

# **ROZŠÍŘENÍ METODIKY SYSTÉMU HARP**

**(HAzardous Radioactivity Propagation)**

*Vypracovali:* Petr Pecha  
Radek Hofman

*poslední aktualizace:*  
červen 2009



## ANOTACE

Zde navazujeme na mnohaleté předchozí práce z oblasti modelování šíření radionuklidů do životního prostředí, zvláště pak na výsledky lokalizace evropského systému RODOS (Real-time Online Decision Support systém), prováděné v ÚTIA ve spolupráci se SÚJB a SÚRO, a dále pak na výsledky projektu 6/2003 projektu vědy a výzkumu, který byl poskytnut SÚJB. Vývoj pokračuje dále v období 2007 až 2009 v rámci podpory Grantové agentury České republiky, projekt č. 102/07/1596. Programový systém HARP je zde deklarován jako aplikační výstup projektu zaměřený na podporu testování a implementace pokročilých statistických asimilačních metod, vyvinutých v rámci projektu. V předkládaném metodickém manuálu jsou zahrnuty změny a rozšíření programového kódu HARP oproti metodice použité v původním programu HAVAR [11].

Tato rozšíření se týkají zejména:

- analýzy časné fáze nehody,
- charakteristik šíření radionuklidů v pozdějších fázích nehody,
- doplnění vztahů pro výpočet radiační zátěže od různých cest ozáření,
- subsystému pro zobrazování výsledků (implicitní výstupy a výstupy na základě interaktivní volby),
- zobrazovacího grafického modulu,
- výpočtu normalizovaných měrných aktivit rostlinných a živočišných produktů,
- rozšíření ingesčního modelu o další plodiny a živočišné produkty,
- vytvoření preprocesoru meteorologických dat,
- programové podpory pro asimilaci modelových předpovědí s daty měřenými v terénu

Vyvinutý algoritmus vychází z numerického výpočtu všech gaussovských segmentů ve všech jejich dalších fázích pohybu řízeného hodinovými meteorologickými předpověďmi. Výsledná superpozice umožnila v časné fázi podrobně popsat 4 základní řídicí veličiny (objemové aktivity v přízemní vrstvě vzduchu, jejich časové integrály, měrné depozice radioaktivity na terénu a jejich časové integrály depozice), které umožní odhadovat radiologické důsledky v časné fázi nehody. Program HARP do důsledků rozvinul fakt, že pokud již je jednou proveden zdlouhavější výpočet časné fáze a určeny čtyři základní řídicí veličiny v časné fázi, pak jakékoliv odhady v pozdějších fázích lze rychle odvozovat z těchto veličin pomocí rychlých a jednoduchých integrací v čase. Proto systém nabízí progresivní a efektivní princip interaktivní konverzace při požadavcích na nejrůznější typy výsledků, přičemž dává uživateli možnost výběru jakýchkoliv výstupů.

**OBSAH**

<b>1</b>	<b>Koncepce vývoje systému HARP .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Segmentovaný Gaussův model - numerický výpočet řídicích proměnných a odhady radiologických veličin .....</b>	<b>6</b>
2.1	Analýza časné fáze nehody .....	9
2.1.1	Simulace 1. fáze pohybu každého segmentu úniku.....	11
2.1.2	Simulace 2. a dalších fází pohybu každého segmentu úniku – příčné unášení podle meteorologických sekvencí .....	15
2.2	Výpočet charakteristik šíření radionuklidů v pozdějších fázích nehody.....	17
2.2.1	Určení plošné aktivity radionuklidů deponovaných na terénu.....	17
2.2.2	Určení dlouhodobých časových integrálů měrné aktivity radionuklidů deponované na terénu.....	19
2.2.3	Určení dlouhodobých časových integrálů objemové aktivity radionuklidů v přízemní vrstvě vzduchu v důsledku procesu resuspenze .....	22
2.3	Soupis vztahů pro výpočet radiační zátěže od různých cest ozáření.....	24
2.3.1	Vnější ozáření z radioaktivního oblaku postupujícího nad terénem .....	24
2.3.2	Vnější ozáření z radioaktivity usazené na zemském povrchu.....	25
2.3.3	Vnitřní ozáření při inhalaci kontaminovaného vzduchu .....	26
2.3.4	Vnitřní ozáření při konzumaci kontaminované potravy.....	27
2.3.5	Radiační zátěž od všech nuklidů a všech cest ozáření .....	28
<b>3</b>	<b>Subsystem pro zobrazování výsledků.....</b>	<b>29</b>
3.1	Přenos výsledků ze základního modulu do subsystemu zpracování výsledků.....	29
3.2	Dva stupně generování výsledků.....	31
3.2.1	Implicitní výstupy .....	31
3.2.1.1	A) Pro časovou fázi úniku vztaženou k době tB (obvykle zvolena 24 hodin po úniku) .....	31
3.2.1.2	B) Implicitní výstupy pro pozdější fáze úniku:.....	32
	I. Dlouhodobý časový vývoj depozice na zemském povrchu .....	33
	II. Dlouhodobé ozáření z aktivity nuklidů deponovaných na zemském povrchu ...	33
	III. Dlouhodobé vnitřní ozáření v důsledku vdechování vzduchu kontaminovaného procesy resuspenze aktivity původně deponované na zemském povrchu.....	35
	IV. Dlouhodobé vnitřní ozáření v důsledku konzumace kontaminovaných potravin .....	36
3.2.2	Formát implicitních výstupů z HARP .....	38
3.2.3	Výstup výsledků na základě interaktivní volby .....	42
3.3	Zobrazovací grafický modul .....	44
	Ukázka výstupu pro 3 nuklidy .....	46
<b>4</b>	<b>Výstupy normalizovaných měrných aktivit rostlinných a živočišných produktů.....</b>	<b>47</b>
4.1	Výpočet kritických normalizovaných (na jednotkovou depozici) měrných aktivit v živočišných produktech:.....	49

4.2	Výpočet plošného rozložení kritických měrných aktivit kolem zdroje (absolutní hodnoty pro konkrétní scénář).....	52
4.3	Výpočet normalizovaných ročních vnitřních příjmů aktivity v důsledku požívání kontaminované potravy.....	53
<b>5</b>	<b>meteorologický preprocesor systému HARP.....</b>	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>interaktivní podpora pro asimilační subsystém.....</b>	<b>56</b>
<b>7</b>	<b>Reference.....</b>	<b>59</b>
<b>8</b>	<b>Přílohy.....</b>	<b>61</b>
8.1	Příloha 1: Poznámky ke zjednodušené parametrizaci skutečných fyzikálních dějů	61
8.2	Příloha 2: Časový integrál depozice Cs-137 pro různé tvary korekční stínící funkce E(t).....	66

# 1 KONCEPCE VÝVOJE SYSTÉMU HARP

Matematická simulace musí respektovat složitost transportu aktivity životním prostředím reprezentovanou řetězcem jednotlivých vzájemně provázaných submodelů. Příslušné kódy vyvíjené zhruba do přelomu století zahrnovaly deterministický přístup podle rámcového schématu 1:

Schéma 1: **Deterministické odhady**

Hlavní výstupní deterministické veličiny submodelu :	<i>objemové aktivity ve vzduchu, časové integrály v přízemní vrstvě, depozice...</i>	<i>kontaminace produktů, dlouhodobý vývoj depa, příjmy aktivity...</i>	<i>dávky záření (ozáření z mraku, z depozice, inhal., ingesční dávky)</i>
	↑	↑	↑
<b>Únik radionuklidů</b>	<b>→ atmosférický a depoziční model</b>	<b>→ transport aktivity potravními řetězci</b>	<b>→ dozimetrický model pro odhady dávek</b>

Postupně se však ukázal jako nezbytný přechod k pravděpodobnostnímu přístupu, kdy odpovědi na otázky následků nehod jsou formulovány na pravděpodobnostním základě a nabízejí kvalitativně mnohem vyšší informativní obsah. Šíření neurčitostí vstupních parametrů řetězcem submodelů ilustruje schéma 2. Hlavní výstupní veličiny pak musejí být modelovány jako náhodné a pro odhady následků je užít pravděpodobnostní aparát.

Schéma 2: **Pravděpodobnostní modelování**

Hlavní výstupní náhodné veličiny submodelu :	<i>objemové aktivity ve vzduchu, časové integrály v přízemní vrstvě, depozice...</i>	<i>kontaminace produktů, dlouhodobý vývoj depa, příjmy aktivity...</i>	<i>dávky záření (ozáření z mraku, z depozice, inhal., ingesční dávky)</i>
	↑	↑	↑
<b>Únik radionuklidů</b>	<b>→ atmosférický a depoziční model</b>	<b>→ transport aktivity potravními řetězci</b>	<b>→ dozimetrický model pro odhady dávek</b>
	↑	↑	↑
Grupa náhodných vstup. parametrů :	<i>1, ..., N1</i>	<i>1, ..., N2</i>	<i>1, ..., N3</i>

Úvodní problematikou zahrnutí pravděpodobnostního přístupu do HARP se zabývají práce [14, 15]. Formulace konkrétních grup neurčitostí řetězu všech tří environmentálních submodelů kódu HARP a konkrétní díle výsledky založené na analýze neurčitostí jsou uvedeny v [21]. Podle typu analyzovaného scénáře se jako náhodné volí pokud možno jen ty vstupní parametry, jejichž fluktuace přispívají nezanedbatelným způsobem k neurčitostem výsledné predikce (to znamená, že je nutno využít doporučení vyplývající z konkrétních studií citlivosti). Při této volbě je tedy třeba pečlivě volit rozsah celkové grupy vstupních neurčitostí daný součtem  $N1 + N2 + N3$ , což jsou počty relevantních parametrů atmosférického/depozičního submodelu, submodelu potravních řetězců a submodelu dávek záření. Rozhodování o důležitosti vlivu fluktuací konkrétního vstupního parametru na parciální náhodné fluktuace sledovaných výstupů se může dít na základě detailních studií

citlivosti a hledání koeficientů odpovídajícího regresního modelu. Na základě obsáhlého rozboru expertních doporučení provedeného v [21] jsou v současné době uvažovány grupy nuklidů o počtu  $N_1=13$ ,  $N_2=16$ ,  $N_3=9$ . Pro konkrétnost uvádíme v následující tabulce 1 grupu neurčitostí atmosférického/ depozičního modelu, která je v prostředí HARP používána pro analýzu neurčitostí a citlivostní studie tohoto modelu.

Tabulka 1: Grupa neurčitostí atmosférického / depozičního submodelu systému HARP

proměnná	rozdělení
ADM1: škálový faktor intenzity úniku	log-normální ( $2.5 \sigma$ omezené)
ADM2: škálový faktor horizontální disperze	log-normální ( $2.0 \sigma$ omezené)
ADM3: horizontální fluktuace směru větru	diskrétní rovnoměrné
ADM4: škálový faktor rychl. suché depozice – elem.	log-rovnorné
ADM5: škálový faktor rychl. suché depozice – aer.	log-rovnorné
ADM6: faktor vymývání – elementární jód	log-rovnorné
ADM7: faktor vymývání - aerosoly	log-rovnorné
ADM8: korekční faktor advekční rychlosti vlečky	rovnorné
ADM9: korekční faktor exponentu profilu větru	normální ( $3.0 \sigma$ omezené)
ADM10: škálový faktor vertikální disperze	log-normální ( $2.5 \sigma$ omezené)
ADM11: korekce na výšku směšovací vrstvy	trojúhelníkové
ADM12: korekce na tepelnou vydatnost vzdušín	log-normální ( $2.5 \sigma$ omezené)
ADM13: fluktuace srážkové intenzity	rovnorné

Podstatou pravděpodobnostních výpočtů je mnohonásobně opakované vyvolávání algoritmu základního modelu, vždy s jinými konkrétními realizacemi vstupů vygenerovaných stratifikovaným vzorkováním LHS (podrobně v [14]). Tak se získají realizace sledovaných náhodných výstupů, které se pak zpracovávají matematickým aparátem pro citlivostní studie a analýzu neurčitostí (použití některých standardních metodik je navrženo v [21]).

V dalších kapitolách bude popisován zmíněný základní algoritmus modelu, který by měl na jedné straně dostatečně přesně poskytovat modelové předpovědi a na druhé straně musí být natolik rychlý, aby mohl být použit jako jádro při mnohonásobném Monte Carlo modelování. K hlavním podmínkám použitelnosti základního algoritmu musí být jeho schopnost respektovat reálné rysy scénáře úniku radioaktivity (dynamiku úniku a její synchronizaci s krátkodobými předpověďmi meteorologické situace, mechanismy ochuzování radioaktivní vlečky, poskytnutí realistického obrazu vývoje radiologické situace v terénu jak v časně fázi nehody při postupu mraku tak v pozdějších fázích nehody apod.).

## 2 SEGMENTOVANÝ GAUSSŮV MODEL - NUMERICKÝ VÝPOČET ŘÍDÍCÍCH PROMĚNNÝCH A ODHADY RADIOLOGICKÝCH VELIČIN

Dynamika úniku radionuklidů při nehodě se zadává pomocí vstupních interaktivních panelů, jejichž popis je podrobně uveden v uživatelském manuálu systému HARP [12] v kapitole 4.4 „Segmenty úniku a grupy nuklidů“. Celkově zde shrňme, že zadaná dynamika úniku je nahrazena rozdělením do IINT segmentů úniku ( $IINT = 1$  až  $NINT$ , prozatím s omezením  $NINT \leq 7$ ). V každém segmentu je provedena homogenizace (s konstantní intenzitou úniku pro celou dobu trvání segmentu) a v každém z nich jsou určeny:

- Doby trvání úniku v jednotlivých časových segmentech
- Celkový únik aktivity jednotlivých radionuklidů  $n : A^n_{IINT}$  (Bq) v segmentu
- Hodnoty uvolňovaného tepelného výkonu vzdušín  $QH_{IINT}$  (kW) vystředované v uvažovaném segmentu
- Hodnoty průměrné vertikální rychlosti unikajících vzdušín  $VS_{IINT}$  (m/s) vystředované v uvažovaném segmentu

Úniku je přiřazen odpovídající meteorologický soubor hodinových měření (resp. hodinových předpovědí) uložený s názvem METEO.WEA a podrobně popsany v uživatelském manuálu systému HAVRP [12] v kapitole 4.5 „Meteorologické sekvence“. Počátku úniku je přiřazena hodnota 0. Například:

1.sloupec=doba trvání v hod.; 2. sl.=zacatek faze od pocatku;  
3.sl=smer odkud fouka; 4.sl=U10- střední rychlost větru v 10 m;  
5.=kat. stability atm.; 6.=srazky, 7. HMIX - výška směšovací vrstvy (zatím neuvazují, brány implicitní hodnoty v závislosti na kat. stability)

1	0	225	1.00	D	0.00	76
1	1	270	1.48	D	0.00	109
1	2	315	1.65	D	0.00	143
1	3	360	1.91	D	0.00	176
1	4	015	2.16	D	0.00	243
1	5	030	2.33	D	0.00	277
1	6	045	2.31	D	0.00	440
1	7	060	2.28	D	0.00	604
1	8	070	2.25	D	0.00	761
1	9	080	2.23	F	0.00	931
1	10	045	2.20	F	0.00	1095
1	11	030	2.18	F	0.00	1259
1	12	071	2.42	F	0.00	1156
1	13	075	2.66	C	0.00	1054
1	14	079	2.89	C	0.00	951
1	15	081	3.13	D	0.00	849
1	16	081	3.13	D	0.00	849
1	17	083	3.37	D	0.00	746



1	18	085	3.61	D	0.00	644
1	19	088	3.63	D	0.00	638
1	20	090	3.65	D	0.00	633
1	21	093	3.66	D	0.00	628
1	22	096	3.68	D	0.00	623
1	23	099	3.70	D	0.00	618
1	24	100	3.72	D	0	613
1	25	102	3.74	D	0	665

Významným rozšířením ve směru získání rychlé informace o radiologické situaci odpovídající příslušné meteorologické předpovědi je možnost interaktivního výběru meteorologických sekvencí z databázového serveru ORACLE. V prostředí WINDOWS na PC určeném pro produkt HARP (umístěno na SÚRO) běží ORACLE klient, jehož pomocí se spouštějí žádosti o předpovědní data resp. historické sekvence z podadresáře:

`c:\oracle\kkc4havar\ .....`

V tomto adresáři se provedou 3 kroky:

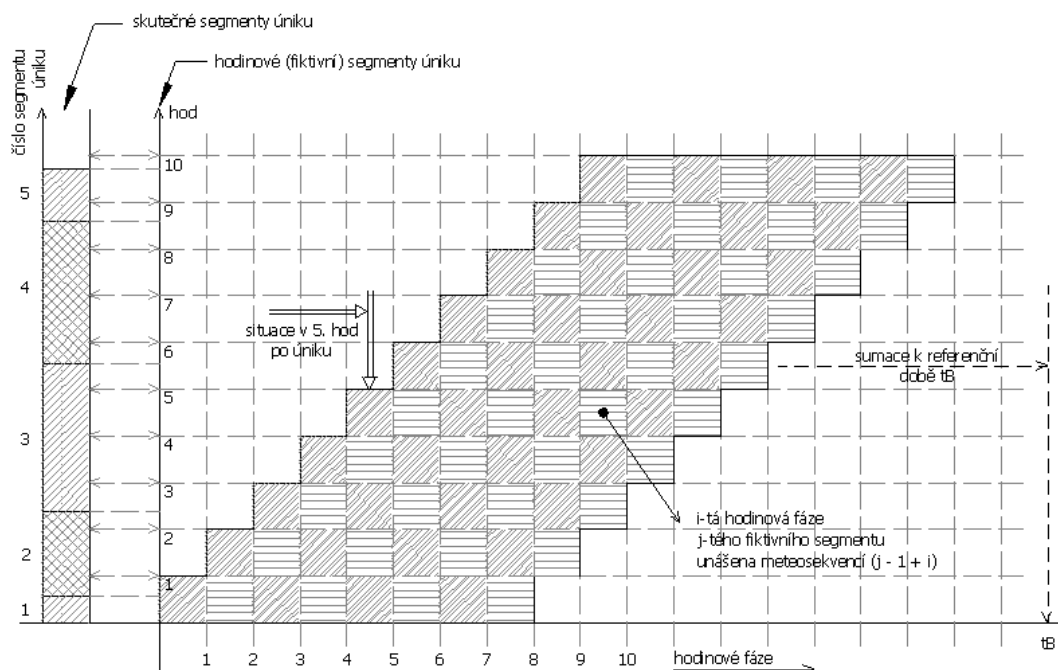
1. Vyslání žádosti do ORACLE, ten vrátí požadovanou předpověď do přechodného souboru
2. Konverze ORACLE odpovědi do formátu požadovaném systémem HARP
3. Zkopírování výsledku do oblasti meteo-havar jako soubor METEO.WEA.

Bližší postup je detailně uveden v [19] v manuálu “Lokalizace programu HARP pro JE Dukovany a JE Temelín“ (kapitola 5 – „Online napojení HARP na krátkodobé meteorologické předpovědi...“), který tvoří nedílnou součást popisovaných rozšíření metodiky.

Pokračujme dále v popisu segmentovaného algoritmu. V dalším postupu jsou původní intervaly úniku přerozděleny (ve shodě s dostupnými hodinovými předpověďmi meteosituaace) na hodinové segmenty očíslované  $ISEQ$ ,  $ISEQ = 1$  až  $NSEQ$  (zatím možno uvažovat až 43 hodinových segmentů). V každém z těchto hodinových segmentů je provedena interpolace a z bilancí jsou určeny odpovídající nové přerozdělené hodnoty  $A^{n}_{ISEQ}$ ,  $QH_{ISEQ}$  a  $VS_{ISEQ}$ . Původních  $NINT$  skutečných segmentů je tedy nyní přetransformováno na  $NSEQ$  ekvivalentních hodinových segmentů, čímž se podařilo **synchronizovat dynamiku úniků s odpovídajícími hodinovými meteorologickými předpověďmi** (ilustrováno dále na časovém diagramu v obrázku 2-1).

Transformovaná úloha spočívá v modelování pohybu všech hodinových segmentů. Postupně jsou brány jednotlivé hodinové segmenty  $ISEQ$ , přičemž pohyb každého z nich nad terénem je aproximován po částech přímočarým translačním pohybem v rámci každé následující hodinové fáze s respektováním měnící se meteorologie v každé následující hodině. Počet fází  $NFAZ(ISEQ)$  pro daný hodinový segment  $ISEQ$  je implicitně 8, může se však dynamicky při výpočtu zadat tak, aby maximální hodnota znamenala, že v další fázi celý segment (mrak) vystoupí z obrazovky (tzn. dostane se za 100 km okolí zdroje). Celá situace segmentace od skutečných segmentů do fiktivních hodinových segmentů s následujícím unášením každého segmentu v jednotlivých hodinových fázích je znázorněna na přiloženém schématu na obrázku 2-1.

Obrázek 2-1: Synchronizace dynamiky úniku znečištění s formátem krátkodobých meteorologických předpovědí.



