okrese Č. Krumlov, lokalita Horní Planá. Výsledky měření spektra na detektoru D1, v geometrii L1 (6 vzorkovnic objemu 0,25 l okolo detektoru) po dobu 5 minut jsou uvedeny na obr. 18. Plošná aktivita půdy (jednalo se o odběr z plochy 0,09 m<sup>2</sup>) je stanovena zpětně k době odběru vzorku. Je patrné, že pětiminutový sběr spektra ještě dnes dovoluje ve vzorku půdy odebraném téměř před 21 roky stanovit plošnou kontaminaci půdy <sup>137</sup>Cs (1,28 kBq/m<sup>2</sup>) a rovněž dovoluje stanovit plošné aktivity přírodních radionuklidů, a to <sup>40</sup>K a radionuklidů z uran-radiové (<sup>214</sup>Pb a <sup>214</sup>Bi) a thoriové řady (<sup>208</sup>Tl).

```

SUJB RC Ceske Budejovice
*****
*
*                               Kvantitativni analiza
*
***** GAMAT *****
* Spektrum   : C15                * Detektor   : D1                * Doba mereni: 300 s
* Mnozstvi   : .09 m2            * Geometrie  : L1                * Knihovna   : UMC
* Dat/cas mereni: 30.03.2007/16:34 * Refer. dat/cas: 23.06.1986/12:00
* Rozpad     : 7585.19 d
* Dat.en.kalib. : 16.02.2007      * Dat.uc.kalib. : 01.04.2005

  Nuklid      Energie      Integral      Plocha      Aktivita      Chyba
              (keV)
-----
BI-214        609.6           113           101         1.018E+03#    1.86E+02
CS-137        662.0           153           136         1.282E+03     2.00E+02
K-40          1461.1          224           216         1.863E+04#    2.20E+03
PB-214        352.4           137           102         8.778E+02#    1.84E+02
TL-208        583.4            75            57         3.035E+02#    8.24E+01
# odedteno pozadi

30.03.2007*16:51
*****

```

Obr. 18. Výsledek stanovení plošné aktivity půdy při testu.

### **6.5 Verifikace výsledku stanovení radionuklidů v měřeném vzorku**

Tento krok procesu představuje výstupní kontrolu výsledku stanovení obsahu radionuklidů v měřeném vzorku. Tuto činnost může provádět jen pracovník s dlouholetou zkušeností v oblasti spektrometrie gama („expert“), protože pouze takový je schopen odhalit zjevný artefakt ve výsledku, kterým může být např. nesprávné zadání množství vzorku, chybně zadaná knihovna radionuklidů apod.. Na verifikaci jednoho výsledku je nutné plánovat 2 až 3 minuty.

Verifikaci lze v zásadě provádět dvěma způsoby:

- a) kontrolou vytištěného výsledku a jeho přepsáním do průvodky vzorku,
- b) pouhou verifikací výsledku s tím, že přepsání výsledků bude provedeno jinou osobou v dalším kroku.