Časový diagram vícesegmentového Gaussova modelu v jeho jednotlivých meteofázích

Výsledky jsou uchovávané v takových detailech, že pro výsledné zpracování zůstávají k dispozici pole hodnot ve všech bodech výpočtové polární sítě  $(i,k)$ ,  $i=1$  až 35 pro radiální pásma až do 100 km od zdroje,  $k=1$  až 80 pro rovnoměrné úhlové rozdělení  $2\pi$  radiánů na 80 rovnoměrných úhlových paprsků (číslování po směru hodin od severu). Jedná se o základní řídicí veličiny časné fáze vztahující se k efektu konkrétního hodinového segmentu ISEQ při jeho pohybu během konkrétní jediné hodinové fáze KFAZ:

1.  $CAPFAZ(n,i,k; ISEQ, KFAZ)$  ..... Přízemní objemová aktivita nuklidu  $n$  nad místem  $(i,k)$  příslušná k hodinovému segmentu  $ISEQ$  při jeho pohybu během jeho hodinové fáze  $KFAZ$  (to znamená v čase  $KFAZ$  hodin po počátku úniku segmentu  $ISEQ$  – ten přitom začal unikat v čase  $ISEQ$  hodin od samotného počátku úniku); v  $Bq.m^{-3}$
2.  $TICFAZ(n,i,k; ISEQ, KFAZ)$  ..... Časový integrál přízemní objemové aktivity nuklidu  $n$  příslušné ke konkrétnímu hodinovému segmentu  $ISEQ$  akumulované při jeho pohybu během jeho hodinové fáze  $KFAZ$  (to znamená v čase  $KFAZ$  hodin po počátku úniku segmentu  $ISEQ$  – ten přitom začal unikat v čase  $ISEQ$  hodin od samotného počátku úniku); v  $Bq.s.m^{-3}$
3.  $DEPFAZ(n,i,k; ISEQ, KFAZ)$  ..... Měrná aktivita nuklidu  $n$  deponovaná na zemském povrchu příslušná ke konkrétnímu hodinovému segmentu  $ISEQ$  při jeho pohybu během jeho hodinové fáze  $KFAZ$  ( $KFAZ$  hodin po počátku úniku segmentu

Odstraněno:

$ISEQ$  – ten přitom začal unikat v čase  $ISEQ$  hodin od samotného počátku úniku);  
v  $Bq.m^{-2}$

4.  $TIDFAZ(n,i,k; ISEQ, KFAZ)$  ..... Časový integrál deponované aktivity nuklidu  $n$  akumulovaný při pohybu hodinového segmentu  $ISEQ$  během jeho hodinové fáze  $KFAZ$  ( $KFAZ$  hodin po počátku úniku segmentu  $ISEQ$  – ten přitom začal unikat v čase  $ISEQ$  hodin od samotného počátku úniku); v  $Bq.s.m^{-2}$

Znovu zdůrazněme, že jde vždy o důsledek pohybu konkrétního hodinového segmentu v jeho hodinové meteorologické fázi  $KFAZ$ . Pro následné zpracování časné fáze jsou tedy celkem uchovávány vektory hodnot  $CAP$ ,  $TIC$ ,  $DEP$  a  $TID$  dimenze rovné počtu uzlů výpočtové polární sítě ( $36 \times 80 = 2800$ ), přičemž jejich počet je roven součinu  $NSEQ \times NFAZ$  (odpovídá počtu vyšrafovaných čtverečků z obrázku 2-1).

## 2.1 Analýza časné fáze nehody

Nově vyvíjený kód se sice orientuje na pozdější fáze radiační nehody, nicméně přesnost výpočtů v pozdější fázi je jednoznačně podmíněna korektním stanovením čtyř hlavních výše zmíněných řídicích veličin určených v časné fázi. Výsledné hodnoty časových integrálů měrné přízemní aktivity radionuklidů ve vzduchu jsou počítány na základě superpozice jejich dílčích hodnot ve všech fázích a všech segmentech úniku podle schématu:

$$TICTOT(n,i,k) = \sum_{(ISEQ)} \sum_{iFAZ(ISEQ)} \{TICFAZ(n,i,k; ISEQ, KFAZ)\} \quad (S1)$$

Poněkud komplikovanější je situace pro procesy depozice a odpovídajícího ozáření z ní, kdy jednotlivé fáze jednotlivých segmentů obecně probíhají v hodinových časových úsecích různě časově vzdálených od skutečného počátku úniku. Z tohoto hlediska je nutné synchronizovat dílčí výsledky z jednotlivých fází ( $ISEQ, KFAZ$ ) tak, že se tyto jednotlivé dílčí hodnoty přepočítají k určitému **referenčnímu času  $TB$**  od počátku úniku, který bude zvolen těsně za časem poslední fáze posledního segmentu. Ten lze zadat ze vstupních panelů [12], v záložce „základní parametry“, a je volen například 24 hodin (případně 48 hodin pro více segmentů a fází). Aktivita deponovaná na terénu během hodinové fáze  $KFAZ$  hodinového segmentu  $ISEQ$  (je to depozice v čase  $T_{st}$  od začátku celkového úniku) nechť je vyjádřena vypočtenou hodnotou  $DEPFAZ(n,i,k; ISEQ, KFAZ)$  podle:

$$DEPFAZ(T_{st}(ISEQ, KFAZ); n,i,k; ISEQ, KFAZ) = DEPFAZ(n,i,k; ISEQ, KFAZ) \quad (S2)$$

Zde  $T_{st} = ISEQ + KFAZ - 1$  je vyjádřeno v hodinách. Dále se použije vyjádření v sekundách  $t_{st}(ISEQ, KFAZ) = T_{st} * 3600.0$ . Aktivita nuklidu  $n$  deponovaná sekvencí ( $ISEQ, KFAZ$ ) v místě polárního uzlu ( $i,k$ ) v referenčním čase  $tB = TB * 3600.0$  (s) má potom hodnotu:

$$DEPFAZ(tB, t_{st}; n,i,k; ISEQ, KFAZ) = DEPFAZ(t_{st}(ISEQ, KFAZ); n,i,k; ISEQ, KFAZ) * \exp[-\lambda_r^n * (tB - t_{st}(ISEQ, KFAZ))] \quad (S3)$$

Potom výchozí hodnota depozice radionuklidu v časné fázi (tzn. ve zvoleném okamžiku  $tB$  po začátku úniku) je dána superpozicí ze všech segmentů a všech jejich fází jako:

$$\text{DEPTOT}(tB, n, i, k) = \sum_{(ISEQ)} \sum_{\text{IFAZ}(ISEQ)} \left\{ \text{DEPFAZ}(tB, t_{st}; n, i, k, ISEQ, KFAZ) \cdot \exp[-\lambda_r^n \cdot (tB - t_{st}(ISEQ, KFAZ))] \right\} \quad (\text{S4})$$

Obdobným způsobem bude vyjádřena dávka za dobu  $tB$  od ozáření z depozice jako superpozice příspěvků z jednotlivých fází všech segmentů. Uvažujme depoziční dávkový příkon nuklidu  $n$  v uzlu polární sítě  $(i, k)$  od sledované fáze pohybu  $KFAZ$  segmentu  $ISEQ$  v okamžiku  $t_{st}(ISEQ, KFAZ)$  daný vztahem:

$$\hat{H}(t=t_{st}; n, i, k; ISEQ, KFAZ) = R_{povrch}^n * \text{DEPFAZ}(t_{st}(ISEQ, KFAZ); n, i, k; ISEQ, KFAZ) \quad (\text{S5})$$

kde  $R_{povrch}^n$  je tabelovaný dávkový faktor ozáření od kontaminovaného povrchu

$$(\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}).$$

Tento depoziční příkon s časem klesá podle:

$$\hat{H}(t=t_{st} + \Delta t; n, i, k; ISEQ, KFAZ) = \hat{H}(t=t_{st}; n, i, k; ISEQ, KFAZ) * \exp[-\lambda_r^n \cdot \Delta t] \quad (\text{S6})$$

Po integraci vztahu (S6) pro  $t \in < 0, tB - t_{st} >$  je vyjádřen přírůstek dávky od depozice v časovém intervalu od  $t_{st}$  do referenčního času  $tB$  podle:

$$\Delta H(tB, t_{st}(\dots); n, i, k, ISEQ, KFAZ) = \text{DEPFAZ}(t_{st}(\dots); n, i, k; ISEQ, KFAZ) * R_{povrch}^n * \frac{1}{\lambda_r^n} \left[ 1 - \exp\{-\lambda_r^n (tB - t_{st}(ISEQ, IFAZ))\} \right] \quad (\text{S7})$$

Výsledná dávka od depozice je superpozicí od všech segmentů a všech fází podle schématu:

$$\text{HTOT}(tB; n, i, k) = \sum_{(ISEQ)} \sum_{\text{KFAZ}(ISEQ)} \left\{ \Delta H(tB, t_{st}(ISEQ, KFAZ); n, i, k; ISEQ, KFAZ) \right\} \quad (\text{S8})$$

Poznamenejme, že jinými slovy lze hodnoty dávek od depozice interpretovat jako součin hodnoty časového integrálu  $TID$  deponované aktivity (za uvažovaný časový interval) přenásobený konverzním faktorem  $R_{povrch}^n$  podle schématu:

$$\Delta H(\dots) = TID(\dots) * R_{povrch}^n \quad (\text{S9})$$

Z předešlého algoritmu je zřejmé, že klíčovou otázkou je získání dostatečně přesného popisu radiologických charakteristik v časné fázi úniku včetně první fáze šíření každého segmentu. Je třeba se tedy vrátit k základním proměnným  $CAPFAZ(n, i, k; ISEQ, KFAZ)$ ,  $TICFAZ(n, i, k; ISEQ, KFAZ)$ ,  $DEPFAZ(n, i, k; ISEQ, KFAZ)$  a  $TIDFAZ(n, i, k; ISEQ, KFAZ)$ , které byly shora obecně definovány, a naznačit proceduru jejich výpočtu. Vyvíjená verze programu zavádí

segmentovaný Gaussův model s dalšími modifikacemi s rozlišením na modelování první fáze (základní fáze každého segmentu *ISEQ*) s analytickým vyjádřením podle rovnic krátkodobé kinetiky a dále na geometricko-numerickém modelování pohybu segmentů v dalších fázích podle odpovídající meteosituače.

### 2.1.1 Simulace 1. fáze pohybu každého segmentu úniku

Pro určitý segment *ISEQ* je v jeho 1. fázi použit gaussovský model přímočarého šíření se všemi jeho omezeními, ale též výhodami (zahrnutí dceřinných nuklidů, délka fáze odpovídá minimálnímu intervalu meteorologických předpovědí, možnost analytického vyjádření časových integrálů *TIC* a *TID*). Samotný popis výpočtu hlavních veličin je vyjádřen pomocí rovnic krátkodobé kinetiky uvedených v základním manuálu systému HAVAR [11] s tím, že tyto jsou modifikovány podle zde sledovaného cíle. Úkolem je dostatečně přesné určení aktivity deponované na terénu a příslušné dávky záření z depozice v první hodině (*KFAZ=1*) šíření hodinového segmentu úniku *ISEQ*. Šíření je popsáno Gaussovou rovnicí přímočarého šíření, přičemž je s uvážením všech mechanismů ochuzování vlečky určena měrná aktivita ve vzduchu v různých výškových úrovních.

Další úvahy zjednodušíme na popis charakteristik pod osou vlečky při jejím přímočarém šíření ve směru  $x$ . Princip výpočtu je v postupném šíření každého hodinového segmentu úniku *ISEQ* v jeho následujících hodinových fázích *KFAZ* ve shodě se zadanými meteorologickými sekvencemi. Segment *ISEQ* se tedy v první své fázi *KFAZ=1* šíří celou jednu hodinu přímočaře (jakoby dilčí únik trval hodinu, tedy  $Thav = 3600$  s) a za tuto hodinu dojde čelo mraku do vzdálenosti  $Xc = \bar{U} * Thav$ .  $\bar{U}$  je střední rychlost vlečky. Dále analyzujeme nejdůležitější veličiny v místech  $x \in < 0 ; Xc >$ . Zavedeme pomocné proměnné :

$Tx$  ..... doba, za níž čelo mraku dojde do místa  $x$  ;  $Tx = x / \bar{U}$

$Tact$  .... doba působení mraku nad místem  $x$  ;  $Tact = (Thav - Tx) / \bar{U}$

$S^n(x)$  .... depoziční příkon nuklidu  $n$  v místě  $x$  (suma suché a mokré depozice, vyjádření v základním manuálu metodiky produktu HAVAR [11], spočteno pomocí objemové aktivity ve vzduchu)

Úkolem je určit hlavní řídicí veličiny, pomocí nichž se dále odhaduje radiologické riziko v důsledku různých cest ozáření, konkrétně:

- Časové integrály objemové aktivity radionuklidů v přízemní vrstvě vzduchu. Tyto hodnoty se počítají z celkového 3-D rozložení aktivity v atmosféře, kdy jsou současně k dispozici hodnoty objemové aktivity radionuklidů v ose mraku v efektivní výšce šíření nad terénem, které lze použít pro zpřesnění odhadu dávek z ozáření z mraku v blízkých vzdálenostech od zdroje (viz poznámka dále).
- Plošnou aktivitu radionuklidů deponovanou na zemském povrchu.
- Časové integrály plošné aktivity radionuklidů deponované na terénu.

Přitom máme na mysli prostorové rozložení těchto veličin (tedy rozsáhlá pole), navíc pro poslední dvě veličiny musí být vztažené k určitému referenčnímu času  $tB$  rané fáze úniku.

Gaussovský model přímočarého šíření poskytuje hodnotu objemové aktivity ve vzduchu, která má v uvažovaném místě  $(i,k)$  konstantní hodnotu *CAPFAZ* od okamžiku  $Tx$ , kdy sem dorazí čelo mraku, až do doby  $Thav$  celkového trvání první fáze *KFAZ=1* každého segmentu úniku. Platí tedy vztah:

$$TICFAZ(n,i,k; ISEQ, KFAZ=1) = CAPFAZ(n,i,k; ISEQ, KFAZ=1) * Tact \quad (S10)$$

Pro depozici a její časový integrál by měl čas  $tB$  odpovídat okamžiku odeznění mraku nad terénem. S ohledem na šíření v dalších segmentech v jejich dalších fázích (jejich počet je určován dynamicky) se hodnota  $tB$  zadává ze vstupních panelů a měla by být volena 1 až 2 dny. Celý proces je pak třeba rozdělit na dva časové intervaly  $\langle Tx ; Thav \rangle$  a  $\langle Thav ; tB \rangle$ . V prvním intervalu dochází ke kontinuálnímu usazování a výsledná měrná depozice nuklidu  $n$  v  $Bq \cdot m^{-2}$  je vyjádřena podle:

$$\Omega^n(x,t) = \frac{S^n(x)}{\lambda^n} \cdot [1 - \exp(-\lambda^n \cdot t)] \quad (S11)$$

a odtud:

$$\Omega^n(x, Thav) = \frac{S^n(x)}{\lambda^n} \cdot [1 - \exp(-\lambda^n \cdot Tact)] \quad (S12)$$

Člen  $S^n(x)$  představuje depoziční příkon v důsledku všech mechanismů usazování během pohybu mraku nad místem  $x$  (blíže vztah (3.23) v původní metodice HAVAR [11]).

V druhém intervalu  $t \in \langle Thav ; tB \rangle$  sleduje depozice aktivity na terénu v místě  $x$  exponentu radioaktivního rozpadu podle :

$$\Omega^n(x,t) = \Omega^n(x, Thav) \cdot \exp(-\lambda^n \cdot t) \quad (S13)$$

Ozáření v Sv od aktivity nuklidu  $n$  deponovaného na zemském povrchu se obecně vypočte integrací dávkového příkonu ( v souladu s (S7) ) podle:

$$H_{povrch}^n(x,t) = R_{povrch}^n \cdot \int_{(t)} \Omega^n(x,t) \cdot dt \quad (S14)$$

kde integrál lze označit jako časový integrál aktivity deponované na zemském povrchu.

Integrace v prvním uvažovaném časovém intervalu určuje dávku záření od depozice nuklidu  $n$  na orgán  $o$  v místě  $x$  za dobu trvání úniku do  $Thav$  podle:

$$H_{povrch}^{n,o}(x, Thav) = R_{povrch}^{n,o} \cdot \int_{t=0}^{Tact} \Omega^n(x,t) \cdot dt \quad (S15)$$

a po integraci dostáváme vyjádření:

$$H_{povrch}^{n,o}(x, Thav) = R_{povrch}^{n,o} \cdot \frac{S^n(x)}{\lambda^n} \cdot \left[ Tact + \frac{1}{\lambda^n} \{ \exp(-\lambda^n \cdot Tact) - 1 \} \right] \quad (S16)$$

Integrace ve druhém uvažovaném časovém intervalu určuje přírůstek dávky záření od depozice nuklidu  $n$  na orgán  $o$  v místě  $x$  za dobu od skončení úniku (zde je tedy uvažována doba  $Thav$  určitého hodinového segmentu úniku) do uvažované referenční doby  $tB$  podle:

$$\Delta H_{povrch}^{n,o}(x, Thav \rightarrow tB) = R_{povrch}^n \cdot \Omega^n(x, Thav) \int_{t=0}^{tB-Thav} \exp(-\lambda^n \cdot t) \cdot dt \quad (S17)$$

což vede k vyjádření:

$$\Delta H_{povrch}^{n,o}(x, Thav \rightarrow tB) = \frac{1}{\lambda^n} \cdot R_{povrch}^n \cdot \Omega^n(x, Thav) \cdot [1 - \exp(-\lambda^n \cdot \{ tB - Thav \})] \quad (S18)$$

Konečný výraz pro dávku z ozáření (Sv) za referenční dobu  $tB$  v místě  $x$  od aktivity nuklidu  $n$  deponovaného při přímočarém šíření konkrétního segmentu úniku ze zdroje po dobu  $Thav$  má tvar:

$$H_{povrch}^{n,o}(x, Thav, tB) = H_{povrch}^{n,o}(x, Thav) + \Delta H_{povrch}^{n,o}(x, Thav \rightarrow tB) \quad (S19)$$

Při výpočtech jsou s výhodou využity analytické vztahy pro časové integrály deponované aktivity  $TID1$  plynoucí z (S16):

$$TID1^n(x, Thav) = \frac{S^n(x)}{\lambda^n} \cdot \left[ Tact + \frac{1}{\lambda^n} \{ \exp(-\lambda^n \cdot Tact) - 1 \} \right] \quad (S20)$$

a  $TID2$  podle:

$$TID2^n(x, Thav \rightarrow tB) = \Omega^n(x, Thav) \cdot \int_{t=0}^{tB-Thav} \exp(-\lambda^n \cdot t) \cdot dt \quad (S21)$$

Poznamenejme, že konečné vztahy navíc respektují věkové kategorie. Výsledky přímočarého šíření ve směru  $x$  jsou pak transponovány na dvourozměrnou výpočtovou polární síť s uzly  $(i, k)$ .

#### Poznámka k vyhlazení základní fáze segmentovaného modelu

V původním schématu se zavádí přibližné diferenční schéma vyhlazení 1. fáze (ta se počítá jako segment přímočarého šíření). Vychází se z předpokladu, že při šíření vlečky jsou původně vypočtené objemové aktivity v ose vyhlazovány přenásobováním funkcí  $g(x)$ , která zavádí efekt disperze ve směru šíření schématicky podle:

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_x(x)}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma_x^2(x)}\right)$$

Předpokládejme rozšíření 1. fáze segmentu v intervalu  $\langle 0; X_B \rangle$ , který obsahuje radiální distance výpočtové mříže  $\langle X_1; X_2; \dots, X_B \rangle$ . Přímocharé šíření probíhá se střední rychlostí  $U_{stř}$  po dobu  $T$ , po níž čelo mraku dojde do bodu  $X_B$ . V prvním přiblížení je celý interval  $\langle 0; X_B \rangle$  rozdělen na  $N$  částí  $\langle x_1; x_2; \dots, x_N \rangle$ , přičemž jsou interpolací počítány objemové aktivity  $C$  na těchto intervalech (z hodnot určených původním modelem přímočarého šíření vlečky). Dílčí „balík“  $\underline{k}$ , který je v okamžiku  $T$  v místě  $x_k$ , přispívá s určitou vahou do výpočtových bodů, takže přepočtené objemové aktivity  $\hat{C}$  se počítají podle:

$$\hat{C}(X_i) \cong \sum_{k=1}^{k=N} \left\{ C(x_k) \cdot \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_x(x_k)}} \cdot \exp\left(-\frac{(X_i - x_k)^2}{2 \cdot \sigma_x^2(x_k)}\right) \right\}$$

Toto hrubé intuitivní schéma vede ke konzervativním hodnotám objemových aktivit v koncové oblasti 1. fáze vlečky. Proto je též adaptován podobný nicméně fyzikálně

jednoznačnější algoritmus vyhlazování zavedený v systému RODOS pro algoritmus ATSTEP (autor Jürgen Passler-Sauer [17]), kdy výsledné rozložení koncentrací aktivity je dáno časovým integrálem dílčích 3-D gaussovských obláčků, které jsou unášeny až do vzdálenosti  $U_{stř} \cdot T$ . Po určitých matematických úpravách jsou výsledné objemové aktivity ve vlečce, složené z velkého množství elementárních „obláčků“, vyjádřeny podle:

$$\hat{C}(x) = C(x) \cdot G(x)$$

kde funkce  $G$  je vyjádřena podle:

$$G(x) = \frac{U_{stř}}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_x(x_k)} \cdot \int_{t=0}^{t=T} \exp\left(-\frac{(x - U_{stř} \cdot t)^2}{2 \cdot \sigma_x^2(x_k)}\right)$$

Pro výpočet je užit tvar:

$$G(x) = \frac{1}{2} \cdot \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2} \cdot \sigma_x(x)}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x - U_{stř} \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \sigma_x(x)}\right) \right]$$

Pozn.: Je zavedena závislost  $\sigma_x = c \cdot \sigma_y$ , v prvním přiblížení je ve shodě s ATSTEP algoritmem použita hodnota  $c = 1$ .

IMSL knihovny produktu Visual FORTRAN nabízejí například subroutiny:

#### **ERF/DERF (Single/Double precision)**

Evaluate the error function.

#### **Usage**

ERF(X)

#### **Arguments**

**X** — Argument for which the function value is desired. (Input)

**ERF** — Function value. (Output)

#### **Algorithm**

The error function,  $\operatorname{erf}(z)$ , is defined to be

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_{w=0}^{w=z} \exp(-w^2) \cdot dw$$

```

FUNCTION erf(x)
  REAL erf,x
  CU  USES gammp
  REAL gammp
  if(x.lt.0.)then

```



```

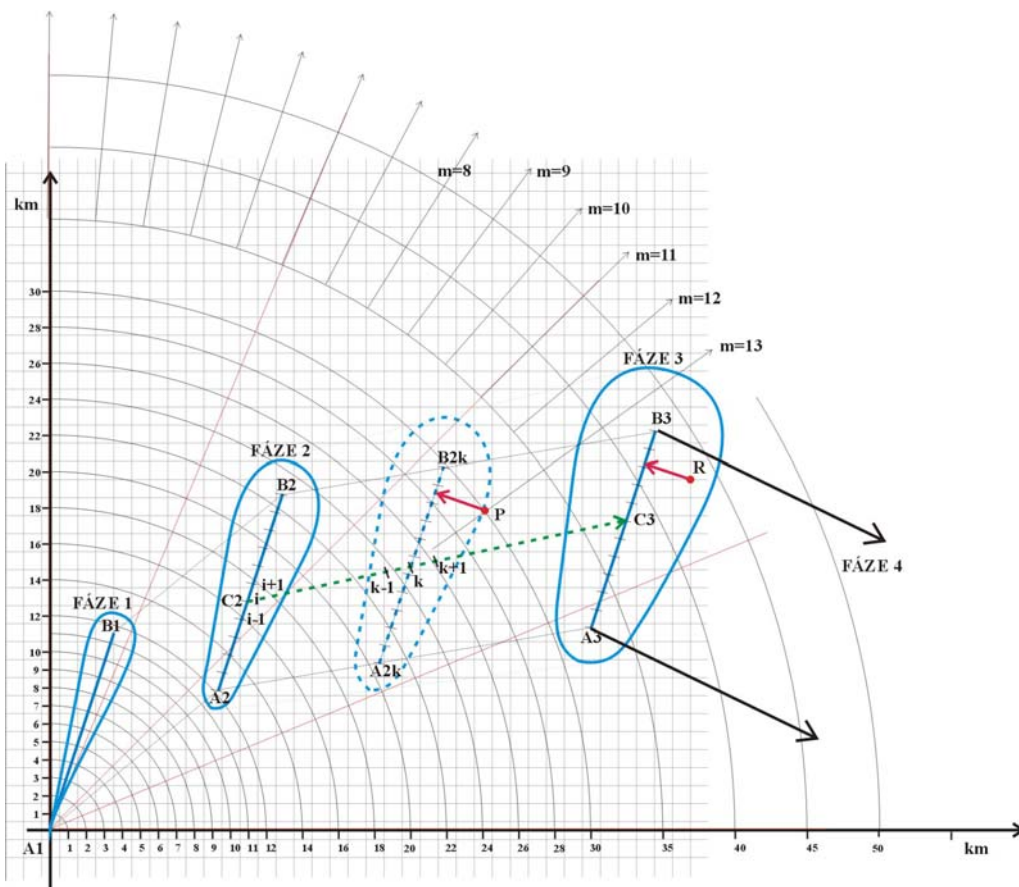
erf=-gamp(.5,x**2)
else
erf=gamp(.5,x**2)
endif
return
END

```

Příslušné další funkce jsou k dispozici tamtéž.

### 2.1.2 Simulace 2. a dalších fází pohybu každého segmentu úniku – příčné unášení podle meteorologických sekvencí

Další fáze pohybu konkrétního segmentu úniku nad terénem jsou modelovány numericky na základě geometrických představ. Na obrázku 2-2 následuje schéma pohybu mraku nad terénem, na jehož základě jsou počítány výsledné charakteristiky.



Obrázek 2-2: Další fáze pohybu „gaussovských kapek“ (hodinových segmentů).

Trvání každé fáze  $Thav$  je jedna hodina a směr a rychlost větru, kategorie stability atmosféry a případné srážky jsou dány v příslušném meteosouboru. Modeluje se přímočaré unášení v daném směru se střední rychlostí  $\bar{u}$ , celkový posun  $SHIFT = \bar{u} * Thav$ . Numerická procedura

spočívá v rozdělení celkového posuvu z určité fáze do její fáze následující na určitý počet ekvidistantních elementárních posuvů  $\underline{k}$  ( $k=1, \dots, K$ ). Každý elementární posuv trvá  $\Delta t = Thav/K$  sekund a má hodnotu  $\Delta r = \bar{u} * \Delta t$ . Předpokládáme, že byly v předchozím kroku, který je charakterizován polohou mraku při dílčím posuvu  $\underline{k}$  s osovou úsečkou (A2k, B2k), nalezeny všechny charakteristiky ve všech bodech výpočtové polární sítě ( $r, \varphi$ ). Při elementárním posuvu do polohy  $\underline{k+1}$  jsou počítány nové hodnoty, přičemž stručně schematicky zmíníme pouze princip:

- $CAPFAZ(n, r, \varphi, t_{k+1}; ISEQ, KFAZ)$  : objemová aktivita radionuklidu ve vzduchu – je počítána z hodnoty  $CAPFAZ(n, r, \varphi, t_k; ISEQ, KFAZ)$  z předchozího elementárního kroku, přičemž je uvažováno ochuzení aktivity v mraku v důsledku radioaktivního rozpadu a suché a mokré depozice a dále atmosférické zředění v důsledku zvětšení rozptylu.
- $TICFAZ(n, r, \varphi, t_{k+1}; ISEQ, KFAZ) = TICFAZ(n, r, \varphi, t_k; ISEQ, KFAZ) +$   
 $+ CAPFAZ(z=0; \text{střední na } t_k \rightarrow t_{k+1}) * \Delta t$  (S22a)
- $DEPFAZ(n, r, \varphi, t_{k+1}; ISEQ, KFAZ) = DEPFAZ(n, r, \varphi, t_k; ISEQ, KFAZ) * e^{-\lambda n \Delta t} +$   
 $+ S^n(r, \varphi) * \Delta t$  (S22b)  
*pozn.: druhý člen s depozičním příkonem S je uvažován konzervativně*
- $TIDFAZ(n, r, \varphi, t_{k+1}; ISEQ, KFAZ) = TIDFAZ(n, r, \varphi, t_k; ISEQ, KFAZ) +$   
 $+ DEPFAZ(\text{střední na } t_k \rightarrow t_{k+1}) * \Delta t$  (S22c)

Ze vztahů (S22a) a (S22c) lze současně vyčíst, jak jsou implicitně zahrnuty numerické výpočty časových integrálů měrné aktivity vzduchu v přízemní vrstvě a časových integrálů aktivity deponované na zemském povrchu.

Postupně zvětšování koeficientů disperze v horizontálním a vertikálním směrech je mezi jednotlivými fázemi chápáno diferenčně, protože může dojít ke změně kategorie stability atmosféry (skoková změna ve vstupním předpovědním meteosouboru). Vrátime-li se k přiloženému schématu na obrázku 2-2, tak nechť  $\sigma(C2)$  značí disperzi vypočtenou pro bod C2 z předchozího kroku ( t. zn. během základní fáze 1 a při následujícím šíření z fáze 1 do fáze 2). Potom disperzi v bodě C2<sub>k</sub> (v poloze  $\underline{k}$  šíření z fáze 2, kdy úsečka vlečky A2B2 dorazí do polohy A2<sub>k</sub>B2<sub>k</sub>) vyjadřujeme diferenčně podle  $\sigma(C2_k) = \sigma^{(kat1+2)}(C2) + \{ \sigma^{kat3}(d(C2_k)) - \sigma^{kat3}(d(C2)) \}$ . Zde d(C2) resp. d(C2<sub>k</sub>) vyjadřují vzdálenost, kterou projde (na lomených úsečkách) příslušný bod úsečky vlečky od svého zrození do bodu C2 resp. C2<sub>k</sub>. Horním indexem (kat1+2) jsou symbolicky označeny výsledné veličiny pro výpočty v předchozích fázích 1 a 2 s kategoriemi stability atmosféry kat1 a kat2. Aktuální zadaná kategorie stability pro šíření ve 3. fázi je kat3. Pod  $\sigma^{kat3}(delka)$  míníme v přiblížení, že je to hodnota disperzního koeficientu daná příslušnou formulí pro vzdálenost šíření od nuly (zdroj) do x=delka.

Takto jsou tedy postupně počítány řídicí hodnoty v jednotlivých časových krocích až do doby  $Thav = 3600$  sec. Je ještě třeba provést výše zmíněný přepočet některých hodnot na referenční čas tB. Konkrétně hodnoty deponované aktivity v čase tB - tj.  $DEPFAZ(tB, t_{st}; n, r, \varphi, ISEQ, KFAZ)$  se nyní vypočítají zcela analogicky vztahu (S3) (značení  $r, \varphi$  je nyní

ekvivalentní  $i,k$ ). Stejně tak určení příslušné dávky od depozice v referenčním čase  $tB$  je vyjádřeno součtem podle (S22c) a  $\Delta H$  analogicky s (S7) podle:

$$\begin{aligned} HTOT(tB; n, r, \varphi, Thav; ISEQ, KFAZ) = \\ = TIDFAZ(n, r, \varphi, Thav; ISEQ, KFAZ) * R^n_{povrch} + \Delta H(tB, \dots) \end{aligned} \quad (S23)$$

## 2.2 Výpočet charakteristik šíření radionuklidů v pozdějších fázích nehody

Z předchozích výsledků výpočtu segmentovaného Gaussova modelu v časné fázi úniku (vztahených k referenční době  $tB$  blízké situaci těsně po přechodu mraku nad celým terénem) se počítají sledované výstupy v pozdější fázi nehody. Je zřejmé, že časové integrály objemové aktivity radionuklidů ve vzduchu se již nemění. Pro další veličiny jsou použity následující úvahy, které shrnují výsledky obsáhlé studie rozvoje ingesčního modulu systému HARP jehož pracovní verze je popsána v [13] a je **nedílnou součástí rozšíření metodiky systému HARP**.

### 2.2.1 Určení plošné aktivity radionuklidů deponovaných na terénu

Je třeba rozlišovat výpočet hodnot depozice podle účelu jejich použití v dalších krocích [13]. Pro konzervativní odhady ozáření od deponované aktivity budou jako výchozí hodnoty uvažovány aktivity soustředěné do povrchové vrstvy půdy (s případnou dodatečnou korekcí na stínění aktivity migrované do hlubších vrstev). Stejně tak příkon ozáření od aktivity radionuklidů deponovaných na zemském povrchu, který může být jednou z hodnot měřených na terénu v reálném čase (dále použitou v procesu asimilace výsledků modelování s měřeními), budeme určovat na základě časového vývoje depozice na terénu vztahené k povrchu půdy. Stejnou úvahu použijeme pro konzervativní výpočty vnitřního ozáření od aktivity resuspendované zpět s povrchu půdy do přízemní vrstvy vzduchu s následným vdechováním člověkem, kdy budou opět směrodatné konzervativní hodnoty depozice vztahené (soustředěné) na nejsvrchnější vrstvu půdy. Také ingesce v prvním roce spadu v důsledku listového transportu radionuklidů do potravního řetězce bude vycházet z předchozích hodnot depozice. Na druhé straně pro případy kořenového přenosu aktivity v dalších letech po spadu budou pro ingesční cestu vnitřního ozáření řídicí veličinou střední hodnoty aktivity v kořenové zóně, a sice jen té mobilní aktivity, která je k dispozici pro kořenový transport.

Předpokládejme, že byla úspěšně vypočtena plošná aktivita deponovaná na terénu ( $Bq \cdot m^{-2}$ ) daná vztahem (S4) pro vícesegmentový a vícefázový Gaussův model. Ve vztahu (S4) provedeme přeznačení:

$$\Omega^n(tB; x, y) = DEPTOT(tB, n, i, k) \quad (S24)$$

kde souřadnice  $(x,y)$  odpovídají uzlu polární výpočtové sítě  $(i,k)$ . Plošná depozice na terénu v pozdější periodě  $TD$  od referenčního času  $tB$  časného stadia (obvykle  $TD \gg tB$ ) kopíruje rozpad nuklidu  $n$  (charakterizovaný rozpadovou konstantou  $\lambda_r^n$ ) podle vztahu:

$$\Omega^n(T; x, y) = \Omega^n(tB; x, y) \cdot \exp(-\lambda_r^n \cdot TD) \quad (S25a)$$

Ukazuje se však, že existují další procesy vedoucí k odstraňování aktivity s povrchu. Jde především o migraci radionuklidu do spodních vrstev půdy a fixaci v půdě kořenové zóny. Dalšími mechanizmy jsou resuspenze aktivity zpět do přízemní vrstvy vzduchu a případná desorpce v kořenové zóně. Některé kódy uvažují i roční ztráty aktivity v kořenové zóně způsobené odvozem kontaminované úrody. Základní vyjádření v literatuře se v tomto případě aproximuje jednoduchou samostatnou exponenciální funkcí:

$$\Omega^n(T; x, y) = \Omega^n(tB; x, y) \cdot \exp(-\lambda_{ef}^n \cdot TD) \quad (S25b)$$

kde  $\lambda_{ef}^n$  ( $s^{-1}$ ) je efektivní konstanta odstraňování aktivity, zahrnující některé nebo všechny výše zmíněné efekty.

Z hlediska pozdější časové fáze nehody je nejdůležitější sledovat vývoj depozice nuklidů s velkým poločasem rozpadu, z nichž nejdůležitější jsou izotopy Cs, Sr, Pu, Am, apod., s jejich dalším rozlišením podle mobility. Po černobylské havárii se ukázal největším problémem u Cs137. Některé modely průniku aktivity dlouhodobých nuklidů životním prostředím akceptují výsledky nejnovějších měření, kdy se potvrdilo, že vývoj měrné aktivity deponované na terénu je lépe popsán dvousložkovou rovnicí s rozlišením na krátkodobou a dlouhodobou složku. Základní literaturou, která podává přehled přístupu významných kódů k popisu transportu radioaktivity životním prostředím a současně shrnuje možná doporučení, je práce [1]. Mimořádně přínosnou prací je evropský model ECOSYS'87 [2] a britský model FARMLAND [4]. Všechny tyto práce se zaměřují na problém setrvávání radionuklidu Cs-137 v životním prostředí a výsledkem je řada doporučení na volbu efektivní konstanty odstraňování aktivity  $\lambda_{ef}^n$ . Japonský kód OSCAAR [3] jde do větších podrobností a používá pro popis procesu snižování aktivity usazeného Cs-137 dvousložkovou rovnicí rozlišující rychlou a pomalou složku usazování:

(25c)

$$\Omega^n(T; x, y) = \Omega^n(tB; x, y) \cdot \exp(-\lambda_r^n \cdot TD) \cdot \left[ \alpha \cdot \exp(-\lambda_{fast}^n \cdot TD) + (1 - \alpha) \cdot \exp(-\lambda_{slow}^n \cdot TD) \right]$$

Řídicí veličinou pro kořenový transport aktivity z půdy do rostlin je měrná aktivita v kořenové zóně v Bq/kg půdy. Jedná se však jen o tu část aktivity, která není chemicky vázána v půdě. Její modelování musí tedy respektovat zmenšování v důsledku procesů fixace vyjádřených empirickou hodnotou  $\lambda_{fix}^n$ . Příslušnou měrnou aktivitu v kořenové zóně v Bq/kg půdy v jednosložkovém zjednodušení (analogie s (S25b)) popisuje například vztah:

$$\Omega_{root}^n(T; x, y) = \frac{\Omega^n(tB; x, y)}{L \cdot \rho} \cdot \exp(-[\lambda_{mig}^n + \lambda_{fix}^n] \cdot TD) \quad (S25d)$$

$L$  a  $\rho$  jsou hloubka a hustota kořenové zóny,  $\lambda_{mig}^n$  a  $\lambda_{fix}^n$  jsou konstanty odstraňování v důsledku migrace a fixace aktivity s rozměrem  $s^{-1}$ . V některých pramenech je migrace označována jako vyluhování (leaching [4]), přičemž konstanta vyluhování z povrchové vrstvy je určována z poloempirických formulí závislých na vlhkosti a typu půdy, ročním úhrnu atmosférických srážek případně zavlažování, rovnovážném distribučním koeficientu  $Kd$  (vícevrstvé modely migrace radionuklidů v kořenové zóně TAMDYN, LIETDOS z [1]). Existují odhady založené na předpokladu o velikosti střední perkolační rychlosti vody v půdě (na příklad je brána hodnota 2 m/rok). Poznamenejme předem, že vztah (S25d) bude používán při výpočtech příjmu aktivity při ingestci od kořenové cesty z půdy do rostliny. Některé

prameny (např. [4]) k migraci a fixaci ze vztahu (S25d) přidávají ekvivalentní snižování aktivity v kořenové zóně odvozem kontaminované biomasy při žních (“loss by harvest”).

Problémy přetrvávají s nalezením konkrétních číselných hodnot koeficientů odstraňování. Na základě důkladné analýzy prováděné v modelu ECOSYS [2] byly do systému RODOS [7] převzaty hodnoty, které byly použity i v kódu HARP pro přípravu implicitních číselných nabídek v panelech ingesčního modelu (viz uživatelský manuál systému HAVAR-RP [12] – kap. 6.2 – Půdní transport; migrace a fixace Cs a Sr). Fixace je mimořádně důležitá pro Cs a Sr a jsou použity doporučené hodnoty z [2, 4,7] :

$$\lambda_{fix}^{Cs} = 2.2 \text{ E-04 (den}^{-1}\text{)} ; \lambda_{fix}^{Sr} = 9.0 \text{ E-05 (den}^{-1}\text{)} \quad (\text{S26})$$

Údaje o míře fixace pro jiné nuklidy v literatuře chybějí. V produktu ECOSYS [2] není proces fixace pro jiné nuklidy považován za významný a je zanedbán.

Co se týká migrace, budeme vycházet z přístupu v produktu RODOS [7] shrnutém v následující tabulce, která rozlišuje intenzitu migrace pro tři skupiny prvků podle typu půdy.

typ půdy	migrační konstanta $\lambda_{mig}$ (1/rok)		
	Ag, Am, Ce, Cm, Co, Cs, I, La, Nb, Nd, Np, Pr, Pu, Rb, Rh, Ru, Y, Zr	Ba, Mn, Mo, Na, Sb, Sr, Te	Tc
orná půda	$6.9 \times 10^{-3}$	$1.4 \times 10^{-2}$	$2.8 \times 10^{-1}$
pastviny	$1.7 \times 10^{-2}$	$3.5 \times 10^{-2}$	$6.9 \times 10^{-1}$

### 2.2.2 Určení dlouhodobých časových integrálů měrné aktivity radionuklidů deponované na terénu

Pro účely výpočtů vnějšího ozáření osob od aktivity usazené na zemském povrchu se časový vývoj samotné usazené aktivity modifikuje tak, že počáteční její hodnota jednak klesá podle rozpadové křivky  $R^n(t)$  a dále se snižuje v důsledku dalších efektů, především:

- migraci radionuklidů v půdě
- v důsledku faktorů setrvání určité osoby v daném místě a dále v případě pobytu osoby v uvažovaném místě stíněním při případném pobytu uvnitř budov
- případné snížení dávky ozáření při pobytu na volném prostranství pro případ speciální geometrie terénu (jeho samostínění v důsledku odlišnosti od tvaru nekonečné rovinné desky)

Dále jsou uvažovány první dva zmíněné efekty a jsou pro ně převzata vhodná existující vyjádření.