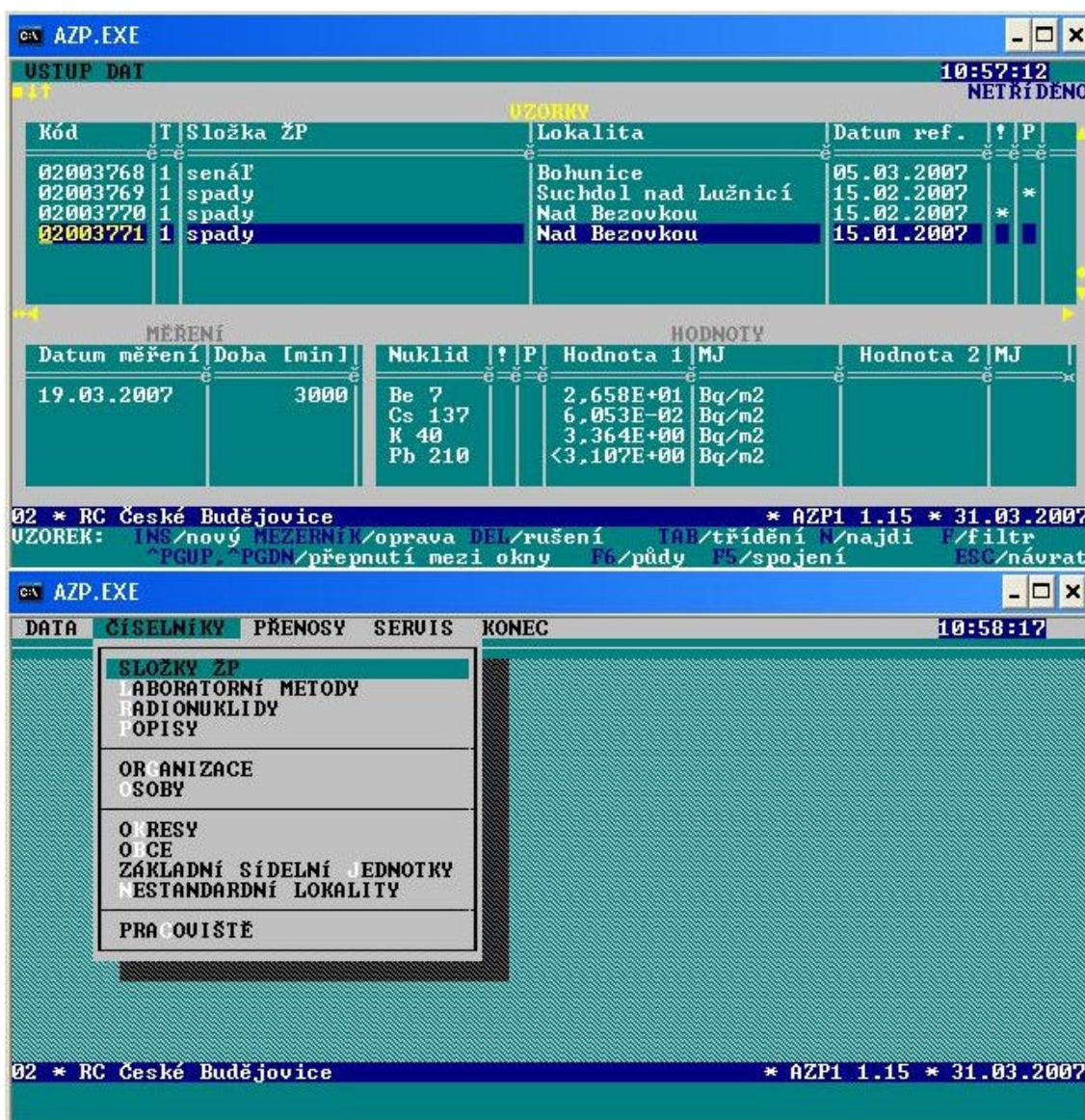
Dalším krokem v celém procesu je však zápis výsledku do databáze AŽP, který by v případě volby ad b) musel být prováděn zkušeným pracovníkem, což nelze považovat za vhodné jednak proto, že laboratoř disponuje pouze dvěma zkušenými experty (třeba pamatovat na vícesměnný provoz !), jednak i proto, že zápisu do databáze se lze, na rozdíl od získání potřebných zkušeností k verifikaci, v nesrovnatelně kratší době naučit. Proto jednoznačně přijatelnějším řešením je volba ad a). Nelze rovněž opomenout skutečnost, že forma přepsání výsledku je z psychického hlediska kontrolujícího kvalitnější formou kontroly než forma pouhého prohlédnutí.

### **6.6 Zápis výsledku do databáze AŽP a přenos dat do centrální laboratoře**

Program AŽP (zkratka pro „aktivitu životního prostředí“) slouží k ukládání a archivování výsledků změřených jednotlivými laboratořemi radiační monitorovací sítě jednotným způsobem, umožňuje přenos dat do centrální laboratoře, za účelem jejich dalšího zpracování. Dvě základní obrazovky programu AŽP jsou na obr. 19.

Z ukázky je zřejmé, že do programu se vkládají kompletní údaje o vzorku (složka ŽP, druh, lokalita, datum odběru), o měření (datum, doba měření) a o výsledcích měření (aktivity, případně minimální detekovatelné aktivity zadaných radionuklidů). Ve spodní

polovině obr. 10 je patrné, že pro zadání (určení) místa, metody, radionuklidů atd. existuje řada číselníků pro identifikaci příslušného atributu. Zaučený, avšak s tímto



Obr. 19. Ukázka programu AŽP.

programem málo zkušený uživatel, pak musí vyhledávat příslušný kód atributu v číselnících. Testováním této činnosti (tohoto kroku celého procesu) bylo zjištěno, že velmi zkušený uživatel potřebuje k uložení údajů o jednom vzorku cca 5 minut, zaškolený, avšak příliš nezkušený uživatel, pak nejméně 10 minut. Protože vkládání údajů lze provádět pouze na jednom PC (k tomu je určen PC měřícího místa sítě

včasného zjištění), nelze tento proces zkrátit ani v případě dispozice více pracovníky. Z uvedeného vyplývá, že porovnáním s předešlymi kroky, je tento krok jednoznačně časově nejnáročnější.