Vliv migrace radionuklidů v půdě na dlouhodobé ozáření v sobě zahrnuje nejen vlastní odstraňování aktivity pryč z uvažované zóny, ale také odhad samostínění půdou při určitém hloubkovém rozložení odpovídajícím času migrace. V literatuře jsou publikovány příslušné

empirické formule pro odpovídající časovou funkci  $E(t)$ , která je někdy nazývána přímo korekční stínící funkcí (v ECOSYS [2], RODOS [7]). Jedním z používaných vztahů je vyjádření podle Meckbach-Jacob [20]:

$$E(t) = a_1 \cdot \exp(-\lambda_1 \cdot t) + a_2 \cdot \exp(-\lambda_2 \cdot t) \quad (\text{S27a})$$

$\lambda_1, \lambda_2$  jsou migrační faktory ;

$$\lambda_1 = 1.46 \times 10^{-3} \text{ den}^{-1}, \lambda_2 = 3.87 \times 10^{-5} \text{ den}^{-1};$$

$a_1, a_2$  jsou příspěvky krátko- a dlouhodobé frakce migrace ;

$$a_1 = 0.36, a_2 = 0.64$$

Obdobnou dvousložkovou rovnici používá kód OSCAAR, v jehož podrobném uživatelském manuálu lze najít hodnoty:  $\lambda_1 = 1.73 \times 10^{-3} \text{ den}^{-1}$  (odpovídající  $T_{1/2}$  rychlé složky je asi 1.1 roků),  $\lambda_2 = 6.78 \times 10^{-5} \text{ den}^{-1}$  (odpovídající  $T_{1/2}$  pomalé složky je asi 28 roků);  $a_1 = 0.36, a_2 = 0.64$ .

Modifikace předchozího vztahu podle Meckbach-Jacob použitá v systému RODOS má tvar:

$$E(t) = a_1 \cdot \exp(-\lambda_1 \cdot t) + a_2 \cdot \exp(-\lambda_2 \cdot t) \quad (\text{S27b})$$

$$\lambda_1 = 1.01 \times 10^{-3} \text{ den}^{-1}, \lambda_2 = 0.00 \text{ den}^{-1};$$

$$a_1 = 0.6, a_2 = 0.4$$

Důležitým pramenem je publikace [6], která podrobně analyzovala relativní časové průběhy ozáření z depozice na lokalitách v okolí Černobylu a v Německu. Obě oblasti se od sebe liší jak typem půd tak tím faktem, že v bližším okolí nehody bylo Cs-137 vázáno většinou ve formě nerozpustných kondenzovaných částic paliva, zatímco v regionu střední Evropy byl nuklid vázán v přirozené aerosolové formě. Proto také v [6] byla získána dvojí doporučení.

Pro černobylskou oblast byla vyhovující formule s jednou exponenciálou :

$$E(t) = a \cdot \exp(-t/b) \quad \text{pro } 7 < t < 100 \text{ roků} \quad (\text{S27c1})$$

přičemž  $a = 0.591$  a  $b = 29.5$ .

Hodnoty pro oblast havárie jsou měřeny až od  $t > 7$  roků. To odpovídá efektivnímu poločasu odstraňování Cs-137  $T_{1/2} = b \cdot \ln 2 \cong 20$  roků.

Pro lokality v Německu byla sestavena dvousložková formule:

$$E(t) = a_1 \cdot \exp(-t/b_1) + a_2 \cdot \exp(-t/b_2) \quad (\text{S27c2})$$

s příslušnými středními hodnotami konstant:

$$a_1 = 0.331, a_2 = 0.254; b_1 = 4.80, b_2 = 29.8.$$

Měření v Německu byla prováděna prakticky od počátku havárie a předchozí formule dává efektivní poločas odstraňování  $T_{1/2} = b_1 \cdot \ln 2 \cong 3.3$  roky v časně fázi resp.  $T_{1/2} = b_2 \cdot \ln 2 \cong 21$  roků.

Předchozí vztahy pro  $E(t)$  byly odvozeny pro Cs po černobylské havárii. Pro ostatní prvky podobná data nejsou k dispozici, nicméně převažuje mínění, že pro většinu dalších prvků efekt ozáření z dlouhodobého hlediska není významný. Pro několik dalších významnějších prvků s delším poločasem rozpadu se použijí stejné průběhy jako pro Cs.

Jsou k dispozici i podrobnější modely pro  $E(t)$  založené na vícevrstvých modelech popisu migrace aktivity v půdě. V budoucnu není vyloučeno i jejich použití. Ve vstupních panelech ingesčního modelu taková volba může být zabudována a po odladění oživena.

Druhým významným efektem při určování očekávaných dávek z ozáření z depozice je užití faktorů respektujících setrvání osob v daném místě a dále stínění při případném pobytu uvnitř budov. Při vývoji systému HARP bylo ve zprávě k analýzám neurčitostí použito úvahy, kdy pro výpočet náhodné hodnoty ozáření z depozice jsou zaváděny dva typy faktorů:

- 1)  $F_{lok}$  - faktor setrvání osob v daném místě (frakce času setrvání)
  - 2)  $f_{bud}$  - frakce času, kterou osoba při svém setrvání v místě stráví uvnitř budov, a tudíž je určitým způsobem stíněna před vnějším ozářením z depozice
- $SF_{bud}$  - stínící faktor budov (jediná odhadnutá střední hodnota)

Některé kódy zahrnují druhý případ tak zvaným integrálním stínícím faktorem  $SF = \sum f_i \cdot SF_i$ , kde  $f_i$  je frakce času strávená v uvažované lokalitě v různých strukturách (minimálně rozlišení „indoor/outdoor“) s partikulárními stínícími faktory  $SF_i$ . V systému HARP je ve vstupních panelech ingesčního modelu použito přiblížení „indoor/outdoor“ podle:

$$SF = F_{lok} \cdot [(1 - f_{bud}) + f_{bud} \cdot SF_{bud}] \quad (S28)$$

s průměrnými hodnotami převzatými z literatury, které jsou jako implicitní nabízeny ve vstupních panelech v kapitole 6.3 v uživatelském manuálu HAVAR-RP [12] – „Dlouhodobá depozice/resuspenze“. Vstupní panely též nabízejí možnost zadat faktory setrvání v místě  $F_{lok}$  se závislostí podle věkových kategorií. Vhodným nastavením faktorů uživatel může simulovat očekávané nebo konzervativní (potenciální) dávky.

Po těchto úvodních úvahách zformulujeme vlastní algoritmus výpočtu dlouhodobého ozáření z aktivity deponované na zemském povrchu, vycházející z vypočtené depozice (a taktéž krátkodobého ozáření) v časné fázi  $\Omega^n(tB; x, y)$  a se zahrnutím diskutovaných environmentálních mechanismů dlouhodobého vývoje depozice na zemském povrchu.

Depoziční příkon ozáření z depozice (Sv/s) v čase  $t \in (tB; TD>$  je vyjádřen podle:

$$\hat{H}^n(tB, t; x, y) = R_{povrch}^n \cdot \Omega^n(tB; x, y) \cdot R(t) \cdot E(t) \cdot F_{lok} \cdot [(1 - f_{bud}) + f_{bud} \cdot SF_{bud}] \quad (S29)$$

$R(t) = \exp(-\lambda_r^n \cdot t)$  a s vyjádřením  $E(t)$  podle některého z předchozích vztahů.

Časový integrál depozice nuklidu  $n$   $\Delta TID^n(tB \rightarrow TD)$  v intervalu  $(tB; TD>$  je dán:

$$\Delta TID^n(tB \rightarrow TD; x, y) = \Omega^n(tB; x, y) \cdot \int_0^{TD-tB} R(t) \cdot E(t) \cdot dt \quad (S30)$$

Z hlediska snížení objemu výstupních mezivýsledků je výhodné zavést časové integrály depozice normalizované na jednotkovou depozici v časné fázi podle:

$$\Delta TID_{nor}^n(tB \rightarrow TD; x, y) = \frac{\Delta TID^n(tB \rightarrow TD; x, y)}{\Omega^n(tB; x, y)} = \int_0^{TD-tB} R(t) \cdot E(t) \cdot dt \quad (S30a)$$

Po dosazení za  $E(t)$  například podle (S27a) a integrací (S30) dostaneme:

$$\Delta TID^n(tB \rightarrow TD; x, y) = \Omega^n(tB; x, y) \cdot \left[ \frac{a_1}{\lambda_{eff1}^n} (1 - \exp(-\lambda_{eff1}^n \cdot T)) + \frac{a_2}{\lambda_{eff2}^n} (1 - \exp(-\lambda_{eff2}^n \cdot T)) \right] \quad (S31)$$

kde  $T = TD - tB$ ;  $\lambda_{eff1}^n = \lambda_r^n + \lambda_l$ ;  $\lambda_{eff2}^n = \lambda_r^n + \lambda_2$ ;

Průběhy časových integrálů depozice pro **různé tvary korekční stínící funkce jsou uvedeny v Příloze 2**. Tyto alternativy mohou být uživatelem zvoleny v nabídce Dlouhodobá depozice / resuspenze – viz uživatelský manuál systému HAVAR-RP [12]. Tak lze testovat význam podrobnější analýzy významu různých vztahů a jejich vliv na konzervatismus resp. realizmus odhadů vnějšího ozáření.

Celková dávka z ozáření od nuklidu  $n$  usazeného na zemském povrchu za dobu od počátku úniku do doby  $TD$  je dána součtem hodnoty do doby  $tB$  dané vztahem (S8) a přírůstkem dávky za časový interval  $(tB, TD)$  podle:

$$HTOT(0 \rightarrow TD; n, i, k) = HTOT(tB; n, i, k) + \Delta TID^n(tB \rightarrow TD; x, y) \cdot SF \cdot R_{povrch}^n \quad (S32)$$

### 2.2.3 Určení dlouhodobých časových integrálů objemové aktivity radionuklidů v přízemní vrstvě vzduchu v důsledku procesu resuspenze

Úvahy v tomto metodickém manuálu vycházejí z objemných rešeršních prací dalších publikací [13, 21] projektu HAVAR-RP. Zvláště pak druhá z citovaných zpráv hledá v literatuře podklady pro popis resuspenze včetně náhodných charakteristik parametrů přenosu. K modelu OSCAAR se podařilo v najít první zjednodušený odhad distribuce koeficientu resuspenze (viz tabulka 7-12 v kapitole 7.3.5 publikace HAVAR-RP [21]) a použít ho v analýze neurčitosti dávkového submodelu. Dále bude uveden všeobecně přijímaný způsob zahrnutí dlouhodobého vlivu resuspenze v důsledku atmosférického působení doporučený v [2, 7]. Svoji koncepci zahrnutí resuspenze má i model FARMLAND [4], kterou je možno alternativně zabudovat do nabídky „Dlouhodobá depozice / resuspenze“ popsané v [12]. Pro uvažovaný radionuklid  $n$  se dodatečná objemová aktivita v přízemní vrstvě vzduchu vyvolaná resuspenzí vyjadřuje v závislosti na usazené aktivitě pomocí faktoru resuspenze  $k_{RES}$  ( $m^{-1}$ ) jako:

$$k_{RES}(t; x, y) = \frac{\text{Objemová aktivita vzduchu v důsl. resuspenze v místě } \underline{x, y} \text{ a čase } \underline{t} \text{ (Bq} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}}{\text{Okamžitá depozice v daném místě a čase [ Bq} \cdot \text{m}^{-2}\text{]}}$$

Za pomoci dříve zavedených veličin lze tuto dodatečnou aktivitu v přízemní vrstvě vzduchu vyjádřit jako:

$$C_{RES}^n(t; x, y) = \Omega^n(t; x, y) \cdot k_{RES}(t; x, y) \quad (S33)$$



Depozice je určena některým ze vztahů (S25a,b,c). Pro koeficient resuspenze použijeme vyjádření z [2] a používaný též v [7] vhodný pro lidskou činností nenarušovaný zemský povrch přírodního prostředí severní části Evropy. V literatuře je často používán faktor resuspenze podle autorů Linsley (1978) nebo Garland (1992) s vyjádřením závislosti s exponenciální a konstantní složkou uvedené dále jako vztah (S34b). Tento empirický model je značným zjednodušením složitějšího jevu resuspenze, nicméně jeho validaci (experimenty po testech nukleárních zbraní, experimentální fitování s hodnotami měřenými po černobylské havárii, testování v aerodynamických tunelech) byl získán dostatečně robustní model pro věrohodné limitní odhady dávek.

Snižování koeficientu resuspenze s časem je určeno faktem, že během času je kromě rozpadu radioaktivní materiál odstraňován migrací a dále se pevněji váže v půdních strukturách jako výsledek chemických a fyzikálních procesů a jeho schopnost dostat se opět do přízemní vrstvy vzduchu se snižuje. Použijeme dvousložkové vyjádření koeficientu resuspenze podle (zavedeno v kódu OSCAAR [3]):

$$k_{RES}(t_{roky}) = k_{fast} \cdot \exp\left(-\ln 2 \cdot \frac{t_{roky}}{T_{1/2RES}^{fast}}\right) + k_{slow} \cdot \exp\left(-\ln 2 \cdot \frac{t_{roky}}{T_{1/2RES}^{slow}}\right) \quad (S34a)$$

Pro kód OSCAAR jsou doporučeny hodnoty:

Krátkodobá složka: počáteční hodnota  $k_{fast} = 2.3 \times 10^{-8}$  a poločas snižování  $T_{1/2}^{fast} = 1.35$  roků  
 Dlouhodobá složka: počáteční hodnota  $k_{slow} = 1.0 \times 10^{-9}$  a poločas snižování  $T_{1/2}^{slow} = 100$  roků.

Pro poločas snižování pomalé dlouhodobé složky  $T_{1/2}^{slow} \rightarrow \infty$  přejde vztah do analogického jednoduššího tvaru typu Linsley, Garland (použit na příklad v kódu RODOS):

$$k_{RES}(t) = R_1 \cdot \exp(-R_2 \cdot t) + R_3 \quad (S34b)$$

$t$  ..... čas ve dnech po depozici

$R_1$  ... faktor resuspenze v okamžiku depozice ( $m^{-1}$ )

$R_2$  ... faktor exponenciálního snižování ( $d^{-1}$ )

$R_3$  ... dlouhodobý faktor resuspenze ( $m^{-1}$ )

Je možné z produktu RODOS [7] převzít implicitní hodnoty:  $R_1 = 5 \times 10^{-8} m^{-1}$ ,  $R_2 = 0.003 d^{-1}$ ,  $R_3 = 1 \times 10^{-9} m^{-1}$ . V souvislosti s různými typy půd je diskutována též otázka „obohacení“ aktivity v resuspendujících částech půdy (zvláště pro jíly) v důsledku silných vazeb aktivity v minerálech. I když určitá data již existují, tento mechanismus zatím není uspokojivě popsán a zatím nebude uvažován.

Označme dále  $B_{inh,RES}^n$  jako vteřinový příjem radionuklidu  $\underline{n}$  ( $Bq \cdot s^{-1}$ ) vztažený k okamžiku  $t$  při inhalaci resuspendované aktivity jedincem z kategorie  $\underline{a}$  žijícího v místě  $(x,y)$  sektoru  $\underline{k}$ . Pro jeho vyjádření platí vztah:

$$B_{inh,RES}^n(t, x, y) \approx C_{RES}^n(t, x, y) \cdot u_{inh} \quad (S35)$$

kde  $u_{inh}$  je rychlost dýchání jedince ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ), kterou je nutno rozlišit podle věkových kategorií. Celkový příjem aktivity  $BTOT$  (Bq) v důsledku resuspenze za dobu  $TD$  dále

zohledňuje frakci času setrvání v určitém místě a dále filtrační efekt obytných struktur při pobytu uvnitř budov. Pro jedince z věkové kategorie  $\underline{a}$  dostáváme:

$$BTOT_{inh,RES}^{n,a}(TD;x,y) = u_{inh}^a \cdot F_{lok} \cdot \left[ (1 - f_{bud}) + f_{bud} \cdot FF_{filtr} \right] \cdot TIR^n(TD;x,y) \quad (S36)$$

kde  $TIR$  ( $Bq \cdot s \cdot m^{-3}$ ) je časový integrál resuspendované přízemní objemové aktivity vzduchu za celou dobu, daný vztahem:

$$TIR^n(TD;x,y) = \int_0^{TD} \Omega^n(t;x,y) \cdot k_{RES}(t;x,y) \cdot dt$$

Pro výpočet časového integrálu  $TIR$  uijeme průběh podle (S25a) (což je konzervativní předpoklad pro analýzu resuspenze) a dále vztah (S33), do kterého dosadíme dvousložkové vyjádření koeficientu resuspenze podle (S34a). Po všech úpravách se dojde ke konečnému vyjádření:

$$TIR^n(TD;x,y) = \Omega^n(tB;x,y) \cdot \left[ \frac{k_{fast}}{\lambda_1^n} (1 - \exp(-\lambda_1^n \cdot TD)) + \frac{k_{slow}}{\lambda_2^n} (1 - \exp(-\lambda_2^n \cdot TD)) \right] \quad (S38)$$

$$\lambda_1^n = \lambda_r^n + \lambda_{RES}^{fast} / \tau [s^{-1}]; \quad \lambda_{RES}^{fast} = \ln 2 / T_{1/2RES}^{fast} [rok^{-1}]; \quad \tau = 3600 \cdot 24 \cdot 365 [s / rok]$$

$$\lambda_2^n = \lambda_r^n + \lambda_{RES}^{slow} / \tau [s^{-1}]; \quad \lambda_{RES}^{slow} = \ln 2 / T_{1/2RES}^{slow} [rok^{-1}];$$

Ostatní koeficienty jsou popsány výše u vztahů (25a), (33) a (34).

## 2.3 Soupis vztahů pro výpočet radiační zátěže od různých cest ozáření

Podrobnější diskuse k problematice je uvedena v kapitole 4 základního metodického manuálu systému HAVAR. Dále budou doplněny příslušné vztahy týkající se shora popisovaného segmentového Gaussova modelu se zahrnutím zavedených hlavních řídicích veličin generovaných segmentovaným modelem.

### 2.3.1 Vnější ozáření z radioaktivního oblaku postupujícího nad terénem

Zde se omezíme na vnější ozáření fotony. Je zřejmé, že k ozáření dochází pouze v časném stadiu při postupu mraku nad terénem a v pozdější periodě se již nemění. Obvykle se používá přiblížení ponoření do polonekonečného izotropního mraku podle:

$$H_{oblak}^{a,n,o}(i,k) = TICTOT(n;i,k) \cdot R_{oblak}^{a,n,o} \quad (S39)$$

$H_{oblak}^{a,n,o}(x,y)$  ... celková dávka v (Sv) z ozáření z mraku po odeznění úniku nad místem  $(x,y)$  na tkáň  $\underline{a}$  jedince z věkové kategorie  $\underline{a}$ , který pobýval po celou dobu úniku v místě uzlu výpočtových polárních souřadnic  $(i,k)$  na otevřeném prostranství

$TICTOT(n;i,k)$ ...celkový časový integrál měrné aktivity nuklidu  $\underline{n}$  v přízemní vrstvě vzduchu určený podle (S1)

$R_{oblak}^{a,n,o}$  ..... dávkový faktor pro ozáření z oblaku od nuklidu  $n$  na orgán  $o$  (stanoven na základě polonekonečného modelu mraku) ( $Sv \cdot m^3 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$ ); přibližné rozlišení pro jednotlivé věkové kategorie je zavedeno v [16], kdy faktory vypočtené pro dospělé se přenásobují korekčními faktory pro jednotlivé věkové kategorie.

Vztah (S39) dává konzervativní dávky (někdy označované jako potenciální), které předpokládají nereálný scénář pobytu po celou dobu v uvažovaném místě na otevřeném prostranství. Pro normální životní rytmus jedince je třeba vzít v úvahu lokační a stínící faktory. Vyjadřují jednak frakci času  $F_{lok}$ , kterou osoba setrvává v uvažovaném místě, a dále při pobytu v místě  $(x,y)$  je třeba respektovat frakci pobytu uvnitř budov  $f_{bud}$  s příslušným zahrnutím stínícího vlivu staveb  $SF_{obl}$ . Celková dávka daná předchozím vztahem se pak přenásobuje výrazem:

$$F_{lok} * [ (1 - f_{bud}) + f_{bud} * SF_{obl} ]$$

V malých vzdálenostech od zdroje může být užití modelu ponoření do polonekonečného izotropního mraku (s uniformní měrnou aktivitou rovnou aktivitě v přízemní vrstvě vzduchu) diskutabilní. Také si je třeba uvědomit, že samotné konverzní dávkové faktory  $R_{oblak}$  jsou napočítávány též pro polonekonečné izotropní prostředí. V krátkých vzdálenostech se mrak nemusí vůbec dotknout terénu a přesto může dojít k ozáření osob. Proto pro blízké vzdálenosti od zdroje se zavádí alespoň přibližná korekce na konečný rozměr mraku pomocí korekčního faktoru  $FCOR_\gamma$ . V základním manuálu HAVAR je popsáno přiblížení, kdy řídicí veličinou není objemová aktivita v přízemní vrstvě vzduchu (pomocí níž je původně podle vztahu (S1) určována hodnota  $TICTOT(z=0)$ ), nýbrž objemová aktivita v ose šíření v efektivní výšce. Musí být počítána nová hodnota  $TICTOT(z=h_{ef})$  a ozáření se počítá podle schématu:

$$H_{oblak}^{a,n,o,k}(i,k) = FCOR_\gamma(\sigma, q) \cdot TICTOT(n; i, k, z = h_{ef}) \cdot R_{oblak}^{a,n,o} \quad (S40)$$

kde parametry  $\sigma$  a  $q$  představují konečnou disperzi mraku a polohu receptoru  $(i,k,z=0)$  vzhledem k efektivní výšce osy mraku podle:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \quad ; \quad q = \sqrt{(y^2 + h_{ef}^2)} / \sigma \quad (S40a)$$

Přiblížení podle (S40) je použito vždy jen pro první fázi šíření každého segmentu analyzované jako gaussovské přímočaré šíření. Vyžaduje navíc ukládání veličin vztažených jak k přízemní vrstvě vzduchu tak v efektivní výšce šíření. Pro druhou a další fáze modelování šíření každého segmentu je použito zjednodušení podle (S39), což je dobře opodstatněné postupnou vertikální homogenizací aktivity ve větších vzdálenostech od zdroje úniku. Použití přesnějšího vyjádření korekčního faktoru  $FCOR$  podle RIMPUFF je ve stadiu ověřování dostupnosti těchto vztahů.