## **7. Návrh optimálního režimu provozu spektrometrické laboratoře**

### **7.1 Souhrn parametrů ovlivňujících provoz laboratoře**

Optimálním režimem provozu spektrometrické laboratoře – jak již bylo v úvodu kapitoly 6 řečeno – rozumíme takový režim, jenž

- a) splní legislativní požadavky kladené na citlivost měření,
- b) je v daných podmínkách laboratoře realizovatelný,
- c) umožní co největší množství vzorků prošlých za jednotku času celým procesem,
- d) je ve všech krocích průběžně vykonávaný všemi na procesu zúčastněnými osobami po dobu jedné pracovní směny délky 8 hodin.

Podmínka ad d) je důležitým požadavkem na plynulost celého procesu, jednotlivé kroky musí na sebe bez časových ztrát navazovat. Jinými slovy: Pracovní činnost spojená s výkonem jednotlivých kroků procesu nesmí vykazovat zbytečné prostoje, ani nesmí být vykonávána v časovém stresu „nestíhání“. Z tohoto důvodu musí zvažované časové náročnosti na jednotlivé kroky v sobě obsahovat rozumnou míru konservatismu.

V souladu se závěry v části 6.4 budeme v dané přístrojové dispozici laboratoře uvažovat využití detektorů označených D3 a D4.

Časové náročnosti jednotlivých kroků, vyplývající z výše provedené analýzy, jsou uvedeny přehledně v tab. 11.

Z tab. 11 vyplývá, že z hlediska času je nejnáročnější a celý proces jednoznačně limitující krok č. 6, který navíc nelze zkrátit výkonem více osobami, protože více osob nemůže na jednom PC najednou vkládat výsledky do databáze AŽP. Doba potřebná na tento krok, pokud je vykonáván pouze zaučeným zapisovatelem, je dokonce více než dvojnásobná než doba pro krok č. 4, jenž rovněž nelze zkrátit výkonem více osobami.

Proto z důvodu problematiky posledního kroku procesu byl návrh optimálního provozu laboratoře zpracován ve dvou variantách, a to variantě A – se zkušeným zapisovatelem do databáze AŽP a variantě B – s méně zkušeným resp. pouze zaučeným zapisovatelem do databáze AŽP.

Tab. 11. Časová náročnost jednotlivých kroků (na jeden vzorek a jednu osobu)

krok č.	náplň kroku	čas na 1 vzorek a 1 osobu (minuty)	poznámka
1.	zpracování vzorku, vyplnění průvodky vzorku	10	<u>lze</u> zkrátit provedením více osobami
2.	přenos vzorku/vzorků do měřicí místnosti a výměna vzorků na detektorech, zápis do průvodky	3	při přenosu cca 5 vzorků najednou
3.	měření spektra	2	minimum nutné pro dosažení požadované MDA
4.	přenos spektra do PC, spuštění měření nového spektra, vyhodnocení již změřeného spektra, výtisk výsledku	4	<u>nelze</u> zkrátit výkonem více osobami
5.	expertní verifikace výsledku, zápis výsledku do průvodky	3	<u>lze</u> zkrátit při výkonu více osobami
6.	zápis výsledku měření do databáze AŽP a přenos dat do centrální laboratoře	10 (5)	zaučený zapisovatel (zkušený zapisovatel) <u>nelze</u> zkrátit výkonem více osobami,

## 7.2 Návrh optimálního režimu provozu laboratoře – varianta A

Ze souhrnu parametrů ovlivňujících provoz laboratoře uvedených v tab. 11 vyplývá, že v případě zkušeného zapisovatele do databáze AŽP lze tento krok zkrátit na 5 minut a tato doba bude limitující dobou pro všechny ostatní kroky procesu. Počet potřebných osob pro celý proces, kdy bude každých 5 minut průběžně po dobu celé směny generován nový výsledek celého procesu je pak uveden v tab. 12.



Tab. 12. Počet osob pro zajištění celého procesu – **varianta A** (5 minut/vzorek)

krok č.	náplň kroku	počet osob	poznámka
1.	zpracování vzorku, vyplnění průvodky vzorku	3	
2.	přenos vzorku/vzorků do měřicí místnosti a výměna vzorků na detektorech, zápis do průvodky	1	
3.	měření spektra, 2 detektory	-	doba měření 4 minuty
4.	přenos spektra do PC, spuštění měření nového spektra, vyhodnocení již změřeného spektra, výtisk výsledku	2	střídání v průběhu směny
5.	expertní verifikace výsledku, zápis výsledku do průvodky	1	
6.	zápis výsledku měření do databáze AŽP a přenos dat do centrální laboratoře	2	střídání v průběhu směny
<b>celkem</b>		<b>9</b>	

Tato varianta A tudíž znamená, že celým procesem prováděným 9 osobami projde  $480/5=96$  vzorků za osmihodinovou směnu

Z porovnání tab. 11 a 12 pak vyplývá:

- a) Kroky č. 1 a 2 budou realizovány s určitou rezervou, kterou lze využít pro nutný oddech zúčastněných osob. Není proto nutné u těchto kroků zajistit střídání osob.
- b) Doba měření spektra je volena 4 minuty namísto plných 5 minut, protože je nutné počítat s dobou pro průběžnou kontrolu pozadí (lze odhadnout cca 1x/hodinu) i s dobou nutnou pro řešení eventuálních neplánovaných zdržení.
- c) Nelze dobře předpokládat, že psychicky náročné kroky č. 4 a 6 bude moci jedna osoba vykonávat nepřetržitě po celou směnu, proto je navrženo pro tyto činnosti pravidelné střídání dvou osob.

- d) Pro experta provádějícího verifikaci a zápis výsledku do průvodky (potřebná doba cca 3 minuty/vzorek) nepředstavuje pětiminutový cyklus nepřetržitou zátěž, proto zde nebylo uvažováno střídání.

### 7.3 Návrh optimálního režimu provozu laboratoře – varianta B

Tato varianta je vynucenou alternativou varianty A pro případ, že zápis do databáze AŽP bude prováděn nezkušeným zapisovatelem po dobu cca 10 minut. V tomto případě bude počet zpracovaných, změřených, vyhodnocených a do databáze zapsaných vzorků poloviční oproti variantě A, tj. pouze 48 vzorků za osmihodinovou směnu. Počet osob potřebných pro tuto variantu bude - v důsledku dvojnásobného prodloužení posledního kroku procesu – menší (tab. 13), protože zpracování vzorků stihnou pohodlně dvě osoby a rovněž nebude nutné střídání při obsluze PC (krok č. 4).

Tab. 13. Počet osob pro zajištění celého procesu – **varianta B** (10 minut/vzorek)

krok č.	náplň kroku	počet osob	poznámka
1.	zpracování vzorku, vyplnění průvodky vzorku	2	
2.	přenos vzorku/vzorků do měřicí místnosti a výměna vzorků na detektorech, zápis do průvodky	1	
3.	měření spektra, 2 detektory	-	doba měření 5 minut
4.	přenos spektra do PC, spuštění měření nového spektra, vyhodnocení již změřeného spektra, výtisk výsledku	1	
5.	expertní verifikace výsledku, zápis výsledku do průvodky	1	
6.	zápis výsledku měření do databáze AŽP a přenos dat do centrální laboratoře	2	střídání v průběhu směny
<b>celkem</b>		<b>7</b>	

### 7.4 Další možné varianty režimu provozu laboratoře

Doposud jsme uvažovali použití pouze dvou detektorů (D3 a D4) ve spojení s jedním mnohakanálovým analyzátozem MCA35Plus a jedním PC pro přenos a vyhodnocování spekter. Vybavení laboratoře však umožňuje i alternativu, při které by byly využity

další dva detektory s dalším MCA35Plus a vyhodnocovacím PC. V tomto případě by se jednalo o detektory D1 a D2 (po dostavbě stínění, viz tab. 4), detektory s největší účinnosti (D5 a D6) by i v této variantě zůstaly zakonzervovány.

Tato varianta by zdvojnásobila počet vzorků oproti variantě A – 192 vzorků za 8 hodinovou směnu, při jen cca 50% nárůstu počtu osob. Přehled je uvedený v tab. 14, nutným předpokladem realizace této varianty je však jiný způsob přenosu výsledků do centrální laboratoře než zápisem do databáze AŽP.

Eventuálním jiným způsobem přenosu výsledků je využití automatického ukládání výsledků do havarijní databáze Access programem GAMAT V4.0, demonstrativní příklady a detaily jsou uvedeny v Příloze 2 této práce. V případě, že by se uvedená havarijní databáze doplnila o další atributy vzorku (druh vzorku, místo a datum odběru), obsahovala by pak i všechny nutné údaje z průvodky. Problematika této varianty je však v tom, že sice může výrazně zvýšit kapacitu laboratoře RC SÚJB, avšak nese sebou potíže, protože program AŽP nebude moci být použit k automatickému zpracování výsledků v centrální laboratoři SÚRO – do databáze AŽP by musely být výsledky v centrální laboratoři opět manuálně přepsány z havarijní databáze Access.