### 2.3.2 Vnější ozáření z radioaktivity usazené na zemském povrchu

Nezbytné úvahy byly provedeny výše při konstrukci výrazu (S32). Přepíšeme tento výraz přesněji, nyní s rozlišením podle věkových kategorií:

$$H_{povrch}^{a,n,o}(t=0 \rightarrow TD; i, k) = HTOT(tB; n, i, k) + R_{povrch}^{a,n,o} \cdot SF^a \cdot \Delta TID^n(tB \rightarrow TD; i, k) \quad (S41)$$

kde:

$H_{povrch}^{a,n,o}$  ..... celková očekávaná dávka záření (Sv) od radionuklidu  $n$  usazeného na zemském povrchu na orgán (tkáň)  $o$  osoby z věkové kategorie  $a$  žijící po dobu  $TD$  v běžném životním rytmu v místě  $(i, k)$ .

$R_{povrch}^{a,n,o}$  ..... tabelovaný konverzní faktor (Sv. m<sup>2</sup>.Bq<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>), představující dávkový příkon od jednotkové měrné aktivity nuklidu  $n$ , usazené na nekonečné ploše kolem bodu receptoru (ten je 1 m nad povrchem)

$HTOT(tB; n, i, k)$  je definováno vztahem (S8),  $\Delta TID$  se počítá podle (S30) resp. (S31). Zde věkově závislý faktor  $SF^a$  je dán vztahem (S28) a zahrnuje tedy jak frakce setrvání v místě  $(i, k)$   $F_{lok}^a$  tak vliv pobytu uvnitř budov charakterizovaný faktory  $f_{bud}^a$  a  $SF_{bud}$  v tomto místě při běžném životním režimu.

### 2.3.3 Vnitřní ozáření při inhalaci kontaminovaného vzduchu

#### a) Časná perioda úniku v důsledku dýchání kontaminovaného vzduchu při přechodu mraku

50-ti resp. 70-ti leté úvazky ekvivalentní dávky (Sv) na orgán  $o$  pro jedince z věkové kategorie  $a$  vyvolané radionuklidem  $n$  a ovlivňující orgán  $o$  mechanismem dýchání tohoto jedince pobývajících po celou dobu přechodu mraku na otevřeném prostranství v místě  $(i, k)$  se určuje podle:

$$H_{inh}^{a,n,o}(i, k) = TICTOT(n, i, k) \cdot u_{inh}^a \cdot R_{inh}^{a,n,o} \quad (S42)$$

$R_{inh}^{a,n,o}$  je tabelovaný dávkový konverzní faktor z ozáření při inhalaci nuklidu  $n$  na orgán  $o$  jedince z  $a$  (Sv.Bq<sup>-1</sup>), který z hlediska účinku uvnitř organismu představuje úvazek ekvivalentní resp. efektivní dávky z jednotkového příjmu radionuklidu  $n$  cestou inhalace (účinek se vztahuje od okamžiku příjmu do očekávaného konce života pro danou věkovou kategorii  $a$  - 50 let pro dospělé, 70 let pro děti);

$u_{inh}^a$  je intenzita dýchání (m<sup>3</sup>/s) jedince z věkové kategorie  $a$ , kterou možno zadávat interaktivně z panelu – viz Uživatelský manuál HARP;

$TICTOT$  (Bq.s.m<sup>-3</sup>) je dáno výrazem (S1).

#### b) Dlouhodobé vnitřní ozáření v důsledku dýchání vzduchu kontaminovaného při resuspenzi aktivity do vzduchu původně usazené na zemském povrchu.

Celkový vnitřní příjem aktivity nuklidu  $n$   $BTOT(TD; i, k)$  v Bq v důsledku vdechování resuspendované aktivity jedincem z věkové kategorie  $a$  žijícího po dobu  $TD$  v běžném životním rytmu v místě  $(i, k)$  je popsán vztahem (S36), kde časový integrál resuspendované aktivity  $TIR$  je vyjádřen podle (S36) resp. (S37). Potom vnitřní ozáření se vypočte podle schématu:

$$H_{inh,RES}^{a,n,o,k}(TD;i,k) = R_{inh}^{a,n,o} \cdot BTOT_{inh,RES}^{n,a}(TD;i,k) \quad (S43)$$

$H_{inh}^{a,n,o,k}$  ... 50-ti resp. 70-ti leté úvazky záření (Sv) na orgán  $o$  pro jedince z věkové kategorie  $a$  vyvolané radionuklidem  $n$  ovlivňující orgán  $o$  skrze mechanismus dýchání tohoto jedince žijícího při běžném životním rytmu v místě  $(i,k)$  po dobu  $TD$

### 2.3.4 Vnitřní ozáření při konzumaci kontaminované potravy

Postup výpočtu rozlišuje určování dávkových úvazků v prvním roce (výskyt úniku charakterizován juliánským dnem spadu v tomto roce) a v letech následujících. V prvním roce je dynamicky řešen listový a kořenový transport aktivity radionuklidů směrem k potravnímu řetězci osob. Je respektován skutečný den spadu  $TSPAD$  vzhledem k vegetačním periodám rostlinných produktů. V dalších letech po spadu je přírůstek dávkových úvazků řešen jako samostatný úsek s fiktivním dnem spadu 1. ledna každého dalšího roku, přičemž je uvažován pouze kořenový transport aktivity do rostlin (uvažuje se i o zahrnutí listového transportu v důsledku resuspenze z půdy na rostliny v dalších letech – tuto volbu nabízí vstupní panel INGMODEL). Pro každý počátek dalšího roku je dynamicky modelována příslušná depozice na základě jejího dlouhodobého časového vývoje.

Princip dynamického modelování spočívá v proceduře, kdy pro každý produkt  $l$  se počítá integrální normalizovaný příjem aktivity nuklidu  $n$  v důsledku jeho konzumace jedincem z věkové skupiny  $a$ , a to za období ode dne spadu do dne  $TING$  (za  $TING$  je obvykle volen juliánský den konce roku). Tyto hodnoty označované jako  $IE_l^{a,n}(TSPAD \rightarrow TING)$  jsou normalizovány na jednotkovou depozici v uvažovaném místě. Je uvažován model ingesce „lokální produkce – lokální spotřeba“ nebo některé modifikace zahrnující částečnou globální spotřebu nekontaminovaných potravin. Je též prováděn základní konzervativní odhad pro konzumaci dodatečných komodit kritickými skupinami obyvatel – shromážděno podrobně v [13].

Skutečný vnitřní příjem aktivity nuklidu  $A_l^{a,n}$  realizovaný za určitých předpokladů o vztahu lokální produkce a způsobu konzumace se dostane přenásobením normalizovaných hodnot skutečnou depozicí nuklidu podle vztahu:

$$A_l^{a,n}(TSPAD \rightarrow TING; i, k) = \Omega_0^n(T_x; i, k) \cdot IE_l^{a,n}(TSPAD \rightarrow TING) \quad (S44)$$

přičemž

a) Pro první rok spadu :

$T_x = TSPAD = tB$  ;  $\Omega_0^n = DEPTOT(tB, n, i, k)$  podle vztahu (S4), což je depozice těsně po odeznění úniku nad místem  $(i,k)$ .

b) Pro  $m$ -tý rok po spadu ( $m=1, \dots, M$ ) :

$$T_x = (\tau - TSPAD) + (m-1) \cdot \tau ; \tau = 365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s};$$

$\Omega_0^n = DEPTOT(TD, n, i, k)$  podle některého ze vztahů (S25), kde  $TD = T_x$ .

Pro kořenový transport v dalších letech je třeba uvažovat závislost (S25d) zohledňující jen tu část aktivity, která je k dispozici pro zpětný přenos z kořenové zóny do rostliny. Při výpočtech se však novou dobou spadu stává počátek  $m$ -tého roku.

Je zřejmé, že vztah (S44) podstatně zrychlí výpočty, protože dynamický model proběhne vlastně jen dvakrát a příslušné úvazky ingesčních dávek (roční, víceleté) se získávají pouhým přenásobováním.

Konečné schéma pro určení 50-ti resp. 70-ti letých úvazků dávky  $H_{ing}$  (Sv) na orgán nebo tkáň  $o$  jedince ze skupiny  $a$  z vnitřního ozáření od příjmu radionuklidu  $n$  z kontaminované potravy za dobu  $TSPAD \rightarrow TING$  se provede podle schématu:

$$H_{ing}^{a,n,o} = R_{ing}^{a,n,o} \cdot \sum_{(l)} A_l^{a,n} \quad (S45)$$

$R_{ing}^{a,n,o}$  je tabelovaný dávkový konverzní faktor z ozáření při ingestci radionuklidu  $n$  na orgán  $o$  jedince z věkové kategorie  $a$  ( $Sv \cdot Bq^{-1}$ ); z hlediska účinku uvnitř organismu představuje úvazek ekvivalentní resp. efektivní dávky z jednotkového příjmu ingestcí (účinek se vztahuje od okamžiku příjmu do očekávaného konce života pro danou věkovou kategorii  $a$ ).

### 2.3.5 Radiační zátěž od všech nuklidů a všech cest ozáření

Dávka záření na orgán nebo tkáň  $o$  jedince z věkové skupiny  $a$  je dána součtem dávek od jednotlivých uvažovaných nuklidů  $n$  realizovaných různými možnými cestami ozáření  $p$  (externí ozáření z mraku a z depozice, vnitřní ozáření z inhalace, z inhalace z resuspenze a z ingesce). K jejich vyjádření se obecně používá schéma:

$$H^{o,a}(T;x,y) = \sum_p \sum_n H_p^{a,n,o}(T;x,y) \quad (S46)$$

### 3 SUBSYSTÉM PRO ZOBRAZOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

Při běhu úlohy jsou počítány rozsáhlé výstupy týkající se jak časné tak pozdějších fází úniku, které jsou ukládány do výstupního souboru IMPLICIT.OUT (podrobný popis viz dále). Z tohoto textového souboru uživatel může zpracovávat výstupy pomocí:

- i. výběru příslušných dat a jejich další zpracování v externích programových produktech (EXCEL, užití subsystému Array Visualisation produktu Visual Fortran apod.),
- ii. programového vybavení v rámci případných jiných externích modelů následných ochranných opatření,
- iii. zobrazování plně integrovaného s celým výpočetním systémem HARP jako jeho subsystém pro zobrazování výsledků. Podrobný popis uvádíme na dalších stránkách, což současně ukazuje jeden ze směrů dalšího rozvoje systému HARP.

K bodu ii. poznamenejme, že pro jeho potřeby kód HARP generuje všechny nezbytné výstupy, z nichž hlavní je rozsáhlý soubor výstupů IMPLICIT.OUT a jeho příslušný obsah položek (adresář) s názvem SEZNIMPL.OUT. Kromě toho jsou dávány k dispozici položky:

- komentářové řádky o typu varianty výpočtu,
- grupa nuklidů, RADLAM – jejich počet NNUK a rozpadové konstanty RADLAM(n),
- lokační faktory, stínění budovami a filtrace – pro případ dlouhodobé depozice a resuspenze, dále zvolené formule pro dlouhodobé depo a ozáření z depa,
- referenční doba tB pro časnou fázi,
- TRV<sub>ING</sub> a TB<sub>LONG</sub> - trvání ingesčního příjmu a doba, za níž se počítá dlouhodobé ozáření z depozice a resuspenze (podrobněji viz dále v kapitole o implicitních výstupech),
- konverzní faktory z HAVDB00.DAT:

**RA** (J=organ, I=nuklid) , J=1, 7) , I=1, 132

**RS** (J=organ, I=nuklid) , J=1, 7) , I=1, 132

**GIN** (M=organ, J=vek, I=nuklid) , M=1, 6 (bez kuze) , J=1, 6) , I=1, 132

**GIG** (M=organ, J=vek, I=nuklid) , M=1, 6 (bez kuze) , J=1, 6) , I=1, 132

V dalším textu budou popisovány možnosti zobrazování podle bodu iii.

#### 3.1 Přenos výsledků ze základního modulu do subsystému zpracování výsledků

Možnosti zobrazování podle bodu iii. jsou perspektivně vyvíjeny s cílem zobrazovat výsledné veličiny na dvourozměrné výpočtové polární síti s automatickým odečítáním hodnot z polohy kurzoru. Lze volit zobrazení v blízkém, středním a větším okolí (do 100 km od zdroje) na rastrových mapových podkladech.

Jak již bylo řečeno, výsledné výstupní rozhraní představované soubory IMPLICIT.OUT a SEZNIMPL:OUT je zde stejné jako u bodu ii. Uvedeme další detaily týkající se těchto dvou souborů.

V hlavičce souboru IMPLICIT.OUT jsou zapsána základní data výpočtu.

Následují detailní výsledky modelování v časné fázi úniku provedené v hlavním programu. Jsou to pole reprezentující detailní výsledky analýzy časné fáze úniku vztažené k referenční době  $tB$  (obvykle je volena jako 24 hodin po začátku úniku, viz kapitola o segmentovaném modelu):

**TICTOT( $tB; n, i, k$ )** ..... 2-D rozložení integrální objemové aktivity nuklidu  $n$  ( $\text{Bq}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$ ) v přízemní vrstvě vzduchu ve všech bodech výpočtové polární sítě ( $i, k$ ),  $i=1$  až 35 jsou radiální vzdálenosti až do 100 km od zdroje,  $k$  je směr větrné růžice, kde  $k=1$  až 80. **TICTOT** vypočtena podle vztahu (S1).

**DEPTOT( $tB; n, i, k$ )** ..... 2-D rozložení měrné plošné aktivity nuklidu  $n$  ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ) deponované na zemském povrchu ve všech bodech výpočtové polární sítě ( $i, k$ ),  $i=1$  až 35 jsou radiální vzdálenosti až do 100 km od zdroje,  $k$  je směr větrné růžice, kde  $k=1$  až 80. **DEPTOT** vypočtena podle vztahu (S4).

**TIDTOT( $tB; n, i, k$ )** ..... 2-D rozložení časového integrálu aktivity nuklidu  $n$  ( $\text{Bq}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ ) deponovaného na zemském povrchu ve všech bodech výpočtové polární sítě ( $i, k$ ),  $i=1$  až 35 jsou radiální vzdálenosti až do 100 km od zdroje,  $k$  je směr větrné růžice, kde  $k=1$  až 80. **HTOT** počítáno podle vztahu (S8).

Bezprostředně za těmito poli následuje výstup normalizovaných (na jednotku měrné depozice aktivity nuklidu  $n$ ) měrných aktivit **AKTMER**( $n, p$ ) v rostlinných a živočišných produktech  $p$  v  $\text{Bq}/\text{kg}$ (litr) s následným dalším polem **RIA**( $n, a$ ), což jsou normalizované roční příjmy aktivity nuklidu  $n$  jedincem z věkové kategorie  $a$  (suma od všech konzumovaných produktů daných příslušným spotřebním košem). Za touto dvojicí polí vztažených k fiktivní době spadu  $TSPD=1$ . leden následuje stejná dvojice **AKTMER** a **TIA**, tentokrát příslušná ke skutečné době spadu  $TSPD$  (viz diskuse ke vztahu (A20)). Za výše zmíněným polem **HTOT** tedy následuje sekvence polí:

**AKTMER**( $n, p; TSPD=1$ . leden, fiktivní) ..... normalizované měrné aktivity v produktech

**RIA**( $n, a; TSPD=1$ . leden, fiktivní) ..... normalizované roční příjmy aktivity nuklidu  $n$  jedincem z věkové kategorie  $a$ , vztažené k fiktivní době spadu 1. ledna

**AKTMER**( $n, p; TSPD=\text{skutečně zvolený}$ ) ..... normalizované měrné aktivity v produktech

**TIA**( $n, a; TSPD=\text{skutečně zvolený}$ ) ..... normalizované roční příjmy aktivity nuklidu  $n$  jedincem z věkové kategorie  $a$

Ke způsobu určování normalizovaných měrných aktivit (některé z nich jsou definovány konzervativně jako kritické) je nezbytné se obeznámit s podrobným popisem v kapitole o generování normalizovaných měrných aktivit s odvozením vztahů (A1) až (A17). Formát čtyř posledně popisovaných polí je uveden níže v této kapitole.



## 3.2 Dva stupně generování výsledků

Mimořádný objem možných výstupů ze systému HARP navrhujeme při dalším rozvoji výstupního subsystému řešit ve dvou stupních. V prvním stupni jsou implicitně automaticky generovány základní výsledné veličiny. Ve druhém stupni může uživatel na základě dialogu zvolit výstup dalších dodatečných výsledků, které ho zajímají. Výsledky jsou ukládány vždy ve formě dvourozměrných polí podle výpočtové polární ruzice (35 radiálních pásem do 100 km, 80 úhlových sektorů). S každou výsledkovou ruzicí se ukládá a pak dále při grafickém zobrazení na příslušné mapové pozadí znázorní popis typu výsledků (jsou vyhrazeny 2 řádky v záhlaví výsledků).

### 3.2.1 Implicitní výstupy

#### 3.2.1.1 A) Pro časnou fázi úniku vztaženou k době tB (obvykle zvolena 24 hodin po úniku)

jsou zapisována dvourozměrná pole pro:

**Ozáření z mraku:** Vyjdeme ze vztahu (S39) pro polonekonečný model mraku. Výsledná dávka (Sv) v důsledku ozáření z radioaktivního mraku postupujícího nad terénem je spočtena podle:

$$H_{oblak}^{a,o}(i,k) = \sum_{(n)} [TICTOT(n;i,k) \cdot R_{oblak}^{a,n,o}] \quad (V1)$$

$H_{oblak}^{a,o}(x,y)$  ... ozáření z mraku v (Sv) od všech uvažovaných radionuklidů po odeznění úniku nad místem (x,y) na tkáň  $\underline{q}$  jedince z věkové kategorie  $\underline{a}$ , který pobýval po celou dobu úniku v místě uzlu výpočtových polárních souřadnic (i,k) na otevřeném prostranství (jedná se tedy o potenciální dávky)

Celková integrální objemová aktivita v přízemní vrstvě vzduchu TICTOT i příslušný konverzní faktor  $R_{oblak}$  jsou vysvětleny dříve u vztahu (S39).

**Ozáření od kontaminovaného zemského povrchu:** Vyjdeme ze vztahu (S8) pro výslednou dávku od depozice jednotlivých nuklidů v časné fázi úniku. Výsledná dávka (Sv) v důsledku ozáření z depozice od všech nuklidů je spočtena podle:

$$H_{povrch}^{a,o}(tB;n,i,k) = \sum_{(n)} HTOT(tB;n,i,k) = \sum_{(n)} \left[ \sum_{(ISEQ)} \sum_{KFAZ(ISEQ)} \{H(tB,t_{st}(ISEQ,KFAZ);n,i,k;ISEQ,KFAZ)\} \right] \quad (V2)$$

$H_{povrch}^{a,n,o}$  ..... celková dávka záření (Sv) od všech radionuklidů usazených na zemském povrchu na orgán (tkáň)  $\underline{q}$  osoby z věkové kategorie  $\underline{a}$  setrvávající po celou dobu tB na otevřeném prostranství (jde tedy o potenciální dávky) v místě (i,k). Další podrobnosti jsou uvedeny při popisu vztahu (S8).

**Úvazky dávek v důsledku inhalace kontaminovaného vzduchu během přechodu mraku nad terénem:** Vyjdeme ze vztahu (S42) pro úvazky ekvivalentní dávky (Sv) na orgán  $\underline{o}$  pro jedince z věkové kategorie  $\underline{a}$  vyvolané radionuklidem  $\underline{n}$  a ovlivňující orgán  $\underline{o}$  mechanismem dýchání tohoto jedince pobývajících po celou dobu přechodu mraku na otevřeném prostranství v místě  $(i,k)$ . Výsledný úvazek dávky je pak dán součtem příspěvků od všech nuklidů podle:

$$H_{inh}^{a,o}(i,k) = \sum_{(n)} \left[ H_{inh}^{a,n,o}(i,k) \right] = \sum_{(n)} \left[ TICTOT(n;i,k) \cdot u_{inh}^a \cdot R_{inh}^{a,n,o} \right] \quad (V3)$$

Implicitními výstupy pro časnou fázi jsou tedy dvourozměrná pole ve formátu výpočtové polární růžice, u které první dva řádky specifikují typ následujících dat (o kterou veličinu jde, viz dále). Konkrétně po sobě následují růžice:

1. Prostorové rozložení ozáření z mraku podle (V1)
2. Prostorové rozložení ozáření z depozice podle (V2)
3. Prostorové rozložení úvazku dávky z vnitřního ozáření z inhalace podle (V3)
4. Následující výsledky udávají celkové efektivní dávky záření (suma V1+V2+V3) pro časnou fázi úniku pro:
  - a) děti do jednoho roku
  - b) pro dospělé

### 3.2.1.2 B) Implicitní výstupy pro pozdější fáze úniku:

Před výpočtem volí uživatel dvě časové hodnoty pro dlouhodobé dávky:

- a) Dobu trvání pro výpočet dlouhodobé depozice a resuspenze – viz vstupní panely INGMODEL, volba „Základní charakteristiky“, položka „Integrační čas pro dávku z depozice a resuspenze“. Na základě její volby se vypočetla vnitřní proměnná  $TB_{long}$ , která se opět přenesla i do výstupního subsystému.
- b) Dobu trvání ingesčního příjmu – viz vstupní panely INGMODEL, volba „Základní charakteristiky“, položka „Ukončení příjmu kontaminované potravy“. Na základě její volby se vypočetla vnitřní proměnná  $TRV_{ing}$ , která se přenesla i do výstupního subsystému. Přepočteme tuto proměnnou na roky. Potom výsledný úvazek dávky v důsledku ingesce je počítán podle vztahů (S44) a (S45) s následnou sumací dílčích dávek v jednotlivých letech až do doby  $TRV_{ing}$ . Uvedeme tento algoritmus s identifikátory a proměnnými přenesenými z hlavního modulu systému HARP do jeho zde popisovaného výsledkového subsystému. Jsou k dispozici pole:
  - $TIE(n,a)$  .... Normalizované vnitřní roční příjmy aktivity nuklidu  $\underline{n}$  jedincem z věkové skupiny  $\underline{a}$  v 1. roce (spad v tomto roce ve dni  $TSPAD$ )

- $RIE(n,a)$  .... Normalizované vnitřní roční příjmy aktivity nuklidu  $n$  jedincem z věkové skupiny  $a$  za předpokladu, že den spadu  $TSPAD=1$  (neboli spad 1. ledna, což znamená uvažování jen kořenového transportu).

### I. Dlouhodobý časový vývoj depozice na zemském povrchu

Vychází se z hodnot krátkodobé depozice aktivity v referenční době  $tB$  těsně po odeznění úniku ( $tB$  volena (z panelů) obvykle 24 hodin), kdy příslušné hodnoty jsou zapsány v polích  $DEPTOT(tB;n;i,k)$  – viz vztah (S4). Další časový vývoj je podrobně diskutován v dílu manuálu o segmentovaném gaussovském modelu v odstavci „Výpočet charakteristik šíření radionuklidů v pozdějších fázích nehody“, kde se zavádějí alternativní vyjádření podle vztahů (S25a,b,c). Efektivní konstanta  $\lambda_{ef}^n$  je definována jako součet rozpadové, migrační a fixační konstanty podle:

$$\lambda_{ef}^n = \lambda_r^n + \lambda_{mig}^n + \lambda_{fix}^n \quad (V4)$$

Pozn.: Jak bylo uvedeno ke vztahu (S25d), k migraci a lze přidat ekvivalentní snižování aktivity v kořenové zóně odvozem kontaminované biomasy při žních (“loss by harvest”).

V analogii se vztahem (V25a) bude potom dlouhodobá depozice pro zvolenou dobu  $TB_{long}$  počítána dvěma způsoby:

1. Pro účely výpočtů dlouhodobého vnějšího ozáření z depozice a vnitřního ozáření z dlouhodobé resuspenze se předpokládá, že i aktivita fixovaná na malých částech půdy se může dostat do ovzduší, a tudíž usazená měrná aktivita na zemském povrchu  $DEP1$  v  $Bq.m^{-2}$  se určí podle:

$$DEP1(TB_{long};n;i,k) = DEPTOT(tB;n;i,k) \cdot \exp\left\{-\left(\lambda_r^n + \lambda_{mig}^n\right) \cdot (TB_{long} - tB)\right\} \quad (V5)$$

2. Alternativní výpočet dlouhodobé depozice aktivity  $DEP2$  v  $Bq.m^{-2}$  zaváděné jako řídicí veličina pro ingesční cestu vychází z předpokladu, že aktivita fixovaná na malých částech půdy není k dispozici pro kořenový transport zpět do rostlin, a proto se měrná aktivita  $DEP2$  určuje podle:

$$DEP2(TB_{long};n;i,k) = DEPTOT(tB;n;i,k) \cdot \exp\left\{-\left(\lambda_r^n + \lambda_{mig}^n + \lambda_{fix}^n\right) \cdot (TB_{long} - tB)\right\} \quad (V6)$$

### II. Dlouhodobé ozáření z aktivity nuklidů deponovaných na zemském povrchu

Vychází se ze vztahu (S41), který má po přeznačení tvar:

$$H_{povrch}^{a,n,o}(t=0 \rightarrow TB_{long};i,k) = HTOT(tB;n,i,k) + \quad (V7)$$

$$+ R_{povrch}^{a,n,o} \cdot F_{lok}^a \cdot SF_{bud}^a \cdot DEPTOT(tB;n;i,k) \cdot \Delta TID_{nor}^n(tB \rightarrow TB_{long})$$

kde

$H_{povrch}^{a,n,o}$  ..... celková očekávaná dávka záření (Sv) od aktivity radionuklidu  $n$  usazeného na zemském povrchu na orgán (tkáň)  $o$  osoby z věkové kategorie  $a$  žijící po dobu  $TB_{long}$  v běžném životním rytmu v místě  $(i,k)$ .

$R_{povrch}^{a,n,o}$  ..... tabelovaný konverzní faktor (Sv. m<sup>2</sup>.Bq<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>), představující příkon dávkového ekvivalentu od jednotkové měrné aktivity nuklidu  $n$ , usazené na nekonečné ploše kolem bodu receptoru (ten je 1 m nad povrchem).

Ze vztahu (V7) je zřejmá výhoda separace prostorové a časové složky uvažovaných výsledných veličin. Ozáření v časné fázi  $HTOT(tB;n,i,k)$  je definováno vztahem (S8), věkově závislé faktory setrvání v uvažovaném místě  $F_{lok}^a$  a frakce času setrvání uvnitř budov  $SF_{bud}^a$  byly diskutovány v souvislosti se vztahem (S28).  $\Delta TID_{nor}^n$  je normalizovaný (na jednotku počáteční depozice) časový integrál depozice nuklidu  $n$ , který se ve shodě s definicí (S30a) počítá podle:

$$\Delta TID_{nor}^n(tB \rightarrow TB_{long}) = \int_0^{TB_{long}-tB} R(t) \cdot E(t) \cdot dt \quad (V8)$$

Určením dlouhodobých časových integrálů depozice se podrobně zabývá kapitola popisu segmentovaného modelu – viz vztahy (S27 až S31). K rozpadové funkci – viz popis ke vztahu (S29).

Pokud se použije pro  $E(t)$  vyjádření podle doporučení Meckbach-Jacob daného vztahem (S27a), normalizovaný časový integrál depozice se počítá podle:

$$\begin{aligned} \Delta TID_{nor}^n(tB \rightarrow TB_{long}) = & \frac{a_1}{\lambda_{eff1}^n} \left[ 1 - \exp(-\lambda_{eff1}^n \cdot \{TB_{long} - tB\}) \right] + \\ & + \frac{a_2}{\lambda_{eff2}^n} \left[ 1 - \exp(-\lambda_{eff2}^n \cdot \{TB_{long} - tB\}) \right] \end{aligned} \quad (V9a)$$

kde  $\lambda_{eff1}^n = \lambda_r^n + \lambda_l$ ;  $\lambda_{eff2}^n = \lambda_r^n + \lambda_2$ ;  $a_1=0.6$ ;  $a_2=0.4$ ; numerické hodnoty všech konstant jsou uvedeny u vztahu (S27a), všechny konstanty  $\lambda$  v s<sup>-1</sup>.

V příloze 1 kapitoly o segmentovaném modelu jsou uvedeny závislosti dlouhodobého časového integrálu depozice pro různá doporučení pro dlouhodobé průběhy funkce  $E(t)$ . Odtud je zřejmé, že vztah Meckbach-Jacob představuje konzervativní odhad.

Alternativně lze užít jiná doporučení (provedením volby ve vstupním panelu INGMODEL, záložka „Dlouhodobá depozice / resuspenze“ v uživatelském manuálu HAVAR-RP [12]). Pro české oblasti se zdá být vhodnější doporučení průběhu  $E(t)$  podle Bunzl [6] – viz vztah (S27c2), které je deklarováno na základě měření prováděných pro lokality v Německu.

$$\begin{aligned} \Delta TID_{nor}^n(tB \rightarrow TB_{long}) = & \frac{c_1}{\Lambda_{eff1}^n} \left[ 1 - \exp(-\Lambda_{eff1}^n \cdot \{TB_{long} - tB\}) \right] + \\ & + \frac{c_2}{\Lambda_{eff2}^n} \left[ 1 - \exp(-\Lambda_{eff2}^n \cdot \{TB_{long} - tB\}) \right] \end{aligned} \quad (V9b)$$

kde  $\Lambda_{eff1}^n = \lambda_r^n + \lambda_l$ ;  $\Lambda_{eff2}^n = \lambda_r^n + \lambda_2$ ;  $\lambda_l = 6.606E-09$  (s<sup>-1</sup>);  $\lambda_2 = 1.064E-09$  (s<sup>-1</sup>);  $c_1=0.331$ ;  $c_2=0.254$ ; numerické hodnoty všech konstant jsou uvedeny u vztahu (S27c2).

Shodou okolností tento druhý vztah (V9b) odhaduje efekt ozáření s menším stupněm konzervatismu.

Celková dávka od všech nuklidů se vypočte podle:

$$H_{povrch}^{a,o}(t=0 \rightarrow TB_{long}; i, k) = \sum_{(n)} H_{povrch}^{a,n,o}(t=0 \rightarrow TB_{long}; i, k) \quad (V10)$$

### III. Dlouhodobé vnitřní ozáření v důsledku vdechování vzduchu kontaminovaného procesy resuspenze aktivity původně deponované na zemském povrchu

Základní vztah mezi okamžitou měrnou aktivitou radionuklidu deponovanou na zemském povrchu a resuspendovanou objemovou aktivitou v přízemní vrstvě vzduchu je vyjadřován koeficientem resuspenze podle vztahu (S33). Použijeme poloempirické dvousložkové vyjádření koeficientu resuspenze podle kódu OSCAAR podle vztahu (S34a). Příslušný příkon vnitřního příjmu aktivity nuklidu  $\underline{n}$  se dále rozlišuje podle intenzity dýchání v jednotlivých věkových skupinách podle (S35). Celkový vnitřní příjem aktivity v důsledku resuspenze za dobu  $TB_{long}$  bere v úvahu frakci času setrvání v uvažovaném místě a dále filtrační efekt při běžném režimu pobytu jedinců uvnitř budov. Je vyjádřen vztahem (S36). Úvazky takové inhalační dávky jsou vyjádřeny vztahem (S43), který přepíšeme pomocí již definovaných řídicích proměnných za účelem snadnější algoritmicke jako:

$$H_{inh,RES}^{a,n,o,k}(TB_{long}; i, k) = R_{inh}^{a,n,o} \cdot u_{inh}^a \cdot F_{lok} \cdot [(1 - f_{bud}) + f_{bud} \cdot FF_{filtr}] \cdot DEPTOT^n(tB; n; i, k) \cdot TIR_{nor}^n(TB_{long}) \quad (V11)$$

Časový integrál  $TIR_{nor}^n$  přízemní resuspendované objemové aktivity nuklidu  $\underline{n}$  normalizovaný na jednotkovou depozici v časné fázi je ve shodě s (S37) vyčíslován podle:

$$TIR_{nor}^n(TB_{long}) = \frac{k_{fast}}{\lambda_1^n} [1 - \exp(-\lambda_1^n \cdot TB_{long})] + \frac{k_{slow}}{\lambda_2^n} [1 - \exp(-\lambda_2^n \cdot TB_{long})] \quad (V12)$$

Význam konstant:

$$\lambda_1^n = \lambda_{ef}^n + \lambda_{RES}^{fast} / \tau [s^{-1}]; \quad \lambda_{RES}^{fast} = \ln 2 / T_{1/2RES}^{fast} [rok^{-1}]; \quad \tau = 3600 \cdot 24 \cdot 365 [s / rok]$$

$$\lambda_2^n = \lambda_{ef}^n + \lambda_{RES}^{slow} / \tau [s^{-1}]; \quad \lambda_{RES}^{slow} = \ln 2 / T_{1/2RES}^{slow} [rok^{-1}];$$

Je vidět, že jde o analogii s definicemi kolem vztahu (S38) s tím rozdílem, že  $\lambda_{ef}^n$  je definována hořejším vztahem (V4) bez fixační složky, tedy  $\lambda_{ef}^n = \lambda_r^n + \lambda_{mig}^n$ , což je v souladu s výpočtem dlouhodobé depozice podle (V5).

Celkový úvazek dávky od všech nuklidů se vypočte podle:

$$H_{inh,RES}^{a,o,k}(TB_{long}; i, k) = \sum_{(n)} H_{inh,RES}^{a,n,o,k}(TB_{long}; i, k) \quad (V13)$$

#### IV. Dlouhodobé vnitřní ozáření v důsledku konzumace kontaminovaných potravin

Úvodní diskuse k zahrnutí ingesční cesty do výpočtů úvazků efektivních a ekvivalentních dávek vnitřního ozáření je provedena v kapitole segmentovaného modelu kolem vztahů (S44 až S46). Podle této metodiky jsou pomocí dynamického modelu ingesce spočteny výše zmíněné hodnoty:

$RIA(n,a; TSPD=1$ . leden, fiktivní) ..... normalizované roční příjmy aktivity nuklidu  $\underline{n}$  jedincem z věkové kategorie  $\underline{a}$  za předpokladu fiktivního dne spadu  $TSPD=1$ ;

$TIA(n,a; TSPD =$  skutečně zvolený) ..... normalizované roční příjmy aktivity nuklidu  $\underline{n}$  jedincem z věkové kategorie  $\underline{a}$  za předpokladu skutečného (zvoleného) dne spadu v roce  $TSPD$  (juliánský formát)

Jsou to celkové normalizované roční příjmy radionuklidu  $\underline{n}$  od všech produktů konzumovaných jedincem z věkové kategorie  $\underline{a}$  za předpokladu různých dnů spadu v roce. Metodologický základ tvoří nová kapitola o výstupech normalizovaných měrných aktivit rostlinných a živočišných produktů, konkrétně odvození vztahů (A18, A19, A20). Hodnoty  $TIA$  jsou vztaženy k roku spadu a zahrnují jak kořenový transport aktivity do rostlin tak dominantní listovou cestu. Hodnoty  $RIA$  umožní odhadnout kořenový transport aktivity zpět do rostlin, kdy pro výpočet jejich normalizovaných hodnot je učiněn předpoklad fiktivního spadu 1. ledna každého následujícího roku.

Nechť je zvolena hodnota  $TRV_{ing}$  v rocích,  $TRV_{ing} \geq 1$ . V prvním roce spadu konzumací kontaminované potravy přijme jedinec z věkové kategorie  $\underline{a}$  vnitřně aktivitu nuklidu  $\underline{n}$  podle:

$$A1_{ING}^{a,n}(i,k) = DEPTOT(tB;n;i,k) \cdot TIA(n,a;TSPD) \quad (V14a)$$

V roce  $r$  po spadu je příjem radionuklidu  $\underline{n}$  počítán jako:

$$A2_{ING}^{a,n}(r;i,k) = DEP2(T_r;n;i,k) \cdot RIA(n,a;TSPD=1) \quad (V14b)$$

$DEP2$  je vyjádřeno podle vztahu (V6), ve kterém čas  $T_r = (365-TSPD) + (r-1) \cdot 365$  (dny)

Celkový příjem radionuklidu  $\underline{n}$  za dobu  $TRV_{ing}$  jedincem z  $\underline{a}$  konzumujícího potravinu vyprodukované v místě  $(i,k)$  je pak dán vztahem:

$$ATOT_{ING}^{a,n}(TRV_{ing};i,k) = A1_{ING}^{a,n}(i,k) + \sum_{r=1}^{TRV_{ing}-1} A2(r;i,k)_{ING}^{a,n} \quad (V15)$$

a ve shodě s výrazem (S45) bude prováděno určení 50-ti resp. 70-ti letých úvazků dávky  $H_{ing}$  (Sv) na orgán nebo tkáň  $\underline{o}$  jedince ze skupiny  $\underline{a}$  z vnitřního ozáření od příjmu radionuklidu  $\underline{n}$  z kontaminované potravy (vyprodukované v místě  $i,k$ ) za dobu  $TRV_{ing}$  podle schématu:

$$H_{ing}^{a,n,o}(TRV_{ing};i,k) = R_{ing}^{a,n,o} \cdot ATOT_{ING}^{a,n}(TRV_{ing};i,k) \quad (V16)$$

Na tomto místě je třeba upřesnit, že předcházející úvahy je možno vztáhnout k určitým alternativním způsobům konzumace. Ingesční modul INGMODEL umožňuje zadat do výpočtů následující volby spotřebního koše všech věkových kategorií:

- I. **Lokální spotřební koš** : Konzervativní schéma „lokální produkce x lokální spotřeba“ v každém výpočtovém uzlu ( $i, k$ )
- II. **Farmáři** : Jen některé produkty vyrobené v ( $i, k$ ) jsou zde i konzumovány
- III. **Globální spotřební koš** : Jen určitá frakce celkové spotřeby produktů se realizuje z produktů, vypěstovaných v místě ( $i, k$ )

Touto problematikou se podrobně zabývá příslušná část popisu rozšíření stávajícího ingesčního modelu. Speciálním případem jsou odhady příspěvků k ingesčním dávkám pro některé kritické skupiny obyvatel v důsledku zvýšené konzumace speciálních produktů (houby, lesní bobule, maso lesní zvěře).

Celková 2-D distribuce úvazku ingesční dávky od všech nuklidů se vypočte podle:

$$H_{ing}^{a,o} (TRV_{ing} ; i, k) = \sum_{(n)} H_{ing}^{a,n,o} (TRV_{ing} ; i, k) \quad (V17)$$

Zbývá nadefinovat typy implicitních výstupů pro celkové dávky. Na základě kompromisu mezi objemem výpočtů a realizovatelností byly celkově navrženy:

- Časná fáze: Dávka v důsledku ozáření z mraku pohybujícího se nad terénem – podle vztahu (V1)
- Časná fáze: Dávka v důsledku ozáření z depozice – podle vztahu (V2)
- Časná fáze: Úvazek efektivní dávky v důsledku inhalace kontaminovaného vzduchu – podle vztahu (V3), děti a dospělí, efektivní + thyro
- Časná fáze: suma ozář. mrak + ozář. depozice + inhalace (efektivní); děti a dospělí, efektivní + thyro
- Dlouhodobé efektivní dávky a ekvivalentní dávka na štítnou žlázu podle vztahu (V10) z ozáření od zemského povrchu, zahrnující i ozáření v časně fázi
- Celkové úvazky efektivní dávky v důsledku dlouhodobé resuspenze podle vztahu (V13). Uvažován inhalační příjem pro  $TB_{long} = 1, 5$  a  $50$  roků, věková kategorie dospělí
- Celkové úvazky efektivní dávky v důsledku ingesce podle vztahu (V17). Uvažován ingesční příjem pro  $TRV_{ing} = 1$  rok,  $2, 5$  a  $50$  roků, všechny věkové kategorie
- Totální suma všech dávek (časná fáze i dlouhodobá) : suma ozář. mrak + ozář. depozice + inhalace + inhalace (resusp) + ingesce;  $TRV_{ing} = TB_{long} = 1$  rok a dále  $TRV_{ing} = TB_{long} = 50$  roků; efektivní + thyro, děti + dospělí

### 3.2.2 Formát implicitních výstupů z HARP

Segmentovaný model píše hlavní výstupy do souboru IMPLICIT.OUT. Jednotlivé položky výsledků jsou zde uvedeny identifikační řádkou. Seznam identifikačních řádek je souběžně při výpočtu vytvářen jako soubor SEZNIMPL.OUT a je uveden níže. Identifikační řádky jsou používány při dalším zobrazování výsledků. Jsou uvažovány 4 typy položek výsledků, které jsou rozlišeny znakem v 1. sloupci identifikačního řádku. Jsou to znaky: #, \$, &, %.