Tab. 14. Počet osob pro zajištění celého procesu – **varianta C** (2,5 minuty/vzorek)

krok č.	náplň kroku	počet osob	poznámka
1.	zpracování vzorku, vyplnění průvodky vzorku	5	
2.	přenos vzorku/vzorků do měřicí místnosti a výměna vzorků na detektorech, zápis do průvodky	2	
3.	měření spektra, 4 detektory	-	doba měření 4 minuty
4.	přenos spektra do PC, spuštění měření nového spektra, vyhodnocení již změřeného spektra, výtisk výsledku	3	střídání v průběhu směny
5.	expertní verifikace výsledku, zápis výsledku do průvodky, <b>jiný způsob předání výsledků do SÚRO</b>	3	využití havarijní databáze Access, střídání v průběhu směny
<b>celkem</b>		<b>13</b>	

### **7.5 Personální dispozice laboratoře SÚJB RC Č. Budějovice**

Úvahy o optimálním provozu laboratorní skupiny SÚJB RC České Budějovice za mimořádné radiační situace musí být nedílně spojeny s personálními dispozicemi této laboratorní skupiny resp. této laboratorní skupiny posílené ostatními v úvahu připadajícími pracovníky, ať již se jedná o pracovníky SÚJB RC České Budějovice nebo pracovníky jiných RC SÚJB. Konkrétní úkoly laboratorní skupiny nutno chápat v kontextu činnosti celé radiační monitorovací sítě ČR a tato činnost bude podřízena konkrétnímu typu radiační mimořádné situace.

Lze předpokládat, že mimořádná radiační situace vyžadující aktivaci celé radiační monitorovací sítě ČR vznikne ve dvou případech :

- a) Bude vyvolána mimořádnou událostí 3. stupně na některé ze dvou jaderných elektráren ČR (Dukovany, Temelín), tj. událostí, která bude vyžadovat opatření na ochranu obyvatel (§ 98, odst.1, písm a), b) vyhl. č. 307/2002Sb., ve znění vyhl. č.499/2006Sb.),
- b) bude vyvolána podobnou událostí jako v ad a), ale na jaderném zařízení mimo území ČR, avšak s vlivem na území ČR.

V případě události ad a) bude rozhodujícím úkolem celé radiační monitorovací sítě ČR řízené SÚJB provést rychlé monitorování v zasažené části území republiky (především v tzv. zóně havarijního plánování v okolí jaderné elektrárny) za účelem doporučení neodkladných ochranných opatření (§ 5 odst. 3, písm. d) vyhl. č. 319/2002Sb., ve znění vyhl. č.27/2006 Sb.), zejména evakuace obyvatel, pokud ji situace bude vyžadovat. V této fázi, trvající cca 48 hodin po vzniku události, se budou především angažovat letecké a mobilní skupiny. Výrazné vytížení laboratorních skupin nastane až v další fázi, kdy bude třeba navrhnout následná ochranná opatření především regulace požívání kontaminovaných potravin a vody a regulace používání kontaminovaných krmiv (§ 5 odst. 3, písm. d) vyhl. č. 319/2002Sb., ve znění vyhl. č.27/2006 Sb), která již budou vyžadovat podrobné znalosti o obsahu radioaktivních látek ve složkách životního prostředí. Mobilní skupiny budou v této fázi zajišťovat sběr a svoz vzorků ke zpracování a vyhodnocení laboratorními skupinami.

V případě události ad b) přicházejí reálně v úvahu pouze následná ochranná opatření se značnou angažovaností laboratorních skupin při stanovování obsahu radionuklidů v potravinách a krmivech. Mobilní skupiny budou, obdobně jako ve druhé fázi události ad a), zajišťovat sběr a soz vzorků ke zpracování a vyhodnocení laboratorními skupinami.

SÚJB RC České Budějovice má v případě mimořádné radiační situace zajišťovat i dvě mobilní skupiny (viz část 2.2) po 2 osobách. Tyto celkem 4 osoby jsou zároveň připravovány pro činnost laboratoře a navíc, dvě z nich jsou jedinými zkušenými experty v oboru spektrometrie gama, kterými RC disponuje.

Resort SÚJB disponuje celkem 18 mobilními skupinami (2 mobilní skupiny v každém z 8 RC a 2 v SÚRO) a celkem 3 laboratorními skupinami (SÚRO H. Králové, SÚRO Ostrava a RC SÚJB Č. Budějovice).