1. Pokud id. řádek začíná #, potom následuje 2-D růžice výsledků (80 řádek pro každý směr úhlového sektoru *m*, číslování od severu po směru hodin v každém řádku je 35 hodnot pro jednotlivé radiální vzdálenosti od zdroje).
2. Pokud id. řádek začíná znakem \$ nebo &, následují speciální výsledky z ingesčního modelu (normalizované měrné aktivity v produktech, normalizované ingesční roční příjmy). Formát těchto výsledků je popsán v nové kapitole „Výstupy normalizovaných měrných aktivit rostlinných a živočišných produktů“ a dále pak ve vytvářeném manuálu „Aplikace systému HARP v oblasti radiační ochrany“.
3. Pokud id. řádek začíná znakem %, následující 2-D růžice obsahuje příspěvky jednotlivých nuklidů k efektivní dávce pro dospělé (viz popis zde na konci)

Pozn.: Na konci každého řádku je za řetězcem „VARIANTA“ uvedena identifikace a časová známka běhu původního výpočtu.

Vysvětlivky ke kódům:

#TIC: Time-Integrated Concentration ; #DEP: Specific activity deposition ; #TID: Time-Integrated Deposition

Všechny tři identifikátory jsou za dvojtečkou následovány příslušným nuklidem (8 znaků)

Dávky: začínají dvěma znaky #D ;

Význam 3. znaku: C pro časovou fázi, alternativně D pro dlouhodobé dávky

Význam 4. znaku: M pro MRAK), D pro DEPO, H pro INHALACI,  
R pro RESUSPENZI, G pro INGESCI, T – TOTÁLNÍ od všech cest

Další znaky aot=ijk =>

- věk a=i-tá věková kategorie : i=1;2;3;4;5;6 => kojenci (< 1rok ; <1r,2r); <2r,8r); <8r,12r); <12r,18r); dospělí (> 18r)  
!!! pro i=0 => daná dávka je pro všechny věkové kategorie uvažována stejná
- orgán o=j ; orgán (tkáň) : j=1;2;3;4;5;6 => eff. dáv. ekviv.; gonády; kostní dřeň; plíce; thyroid; tlusté střevo
- id časové periody t : popsána v poznámce (pro dlouhodobou depozici a resuspenzi rovna TBlong, pro ingesci TRVing) (pro časovou fázi hodnota neuvedena, automaticky je myšlena krátkodobá referenční hodnota tB - obvykle voleno 24 hod od počátku úniku)

\$SAKT:ddd. Normalizované měrné aktivity v produktech - nejkritičtější hodnoty - obvykle v okamžiku sklizně (podrobně kapitola „Výstupy normalizovaných měrných



aktivit...“). Obecně 30 potravních produktů, pro každý z N počítaných nuklidů; ddd. = Juliánský den spadu v roce (1. až 365. )

**&PRJ:ddd.** Normalizované (na jednotku depozice) ingesční roční příjmy aktivity jednotlivých nuklidů ; ddd. = Juliánský den spadu v roce (1. až 365. ) - závisí silně na zvoleném spotřebním koši apod.

**%KCB:nuklid** (KoláčeCasnátB) - postupně pro všechny nuklidy následují příslušné růžice výsledků obsahujících příspěvky jednotlivých nuklidů k efektivní dávce pro dospělé v časné fázi (MRAK+DEPO+INHALACE, do ref. doby tB)

**%KD1:nuklid** (KoláčeDlouho1rok) - postupně pro všechny nuklidy následují příslušné růžice výsledků obsahující příspěvky jednotlivých nuklidů k roční efektivní dávce pro dospělé (předchozí časná fáze + dlouhodobé ozáření z depozice, resuspenze a ingesce)

**%KD5:nuklid** (KoláčeDlouho50roků) - postupně pro všechny nuklidy následují příslušné růžice výsledků obsahující příspěvky jednotlivých nuklidů k 50-ti leté efektivní dávce pro dospělé (předchozí časná fáze + dlouhodobé ozáření z depozice, resuspenze a ingesce)

Poznámka k výpočtu koláčových grafů:

Je zvolen bod výpočtové růžice  $(i, k)$  :  $i$ = radiál. vzdál. 1 až 35  
 $k$ = směr větrné růžice 1 až 80

Následuje volba, ke které době se koláč bude dělat. Jsou tři možnosti:

1. časná fáze - dělá se z růžic %KCB:nuklid
2. 1 rok - dělá se z růžic %KD1:nuklid
3. 50 roků - dělá se z růžic %KD5:nuklid

V tomto bodě zemského povrchu  $(i, k)$  se sečtou odpovídající hodnoty v růžicích každého nuklidu. Procentní příspěvek nuklidu  $n$  označený  $p^n$  k celkové efektivní dávce pro dospělé  $D$  se určí podle:

$$p^n (\%) = \frac{D^n(i, k)}{\sum_{j=1}^{j=N} D^j(i, k)} \cdot 100$$

To znamená, že když se v grafu najede na určitý bod polární sítě a následně se stiskne ikonka koláčového grafu, zobrazí se procentní příspěvky jednotlivých nuklidů k efektivní dávce pro dospělé v tomto místě.

Na následující stránce je vytisknut seznam identifikačních řádek, který je souběžně při výpočtu vytvářen jako soubor SEZNIMPL.OUT.

## Tisk souboru SEZNIMPL.OUT:

## SEZNAM IMPLICITNICH VYSTUPU

\*\*\*\*\*

Kód	Veličina	Rozměr	Poznámka	ID. běhu výpočtu
---	-----	-----	-----	-----
#TIC:SR90	Integrální přízemní objemová aktivita vzduchu	Bq.s/m3	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#DEP:SR90	Měrná depozice aktivity na zemském povrchu	Bq/m2	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#TID:SR90	Časový integrál měrné depozice aktivity	Bq.s/m2	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#TIC:Y90	Integrální přízemní objemová aktivita vzduchu	Bq.s/m3	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#DEP:Y90	Měrná depozice aktivity na zemském povrchu	Bq/m2	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#TID:Y90	Časový integrál měrné depozice aktivity	Bq.s/m2	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#TIC:I131	Integrální přízemní objemová aktivita vzduchu	Bq.s/m3	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#DEP:I131	Měrná depozice aktivity na zemském povrchu	Bq/m2	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#TID:I131	Časový integrál měrné depozice aktivity	Bq.s/m2	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#TIC:I134A	Integrální přízemní objemová aktivita vzduchu	Bq.s/m3	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#DEP:I134A	Měrná depozice aktivity na zemském povrchu	Bq/m2	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#TID:I134A	Časový integrál měrné depozice aktivity	Bq.s/m2	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#TIC:CS137	Integrální přízemní objemová aktivita vzduchu	Bq.s/m3	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#DEP:CS137	Měrná depozice aktivity na zemském povrchu	Bq/m2	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#TID:CS137	Časový integrál měrné depozice aktivity	Bq.s/m2	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
\$AKT: 1.	Normalizované měrné aktivity v produktech	Bq/kg(1)	Julian. den spadu: 1.	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
&PRJ: 1.	Normaliz. ingesční roční příjmy aktiv. nuklidu	Bq/rok	Julian. den spadu: 1.	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
\$AKT:182.	Normalizované měrné aktivity v produktech	Bq/kg(1)	Julian. den spadu:182.	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
&PRJ:182.	Normaliz. ingesční roční příjmy aktiv. nuklidu	Bq/rok	Julian. den spadu:182.	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#DCM:ao=01	Externí ozáření z mraku	Sv	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#DCD:ao=01	Externí ozáření z depozice na zemském povrchu	Sv	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#DCH:ao=11	Úvazek dávky záření z inhalace	Sv	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#DCH:ao=61	Úvazek dávky záření z inhalace	Sv	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#DCH:ao=15	Úvazek dávky záření z inhalace	Sv	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#DCH:ao=65	Úvazek dávky záření z inhalace	Sv	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#DCT:ao=11	Totální úvazek dávky: MRAK+DEPO+INHALACE	Sv	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#DCT:ao=61	Totální úvazek dávky: MRAK+DEPO+INHALACE	Sv	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#DCT:ao=15	Totální úvazek dávky: MRAK+DEPO+INHALACE	Sv	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#DCT:ao=65	Totální úvazek dávky: MRAK+DEPO+INHALACE	Sv	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
%KCB:SR90	% nuklidu ke krátkodobé dávce (eff., dospělí)	Sv	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
%KCB:Y90	% nuklidu ke krátkodobé dávce (eff., dospělí)	Sv	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
%KCB:I131	% nuklidu ke krátkodobé dávce (eff., dospělí)	Sv	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
%KCB:I134A	% nuklidu ke krátkodobé dávce (eff., dospělí)	Sv	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
%KCB:CS137	% nuklidu ke krátkodobé dávce (eff., dospělí)	Sv	Časná fáze: tB=24.hod;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#DDD:aot=011	Dlouhodobé externí ozáření z depozice	Sv	Čas TBlong= 7.den;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#DDD:aot=012	Dlouhodobé externí ozáření z depozice	Sv	Čas TBlong= 30.den;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#DDD:aot=013	Dlouhodobé externí ozáření z depozice	Sv	Čas TBlong= 90.den;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#DDD:aot=014	Dlouhodobé externí ozáření z depozice	Sv	Čas TBlong= 365.den;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005
#DDD:aot=015	Dlouhodobé externí ozáření z depozice	Sv	Čas TBlong= 1825.den;	VARIANTA:Letni- počasí- ; 28.6.2005

Rozšíření metodiky systému HARP

#DDD:aot=016	Dlouhodobé externí ozáření z depozice	Sv	Čas TBlong= 18250.den;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDR:aot=614	Vnitřní ozáření z dlouhodobé resuspenze	Sv	Čas TBlong= 1.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDR:aot=615	Vnitřní ozáření z dlouhodobé resuspenze	Sv	Čas TBlong= 5.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDR:aot=616	Vnitřní ozáření z dlouhodobé resuspenze	Sv	Čas TBlong= 50.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=111	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 1.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=211	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 1.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=311	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 1.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=411	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 1.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=511	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 1.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=611	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 1.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=112	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 2.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=212	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 2.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=312	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 2.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=412	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 2.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=512	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 2.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=612	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 2.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=113	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 5.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=213	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 5.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=313	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 5.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=413	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 5.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=513	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 5.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=613	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 5.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=114	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 50.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=214	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 50.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=314	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 50.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=414	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 50.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=514	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 50.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDG:aot=614	Vnitřní ozáření z dlouhodobé ingesce	Sv	Čas TRVing= 50.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDT:aot=611	Totální úvazky z časné i pozdější fáze	Sv	Čas TRVing= 1.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDT:aot=612	Totální úvazky z časné i pozdější fáze	Sv	Čas TRVing= 5.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
#DDT:aot=613	Totální úvazky z časné i pozdější fáze	Sv	Čas TRVing= 50.rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
%KD1:SR90	% nuklidu k dlouhodobé eff. dávce pro dospělé	Sv	Dlouhodobý čas= 1rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
%KD1:Y90	% nuklidu k dlouhodobé eff. dávce pro dospělé	Sv	Dlouhodobý čas= 1rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
%KD1:I131	% nuklidu k dlouhodobé eff. dávce pro dospělé	Sv	Dlouhodobý čas= 1rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
%KD1:I134A	% nuklidu k dlouhodobé eff. dávce pro dospělé	Sv	Dlouhodobý čas= 1rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
%KD1:CS137	% nuklidu k dlouhodobé eff. dávce pro dospělé	Sv	Dlouhodobý čas= 1rok;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
%KD5:SR90	% nuklidu k dlouhodobé eff. dávce pro dospělé	Sv	Dlouhodobý čas=50roku;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
%KD5:Y90	% nuklidu k dlouhodobé eff. dávce pro dospělé	Sv	Dlouhodobý čas=50roku;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
%KD5:I131	% nuklidu k dlouhodobé eff. dávce pro dospělé	Sv	Dlouhodobý čas=50roku;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
%KD5:I134A	% nuklidu k dlouhodobé eff. dávce pro dospělé	Sv	Dlouhodobý čas=50roku;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005
%KD5:CS137	% nuklidu k dlouhodobé eff. dávce pro dospělé	Sv	Dlouhodobý čas=50roku;	VARIANTA:Letni- počasi- ; 28.6.2005

**Pozn.:** Na konci každého řádku je za řetězcem „VARIANTA“ uvedena identifikace a časová známka běhu původního výpočtu.

### 3.2.3 Výstup výsledků na základě interaktivní volby

Kromě implicitních výsledků může uživatel generovat další požadované výstupy ve formě jednotlivých 2-D růžic. Panel nabízí celou škálu možností:

Wybete typ interaktivního vstupu:

- Časový vývoj depozice nuklidů
- Časový vývoj ozáření z depozice
- Úvazky dávek při ingesci
- Totální dávky (úvazky)
- 2-D distribuce měrných aktivit v potravinách

→ Další

Po označení volby je ve většině případů nutné dále definovat integrační časy  $TB_{long}$  a  $TRV_{ing}$  (je zřejmé, že pro většinu běhů budou obě hodnoty stejné). Potom lze například pro 4. položku při pokračování volit dvě alternativy:

#### ***Výsledné totální efektivní a ekvivalentní dávky a jejich úvazky s rozlišením podle***

- věkových skupin: volba jedné z hodnot 1 až 6, přičemž:
  - a=1 ..... kojenci
  - a=2 ..... děti 1 - 2 roky
  - a=3 ..... děti 2 - 7 roků
  - a=4 ..... děti 7 - 12 roků
  - a=5 ..... děti 12 - 17 roků
  - a=6 ..... dospělí
- typu orgánu či tkáně : volba jedné z hodnot 1 až 6, přičemž:
  - o=1 ..... celotělová
  - o=2 ..... gonády

- o=3..... červená kostní dřev
- o=4..... plíce
- o=5..... štítná žláza
- o=6..... vrchní část tlustého střeva

Uživatel tedy může interaktivně zvolit dvojici  $(a, o)$ , přičemž se do mezivýsledkového souboru přepíše další příslušná růžice.

Důležitou volbou je poslední volba v panelu, která umožňuje kromě jiného i testování překročení limitů měrné aktivity v potravinách. Objeví se další subpanely:

#### 2-D zobrazení kritických aktivit jednotlivých radionuklidů v potravních produktech

Normalizované (na jednotku depozice) měrné aktivity v potravinových produktech jsou obsaženy v primárních výsledcích IMPLICIT.OUT, kdy jsou generovány 2 varianty (viz předchozí popis):

$AKTMER(n, p; TSPD = 1. \text{ leden, fiktivní})$  ..... normalizované měrné aktivity v produktech za předpokladu fiktivního spadu v roce 1. ledna

$AKTMER(n, p; TSPD = \text{skutečně zvolený})$  ..... normalizované měrné aktivity v produktech za předpokladu skutečného dne spadu v roce

2-D rozložení kritických měrných aktivit v 1. roce (rok spadu) se vypočtou podle vztahu:

$$AKT(n, p; TSPD = \text{skut.}, i, k) = AKTMER(n, p; TSPD = \text{skut.}) \cdot DEPTOT(tB; n; i, k) \quad (V18a)$$

Pole měrných aktivit příslušných k fiktivnímu spadu 1. ledna zahrnuje pouze vliv kořenového transportu a umožňuje určit průběhy kritických měrných aktivit v potravinových produktech v dalších letech. Použijeme úvahu analogickou při odvození vztahu (V14b). V roce  $r$  po spadu lze kritické aktivity v produktech počítat jako:

$$AKT(n, p; TSPD = \text{fikt.}, r; i, k) = DEP2(T_r; n; i, k) \cdot AKTMER(n, p; TSPD = \text{fikt.}, i, k) \quad (V18b)$$

$DEP2$  je vyjádřeno podle vztahu (V6), ve kterém  $T_r = (365 - TSPAD) + (r-1) \cdot 365$

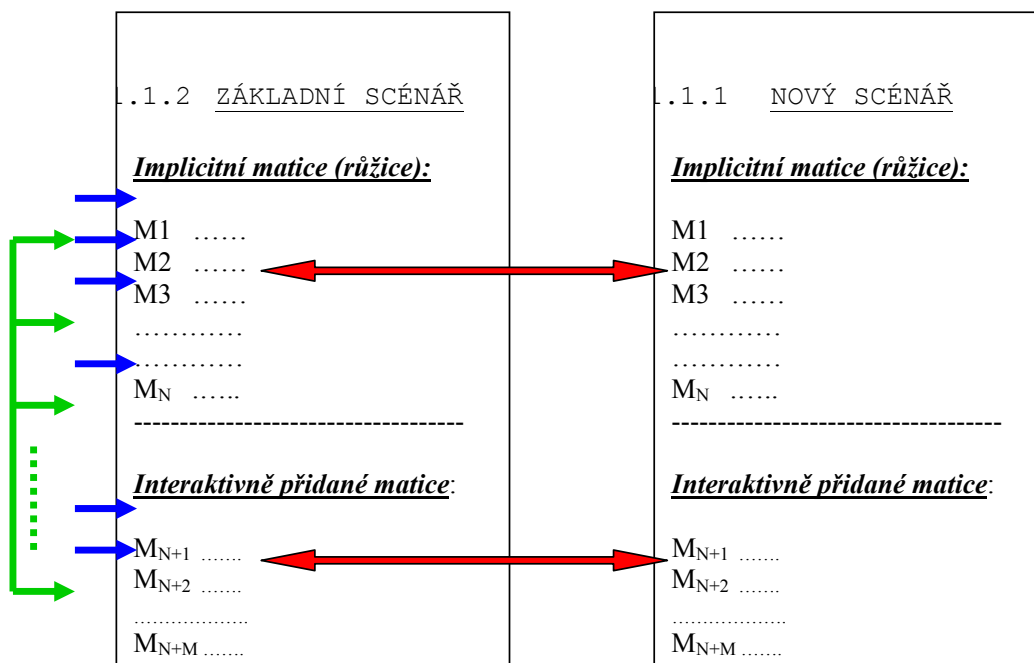
Uživatel tedy může opět interaktivně zvolit trojici  $(r, n, p)$ , přičemž se do mezivýsledkového souboru přepíše další příslušná růžice. Význam jednotlivých parametrů je následující:

- $r$  ..... číslo roku po spadu,  $r=0$  je pro běžný rok spadu
- $n$  .... číslo nuklidu, které je voleno na základě nabídnutého seznamu nuklidů
- $p$  .... identifikátor typu produktu, podle nabídnutého seznamu produktů (zatímní seznam je uveden též v nové kapitole o aktivitách v produktech)




### 3.3 Zobrazovací grafický modul

V novém návrhu integrovaného výstupního subsystému je možné si uložené výsledky představit v maticové 2-D reprezentaci. Řádky a sloupce matice odpovídají směrům (80 směrů) a radiálním vzdálenostem (35 pásem do 100 km) výpočtové polární sítě. Možnosti grafické prezentace výsledků ukazuje následující schéma:

Možnosti zobrazování: 2-D na mapových pozadích; 1-D pro libovolný řádek matice (směr),  
výhledově: 1-D pro libovolný sloupec (periferní po kružnici)



Legenda:

-  2-D, 1-D zobrazení jednotlivých matic, koláčové grafy (ve 2-D) nuklidů a cest ozáření
-  Srovnání výsledků více matic v 1-D grafech (v libovolně zvoleném směru)
-  Vliv protipatření srovnáním odpovídajících matic (1-D, v libovolně zvoleném směru)

Všechny výsledky počínaje implicitními růžicemi a dále výsledky interaktivně vybrané uživatelem jsou zapsány do mezivýsledkového souboru, který je potom předán do zobrazovacího modulu, vyvíjeného ve spolupráci s externími spolupracovníky. Zobrazovací modul umožňuje zobrazit výsledné veličiny ve formě výsledkové růžice na dvourozměrné

výpočtové polární síti (35 radiálních vzdáleností do 100 km od zdroje, 80 úhlových sektorů) s automatickým odečítáním hodnot z polohy kurzoru.

Do zobrazovacího výstupního subsystému jsou postupně integrovány funkce testování vlivu protiopatření zaváděných na dlouhodobé dávky, zvláště pak na dávky z ingesce. V současné době lze z hlediska protiopatření provádět:

- a) Kontrolu měrných aktivit v produktech - nejkritičtější hodnoty - obvykle v okamžiku sklizně. Obecně je zahrnuto 30 potravních produktů, pro každý z N počítaných nuklidů. Uživatel může interaktivně zvolit, zda chce hodnoty vztažené k době spadu nebo v některém z dalších roků  $n$  po spadu ( $n=1$  až 49).
- b) Omezit distribuci kontaminovaných potravin na základě interaktivně zadávaných frakcí spotřeby ( bezrozměrné hodnoty z intervalu  $<0,1>$  ) nebo případně posouvat doby zdržení ke konzumaci jednotlivých potravin.
- c) Modifikaci hodnot ingesčního modelu, která se provádí na základě interaktivního vyvolání panelů INGMODEL. Je zřejmé, že takto lze modifikovat nejen velký rozsah ingesčních parametrů (potraviny, fenologii, scénáře výkrmu apod. – viz popis ingesčního panelu INGMODEL), ale i další parametry, například pro půdní transport, dlouhodobou depozici, resuspenzi, apod.