Uvedené skutečnosti pak vedou jednoznačně k závěru, že RC SÚJB Č. Budějovice nemůže zodpovědným způsobem zajistit v průběhu celé mimořádné radiační situace současně provoz obou mobilních skupin a provoz laboratorní skupiny. V krajním případě může RC SÚJB Č. Budějovice zajistit plně činnost mobilních skupin v prvních dvou dnech mimořádné radiační situace typu ad a) výše.

Dostatečný počet mobilních skupin v resortu SÚJB však dovoluje jejich rozdělení při monitorování na území ČR tak, aby v případě RC SÚJB v Č. Budějovicích byla za mimořádné radiační situace – nebo v některých fázích této situace - upřednostněna činnost laboratorní skupiny a úkoly pro mobilní skupinu byly zajišťovány podporou mobilních skupin z ostatních RC SÚJB. Na základě tohoto předpokladu budeme konkretizovat personální složení laboratorní skupiny RC SÚJB v Č. Budějovicích. Z tab. 12 vyplývá, že základní uvažovaná varianta A provozu laboratoře vyžaduje v jedné směně celkem 9 osob, z nichž jedna osoba je zkušeným expertem v oboru spektrometrie gama a zbylých 8 osob jsou osoby zaučené a cvičené pro výkon jednotlivých kroků procesu. Provoz laboratoře je třeba zajistit nepřetržitý a tudíž ve směnách. Délka směny pak určuje celkový počet pracovníků nutných k zajištění provozu laboratoře, tj. v případě 12 hodinové směny je třeba k dispozici 2 experty + 16

ostatních pracovníků, v případě 8 hodinové směny pak 3+24 pracovníků. Je tudíž zřejmé, že provoz je v obou případech velmi náročný na počet pracovníků a jedná se o počty, které nemohou být pokryty vlastními silami SÚJB RC České Budějovice (celkem 10 osob). Přehled pracovníků, jež jsou k dispozici pro zajištění provozu laboratorní skupiny je uveden v tab. 15 (Šindelková, 2007).

Tab. 15. Personální dispozice SÚJB RC CB pro zajištění provozu laboratorní skupiny

typ	pracovníci jmenovitě	počet celkem
expertní pracovník	Šindelková, Havránek	2
zaučený pracovník	Zeman, Hálová, Kobzev, Macháčová, Beranová, Brhel	6

Z tab. 15 je zřejmé, že SÚJB RC České Budějovice disponuje pouze osmi osobami pro využití v laboratorní skupině a není tudíž schopno obsadit ani jednu pracovní směnu v základní variantě A vlastními silami. Počet pracovníků, kteří přicházejí v úvahu z ostatních RC SÚJB je rovněž omezen. Z tohoto důvodu je naprosto nereálné uvažovat o plném obsazení třech osmihodinových směn a jediným schůdným řešením je volit dvě dvanáctihodinové směny, které podle varianty A (viz část 7.2) vyžadují celkem 2 experty a 16 zaučených pracovníků. Varianta A počítá se střídáním pracovníků na nejexponovanějších místech (obsluha PC a zápis do databáze AŽP) a lze tudíž předpokládat, že dvanáctihodinová směna by byla fyzicky únosná pro všechny pracovníky zúčastněné na procesu. Počet vzorků prošlých procesem za dvanáctihodinovou směnu by pak byl cca 140 vzorků, tj. cca 280 vzorků/den. Z uvedeného rozboru tedy vyplývá, že při režimu dvou dvanáctihodinových směn laboratorní skupina SÚJB RC Č.Budějovice

- a) má k dispozici potřebné expertní pracovníky,
- b) nemá dostatečný počet zaučených pracovníků, které je nutné doplnit o 10 pracovníků z ostatních RC SÚJB – při tom je vhodné, aby směna byla vždy obsazena kombinací „domácích“ a „cizích“ zaučených pracovníků,

- c) nutně potřebuje další cca 2 pracovníky z ostatních RC SÚJB pro logistické zajištění provozu laboratoře (dovoz stravy, zajišťování vzorkovnic atp.).

## **8. Závěr**

Součástí zadání diplomové práce bylo ověřit hypotézu, že v případě monitorování za mimořádné radiační situace je „Optimální režim provozu laboratoře dán technickými parametry jednotlivých detektorů a danými geometriemi měření uvažovaných vzorků životního prostředí“.

**Na základě provedeného rozboru, zejména v částech 6 a 7 této diplomové práce závěrem musíme:**

- a) **Výše uvedenou hypotézu zamítnout a přijmout hypotézu alternativní, kterou lze formulovat následujícím způsobem: „Optimální režim - tj. režim dovolující za mimořádné radiační situace zpracovat, změřit a vyhodnotit co největší počet vzorků – je dán v první řadě organizací celého systému a personálním zabezpečením a až sekundárně technickými parametry jednotlivých detektorů a danými geometriemi měření uvažovaných vzorků životního prostředí.“**
- b) **Konstatovat, že uvedené zjištění vyplývá především ze skutečnosti, že legislativou požadovaná citlivost měření je splněna již při dobách měření v délce několika minut, zatímco ostatní úkony – zejména zpracování vzorku a celá dokumentace procesu – jsou časově mnohem náročnější.**
- c) **Zdůraznit, že nepřetržitý provoz laboratorní skupiny SÚJB RC Č. Budějovice za mimořádné radiační situace nelze zajistit personálními silami tohoto pracoviště, vyžaduje nutné posílení pracovníky z ostatních RC SÚJB v počtu nejméně 12 osob.**
- d) **Upozornit na důležitost průběžné přípravy všech zúčastněných pracovníků v laboratorní skupině SÚJB RC Č. Budějovice pro případ monitorování za mimořádné radiační situace, protože úroveň přípravy jednotlivých osob rozhodující měrou ovlivní výsledek celého procesu.**



- e) **Doporučit vedení Ústředí radiační monitorovací sítě ČR, aby při zajištění činností za mimořádné radiační situace upřednostnila v SÚJB RC Č. Budějovice zajištění činnosti laboratorní skupiny a úkoly mobilních skupin tohoto RC zajistila mobilními skupinami z jiných RC SÚJB.**
- f) **Doporučit, aby při praktickém testování kapacity laboratoří plánovaném centrální laboratoří SÚRO Praha na jaře 2007 byla jako základní varianta režimu laboratorní skupiny SÚJB RC Č. Budějovice zvolena varianta A popsaná v části 7.2 této diplomové práce.**

## 9. Seznam literatury

ESTE 2006 Čarný, P., Dokumentace k este -emergency source term evaluation, KKC SÚJB 2006,

IAEA 1999 TECDOC-1092 Generic procedures for monitoring in a nuclear or radiological emergency, IAEA Vienna, 1999

KLENER, V. Principy a praxe radiační ochrany, SÚJB Praha, 2000, ISBN 80-238-3703-6

MATZNER, J. Praktika z dozimetrie, JČU ZSF, České Budějovice, 2004, ISBN 80-7040-707-7

Nuchart 1995 Chart of the Nuclides, IAEA Vienna 1995

Příkaz předsedy č.7/2002 ze dne 23.8.2002 K plnění požadavků vyplývajících pro SÚJB z vyhlášky SÚJB č.319/2002 Sb., o funkci a organizaci celostátní radiační monitorovací sítě, SÚJB Praha, Praha,

Rulík, P. Průběžná výzkumná zpráva za rok 2006 projektu výzkumu a vývoje SÚJB č.3/2006, Státní ústav radiační ochrany Praha, Praha, 2006

Šindelková, E., 2007 (ústní sdělení)

< <http://www.iaea.org> >

< <http://www.sujb.cz> >

< <http://www.suro.cz> >

Vyhláška č.307/2002 Sb., o radiační ochraně, ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb.

Vyhláška č. 318/2002 Sb.,o podrobnostech k zajištění havarijní připravenosti jaderných zařízení a pracovišť se zdroji ionizujícího záření a o požadavcích na obsah vnitřního havarijního plánu a havarijního řádu

Vyhláška č. 319/2002 Sb., o funkci a organizaci celostátní radiační monitorovací sítě, ve znění vyhlášky č. 27/2006 Sb.

VDMI 074, Metodika VDMI 074, Stanovení objemové aktivity radionuklidů v ovzduší pomocí spektrometrie gama, SÚJB Praha, 2003

Zákon č.18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření, ve znění pozdějších předpisů

## **10. Klíčová slova:**

Radiační mimořádná situace

Monitorování

Optimální režim

Minimální detekovatelná aktivita

Složky životního prostředí

Radionuklidy

## 11. Přílohy

### 11.1 Příloha 1 – Průvodky vzorků při radiální mimořádné situaci

V příloze jsou uvedeny formulářů průvodek vzorků, jak byly stanoveny centrální laboratoří (SÚRO Praha).

#### PRŮVODKA VZORKU PRO PŘÍPAD RaMS (aerosoly, spady, potraviny)

##### PŘÍJEM VZORKU

VZOREK Č.	PŘIJAT DNE	
LOKALITA ODBĚRU		
POPIS VZORKU		
DATUM A ČAS ODBĚRU		
MNOŽSTVÍ VZORKU POUŽITÉ K MĚŘENÍ	JEDNOTKA	POČET MASŤOVEK
FORMA	SUŠENÝ ČERSTVÝ - KONCENT. FAKTOR	
SMĚSNÝ	ANO - NE	PŘIJAL

##### MĚŘENÍ VZORKU

SPEKTRUM Č.	DATUM MĚŘENÍ	
DETEKTOR Č.	GEOMETRIE	
DOBA MĚŘENÍ (s)		
ZMĚŘIL		

##### VYHODNOCENÍ VZORKU

VYHODNOTIL	
------------	--

##### ZADÁNÍ DO DATABÁZE

	Bq/m <sup>3</sup> - Bq/m <sup>2</sup> - Bq/kg - Bq/l
RADIONUKLID	AKTIVITA nebo MDA (MDA značit "<")
Cs 137	
Cs 134	
I 131	

ZADAL	

ARCHIVACE VZORKU	ANO - NE - ČÁST ZLIKVIDOVÁN	ANO - NE
POZNÁMKA	Vysoká aktivita ANO - NE *	
POZNÁMKA		

\* Výše aktivity určuje umístění změřeného vzorku. Dáno interním předpisem za konkrétní radiační situace.

<b>PRŮVODKA VZORKU PRO PŘÍPAD RaMS (půda a porost)</b>
--

**PŘÍJEM VZORKU**

VZOREK Č.	PŘIJAT DNE	
LOKALITA ODBĚRU		
CELKOVÉ MNOŽSTVÍ	PLOCHA	
POPIS VZORKU		
DATUM A ČAS ODBĚRU		
MNOŽSTVÍ POUŽITÉ K MĚŘENÍ [kg]	POČET MASŤOVEK	
HLOUBKA (cm)	OD	DO
Obdělávanost půdy	obdělávaná - neobdělávaná - jiná	
Č. souvisejících vzorků (porost, další vzorky půdy)		
PŘIJAL		

**MĚŘENÍ VZORKU**

SPEKTRUM Č.	DATUM MĚŘENÍ	
-------------	--------------	--

DETEKTOR Č.		GEOMETRIE	
DOBA MĚŘENÍ (s)		ZMĚŘIL	

*VYHODNOCENÍ VZORKU*

VYHODNOTIL	
------------	--

*ZADÁNÍ DO DATABÁZE*

RADIONUKLID	AKTIVITA nebo MDA (MDA značit "<")	
	Bq/kg	Bq/m <sup>2</sup>
Cs 137		
Cs 134		
ZADAL		

ARCHIVACE VZORKU	ANO - NE - ČÁST ZLIKVIDOVÁN	ANO - NE
POZNÁMKA	Vysoká aktivita ANO - NE *	
POZNÁMKA		

\* Výše aktivity určuje umístění změřeného vzorku. Dáno interním předpisem za konkrétní radiační situaci.

## 11.2 Příloha 2 – Databáze Access pro radiační mimořádnou situaci

Uveden příklad automatického ukládání výsledků programem GAMAT V4.0 do databáze Microsoft Access.

Pro demonstraci byla zvolena knihovna radionuklidů určená centrální laboratoří SÚRO pro testování kapacity laboratorních skupin (viz část 6.4). Obecně lze použít i jinou knihovnu s určeným libovolným počtem radionuklidů.

Uvedené výsledky objemových aktivit dvou vzorků vod pocházejí z monitorování za normální radiační situace. Záporně uvedené hodnoty znamenají „menší než nejmenší významná objemová aktivita“.

CP	DATUM	JEDNOTKY	BA-140	BI-214	CO-60	CS-134	CS-137	I-131	I-132	K-40	LA-140
1	22.3.2007	Bq/l	-3,14E-02	-2,31E-02	-9,21E-03	-1,15E-02	-1,04E-02	-9,14E-03	-1,26E-02	1,08E+00	-9,55E-03
2	19.3.2007	Bq/l	-1,77E-02	1,06E-01	-5,77E-03	-5,73E-03	-5,61E-03	-5,65E-03	-6,84E-03	2,88E-01	-5,64E-03

MN-54	NB-95	PB-210	PB-214	RU-103	TE-132	TL-208	ZR-95
-9,24E-03	-9,18E-03	-7,14E-01	-2,22E-02	-9,07E-03	-7,59E-03	2,54E-02	-1,60E-02
-5,14E-03	-5,11E-03	-1,10E+00	8,99E-02	-5,06E-03	-4,67E-03	-7,00E-03	-8,57E-03