**Ukázka výstupu pro 3 nuklidy****AKTMER(n, p; TSPD=1. leden, fiktivní) :**

Normalizovane merne aktivity v produktech (koren, TSPD=1.0):

I131	rostlinne:	3.93E-10	3.90E-14	6.05E-15	1.96E-12	3.93E-12	5.44E-15	6.26E-15	1.49E-10
		2.18E-12	1.65E-13	1.78E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	zivocisne:	6.23E-07	5.87E-14	9.79E-07	0.00E+00	1.40E-07	6.96E-11	3.67E-14	7.33E-13
		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
I134A	rostlinne:	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	zivocisne:	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CS137	rostlinne:	1.41E-03	1.36E-03	9.82E-04	1.43E-04	2.86E-04	7.02E-04	5.61E-03	1.43E-03
		1.41E-03	1.39E-03	1.49E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	zivocisne:	1.56E-04	2.10E-05	1.63E-03	0.00E+00	1.99E-04	3.35E-03	4.12E-05	3.09E-06
		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

**RIA(n,a; TSPD=1. leden, fiktivní):**

Normalizovane rocni prijmy aktivity (koren, TSPD=1.0)

	vek=1	vek=2	vek=3	vek=4	vek=5	vek=6
I131	1.92E-03	3.14E-02	4.10E-02	4.51E-02	3.52E-02	1.51E-02
I134A	1.40E-45	1.54E-44	1.96E-44	2.10E-44	1.82E-44	5.61E-45
CS137	2.24E-01	1.38E-01	2.01E-01	2.68E-01	2.05E-01	2.05E-01

**AKTMER(n, p; TSPD=skutečně zvolený):**

Normalizovane merne aktivity v produktech (skutečne TSPD):

I131	rostlinne:	0.00E+00	7.92E-07	2.80E-07	3.47E-03	7.01E-03	4.06E-07	3.11E-08	6.48E-03
		1.69E-05	8.08E-07	2.71E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	zivocisne:	9.49E-02	4.43E-07	1.49E-01	0.00E+00	2.13E-02	3.03E-03	3.24E-06	6.48E-05
		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
I134A	rostlinne:	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
		0.00E+00	0.00E+00	2.71E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	zivocisne:	9.49E-02	0.00E+00	1.49E-01	0.00E+00	2.13E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CS137	rostlinne:	0.00E+00	3.17E-03	1.75E-03	5.45E-02	1.10E-01	1.85E-03	5.96E-03	1.19E-01
		1.51E-02	3.18E-03	2.60E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	zivocisne:	2.73E-02	1.37E-04	2.86E-01	0.00E+00	3.09E-02	2.79E-01	5.50E-03	4.12E-04
		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

**TIA(n,a; TSPD= skutečně zvolený):**

Normalizovane rocni prijmy aktivity (skutečne TSPD):

	vek=1	vek=2	vek=3	vek=4	vek=5	vek=6
I131	2.13E-02	3.36E-01	4.39E-01	4.84E-01	3.79E-01	1.64E-01
I134A	1.40E-44	2.65E-43	3.45E-43	3.67E-43	3.19E-43	1.09E-43
CS137	2.31E+00	1.45E+00	2.03E+00	2.82E+00	2.41E+00	2.64E+00



#### 4 VÝSTUPY NORMALIZOVANÝCH MĚRNÝCH AKTIVIT ROSTLINNÝCH A ŽIVOČIŠNÝCH PRODUKTŮ

Při běhu programu se pro jednotlivé nuklidy do hlavního výsledkového souboru IMPLICIT.OUT zapisují pole normalizovaných (na jednotkovou depozici) měrných (na kg či litr) aktivit rostlinných a živočišných produktů v okamžiku sklizně resp. počátku konzumace:

AKTMER<sup>n</sup>(p=1 až 30)    m<sup>2</sup>/kg    [ (Bq/kg ,litr) / (Bq/m<sup>2</sup>) ]

- p=1 ..... zelenina jarní
- p=2 ..... zelenina podzimní
- p=3 ..... zelenina kořenová
- p=4 ..... zelenina plodová
- p=5 ..... obilí
- p=6 ..... brambory
- p=7 ..... ovoce
- p=8 ..... ječmen jarní
- p=9 ..... kukuřice (nazeleno)
- p=10 ..... řepný chrást
- p=11 ..... pícniny (!!!volná pastva nebo stájový výkrm)
- p=12 ..... brambory rané
- p=13 ..... houby
- p=14 ..... bobule
- p=15 ..... plodina15
- p=16 ..... plodina16
- p=17 ..... mléko (od pícnin)
- p=18 ..... mléko (siláž-chrást)
- p=19 ..... hovězí(od pícnin)
- p=20 ..... hovězí(od siláže)
- p=21 ..... vepřové (syrovátka hned)
- p=22 ..... vepřové (ječmenný šrot , hned ze sklizně)
- p=23 ..... drůbež
- p=24 ..... vejce
- p=25 ..... králíci (20 ve spotř. koši)
- p=26 ..... zvěřina (zajíci + divočáci – ve spotř. koši 27)
- p=27 ..... produkt27
- p=28 ..... produkt28
- p=29 ..... produkt29
- p=30 ..... produkt30

*Pozn.: Toto pořadí se zobrazuje ve výsledkovém subsystému při interaktivní volbě 2-D měrné aktivity... , přičemž toto pořadí obecně nemusí odpovídat pořadím ve fenologii nebo spotřebních koších.*

Výpočet normalizovaných měrných aktivit v produktech  $p$  pro danou dobu spadu  $t_{spd}$  a dobu sklizně  $t_{skl}$  pro  $p=1$  až 10 se provádí podle :

$$A_p^n(t_{spd}, t_{skl}^p) = {}^L \mathcal{E}_p^n(t_{spd}, t_{skl}^p) + {}^K \mathcal{E}_p^n(t_{spd}, t_{skl}^p) \quad (A1)$$

kde indexy L a K značí listovou a kořenovou cestu přenosu aktivity do rostliny (vztahy (5.10) a (5.13) ze základního metodického manuálu HAVAR [11]). Listový transport pro zeleninu kořenovou, plodovou, brambory a obilniny zahrnuje zpřesněnou translokaci (podle ECOSYS [2]) do jedlé části. V důsledku důležitosti pro potraviny č. 5 (obilí) je zde provedeno ještě další rozlišení s ohledem na mobilitu nuklidu. Obecně u těchto potravin se normalizovaná měrná aktivita rovná aktivitě v době sklizně od listového přenosu (s modifikací na translokaci) a od kořenového přenosu, tedy analogicky vztahu (A1).

Pro pícniny (s rozlišením režimu pěstování na 3 seče) je třeba zahrnout předpoklad okamžitého spásání kontaminované trávy, neboli počátek zkrmování je roven  $t_{spd}$  (pokud se spád vyskytne uvnitř vegetačních period pícnin). Pro  $t_{spd} < t_{veg1}$  je  $p11$  vztažena k nejbližšímu počátku růstu seče pícnin. Normalizovaná měrná aktivita pícnin vztažená ke dni spadu je:

$$A_{p=11}^n(t_{spd}) = {}^L \mathcal{E}_p^n(t_{spd}) + {}^K \mathcal{E}_p^n(t_{spd}) \quad (A2)$$

kde listový a kořenový transport se počítá podle:

$${}^L \mathcal{E}_p^n(t_{spd}) = R^p \cdot \frac{1}{V_c^p(t=t_{spd})} ; \quad {}^K \mathcal{E}_p^n(t_{spd}) = (1 - R^p) \cdot \frac{BV_p^n}{PH_p} \quad (A3)$$

Zde :

$V_c^p$  ..... čistý výnos pícnin seče  $p$  v čerstvém stavu ve dni spadu ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )

$R^p$  ..... frakce aktivity deponované při spadu na listové části (-)

$BV_p^n$  ..... tabelovaný koncentrační faktor ( (Bq/kg rostliny) / (Bq/kg v půdě) )

$PH_p$  ..... efektivní povrchová hustota kořenové zóny ( $\text{kg} / \text{m}^2$ ) ;

K dalším rostlinným produktům jsou přiřazeny indexy 12 (brambory rané), 13 (houby) a 14 (lesní bobule). Základní data pro houby a lesní bobule uvádí model RADCON [9]. Jako potraviny ve spotřebním koši však mají tyto položky indexy 18, 25 a 24. Ve smyslu kapitoly o rozšíření a extra konzumaci se počítají kritické normalizované měrné aktivity v těchto produktech podle:

**p=12** : rané brambory (ve fenologii mají č. 21, v koši č. 18) : Měrná normalizovaná aktivita (její konzervativní hodnota) se počítá podle modelu kontinuální sezónní sklizně - viz kapitola 7 v [13] o rozšíření ingesčního modelu.

**p=13** : houby (ve fenologii mají č. 17, v koši č. 25) : Měrná normalizovaná aktivita je dána doporučenými hodnotami přenosových (agregovaných) koeficientů TC (viz kapitola 7 v [13] o algoritizaci rozšíření ingesčního modelu) s rozlišením pro jód, stroncium, cesium a plutonium.

**p=14** : lesní bobule (ve fenologii mají č. 16, v koši č. 24) : Měrná normalizovaná aktivita je opět dána přenosovým (agregovaným) koeficientem TC pro lesní bobule (viz kapitola 7 v [13] - algoritizace) s rozlišením pro jód, stroncium, cesium a plutonium.

#### 4.1 Výpočet kritických normalizovaných (na jednotkovou depozici) měrných aktivit v živočišných produktech:

**p=17** : mléko od píce; V  $p_{11}$  je nejvyšší měrná normalizovaná aktivita ( $\text{kg}^{-1}$ ) v nejkritičtějších dni (s ohledem na dobu spadu a vegetační periodu odpovídající seče). Předpokládá se okamžité zkrmování kontaminované píce s denní krmnou dávkou (léto). Pak příjem normalizované aktivity radionuklidu  $\underline{n}$  krávou v nejkritičtějších dni je:

$$E_{pice}^n = p_{11} * PDK_{pice} \quad (A4)$$

Kde  $PDK_{pice}$  je letní denní krmná dávka pícnin pro dojnice (= 35 kg/den). Dále jsou k dispozici (např. [11]) tabulky rovnovážných přenosových koeficientů  $F_b^n$  [ d/kg, d/l ] pro přenos nuklidu  $n$  do produktů živočišné výroby  $\underline{b}$ . Konkrétně  $F_b^n$  představují frakci denního příjmu radionuklidu  $\underline{n}$  zvířetem, která se objeví v každém litru resp. kilogramu živočišného produktu  $\underline{b}$ . Takže konečně měrná aktivita radionuklidu  $n$  (normalizovaná na jednotkovou depozici) v 1 litru mléka je dána vztahem:

$$A_{mléko}^n (\text{píce}) = p_{11} * PDK_{pice} * F_{mléko}^n \quad (A5)$$

Pozn: Lze provést výpočet pro zimní výkrm: zkrmování kontaminovaného sena z příslušné seče (popřípadě sečí) plus siláž.

**p=18** : mléko od siláže; V  $p_9$  je nejvyšší měrná normalizovaná aktivita ( $\text{kg}^{-1}$ ) kukuřice nazeleno ve dni její sklizně  $t_{skl}(kukuř)$ . Obdobně v  $p_{10}$  je nejvyšší měrná normalizovaná aktivita ( $\text{kg}^{-1}$ ) řepného chrástu ve dni jeho sklizně  $t_{skl}(chrast)$ . Neuvažujeme rozdílnost obou dob sklizně a vypočteme příjem normalizované aktivity radionuklidu  $\underline{n}$  krávou v nejkritičtějších dni v důsledku výkrmu siláží (siláž je chrást + kukuřice nazeleno v poměru 1 : 1) jako:

$$E_{siláž}^n = p_9 * (PDK_{siláž} / 2) + p_{10} * (PDK_{siláž} / 2) \quad (A6)$$

Potom měrná aktivita radionuklidu  $n$  (normalizovaná na jednotkovou depozici) v 1 litru mléka v důsledku zkrmování kontaminované siláže je dána vztahem:

$$A_{mléko}^n (\text{siláž}) = [ p_9 * (PDK_{siláž} / 2) + p_{10} * (PDK_{siláž} / 2) ] * F_{mléko}^n \quad (A7)$$

Pozn.: V případě mléka je možno aktivitu přepočíst s uvažováním doby zdržení ke konzumaci.

**p=19** : hovězí od pícnin; Opět vyjdeme z  $p_{11}$ , kde je nejvyšší měrná normalizovaná aktivita ( $\text{kg}^{-1}$ ) v nejkritičtějších dni. Předpokládá se okamžité zkrmování kontaminované píce s denní krmnou dávkou (léto). Pak příjem normalizované aktivity radionuklidu  $\underline{n}$  býky v nejkritičtějších dni je dán vztahem (A4).  $PDK_{pice}$  je letní denní krmná dávka pícnin pro býky (= 40 kg/den). Pokud by býk byl poražen týž den, pak by jeho maso mělo měrnou aktivitu radionuklidu  $n$  (normalizovanou na jednotkovou depozici) v 1 kg :

$$A_{hovězí}^n (\text{píce}) = p_{11} * PDK_{pice}(\text{býci}) * F_{hovězí}^n \quad (A8)$$

$PDK_{býci}^{píce}$  je letní denní krmná dávka pícnin pro býky (= 40 až 55 kg/den).

**p=20** : hovězí od siláže ; Analogicky s úvahami pro  $p=18$  a  $p=19$  bude měrná aktivita radionuklidu  $n$  (normalizovaná na jednotkovou depozici) v 1 kg hovězího masa v důsledku zkrmování kontaminované siláže býky dána vztahem:

$$A^n_{hovězí(siláž)} = [p9 * (PDK^{býci}_{siláž} / 2) + p10 * (PDK^{býci}_{siláž} / 2)] * F^n_{hovězí} \quad (A9)$$

$PDK^{býci}_{siláž} = 15$  kg/den pro zimní výkrm

**p=21** : vepřové maso od syrovátky ; Jde o syrovátku vyráběnou z kontaminovaného mléka, u kterého jsme určili měrnou aktivitu radionuklidu  $n$  (normalizovaná na jednotkovou depozici) v 1 litru mléka v důsledku zkrmování kontaminované píče vztahem (A5), obdobně při zkrmování siláže vztahem (A7). Pro výpočet aktivity v syrovátce uvažujeme konzervativně výchozí aktivitu mléka jako součet vztahů (A5) a (A7), i když z časového hlediska je to nekonzistentní. Pro syrovátku vezmeme údaje o faktoru přepracování  $P_{pr}$  z ECOSYS [2]. Ten je uváděn velmi blízký hodnotě 1, kromě obsahu Sr, které má při technologii srážení syřidlem hodnotu 0.4. V dalším však pro všechny nuklidy použijeme konzervativní hodnotu 1. Výchozím údajem bude tedy konzervativní odhad pro aktivitu v syrovátce s využitím vztahů (A5) a (A7) podle:

$$A^n_{syrov} = [A^n_{mléko(píče)} + A^n_{mléko(siláž)}] \cdot P_{pr}(syrov) \quad (A10)$$

Pak denní příjem normalizované aktivity radionuklidu  $n$  prasetem v nejkritičtějších dni v důsledku zkrmování syrovátky („okamžitě“ vyrobené z kontaminovaného mléka) je:

$$E^n_{syrov} = A^n_{syrov} * PDK_{syrov}(prase) \quad (A11)$$

$PDK_{syrov}$  je denní krmná dávka syrovátky pro prase. Potom měrná aktivita radionuklidu  $n$  (normalizovaná na jednotkovou depozici) v 1 kg vepřového masa v důsledku zkrmování kontaminované syrovátky prasetem je dána vztahem:

$$A^n_{vepřové(syrovátka)} = E^n_{syrov} * F^n_{vepřové} \quad (A12)$$

$F^n_{vepřové}$  představuje frakci denního příjmu radionuklidu  $n$  zvířetem, která se objeví v každém kilogramu vepřového masa.

**p=22** : vepřové maso od obilí ; Konzervativně se bude uvažovat šrot z ječmene, který se vyrobí hned po sklizni. V  $p8$  je nejvyšší měrná normalizovaná aktivita ( $kg^{-1}$ ) v nejkritičtějších dni – dni sklizně ječmene. Měrná aktivita radionuklidu  $n$  (normalizovaná na jednotkovou depozici) v 1 kg vepřového masa v důsledku zkrmování šrotu (denní krmná dávka šrotu  $PDK_{šrot} = 2.6$  kg/den) je dána vztahem:

$$A^n_{vepřové(šrot)} = p8 * PDK_{šrot} * F^n_{vepřové} * P_{pr}(šrot) \quad (A13)$$

$P_{pr}(šrot)$  je faktor přepracování pro šrot z obilí.

*Pozn.:* Zavedením faktoru zdržení mezi sklizní ječmene a dobou konzumace šrotu lze provést méně konzervativní výpočty.

**p=23** : drůbeží maso od obilí ; Konzervativně se bude uvažovat případ, kdy ke krmení drůbeže se použije čerstvě sklizené obilí. Uvažuje se směs pšenice a ječmene v poměru 1 : 1 . Celková denní dávka pro brojlerů je  $PDK_{obilí}(drůbež) = 120$  g/den. Z předchozího postupu je zřejmé, že měrná aktivita radionuklidu  $n$  (normalizovaná na jednotkovou depozici) v 1 kg drůbežího masa v důsledku zkrmování obilí lze vyjádřit podle:

$$A^n_{drůbež}(obilí) = [p5 * (PDK_{obilí}(drůbež)/2) + p8 * PDK_{obilí}(drůbež)/2] * F^n_{drůbež} \quad (A14)$$

**p=24:** vejce od obilí ; za stejných předpokladů jako v předchozím paragrafu pro  $p=23$  bude měrná aktivita radionuklidu  $n$  (normalizovaná na jednotkovou depozici) v 1 kg vajec v důsledku zkrmování obilí vyjádřena podle:

$$A^n_{vejce}(obilí) = [p5 * (PDK_{obilí}(drůbež)/2) + p8 * PDK_{obilí}(drůbež)/2] * F^n_{vejce} \quad (A15)$$

*Pozn.: V programu je místo  $PDK_{obilí}(drůbež)$  provedeno rozlišení  $PDK_{obilí}(drůbež) = DRUB(1) + DRUB(2)$ , kde  $DRUB(1)$  je denní krmná dávka pšenice a druhý člen je totéž pro jarní ječmen.*

**p=25:** králíčí maso od trávy ( $\equiv$  pícniny);

$$A^n_{králík}(tráva) = p11 * PDK_{trávae}(králík) * F^n_{králík} \quad (A16)$$

$PDK_{trávae}(králík) = 0.25$  kg/den; potíž je s nalezením  $F^n_{králík}$ , lze konzervativně odhadnout z údajů o zvěřině z [7,8]. Pro limitní odhady lze předpokládat celou roční konzumaci v den spadu.

**p=26:** zvěřina (divočák + zajíc); Konzervativní postup při zjednodušení:

- zvěřina (č.26 v prod., č. 27 ve spotřebním koši)
- přerozdělíme: SPOTR(27,a) : 1/2 zajíc, 1/2 divočák; existují naše údaje pro ČR nejkritičtější podskupinu myslivců: zvěřiny v kg/osobu/rok
- zajíc = králík
- divočák: konzumace zatím jen hlína/den + brambory/den, přenos z (hlíny + brambor); přechod do masa –  $F^n_{divo}$  jako vepřové; Prase divoké podle RODOS: 5kg/den; nechť jde o 5 kg brambor + navíc 1 kg hlíny; v bramborách je měrná normalizovaná aktivita  $p6$  jako pro konzumaci u lidí.

Měrná aktivita  $A_{1KG}$  v 1 kg lesní hlíny normalizovaná na jednotkový spad je dána frakcí jednotkového spadu na půdu podělenou efektivní povrchovou hustotou lesní kořenové zóny. Je respektováno snižování aktivity v půdě s časem od doby spadu, přičemž kromě radioaktivního rozpadu se uvažuje odstraňování aktivity z kořenové zóny v důsledku dalších mechanismů odstraňování aktivity (migrace, případné splachy).

Program HARP produkuje pole shora definovaných kritických normalizovaných měrných aktivit v produktech a ukládá je k dalšímu použití do pole  $AKTMER(n,p)$ , kde  $n$  jsou čísla nuklidů a  $p$  jsou uvažované produkty definované na začátku této kapitoly. Výpočet se provádí ve dvou variantách, a to pro:

1. skutečný den spadu v roce  $TSPD$  (juliánský den), kdy je uvažován jak dominantní přenos aktivity listovou částí tak příspěvek od kořenového transportu,
2. fiktivní den spadu 1. ledna (juliánský den = 1.0), za účelem respektování jediného mechanismu transportu aktivity do rostlin kořenovou cestou, což je výchozí hodnota pro výpočty úvazků dávek od ingesce v dalších letech po spadu.

Shora navržené výpočtové schéma odráží subjektivní názor autorů na to, co je kritická hodnota (složená například z dílčích příspěvků jednotlivých krmiv, které ale jsou obecně nesynchronní) a ke kterému okamžiku ji vztáhnout. Jiná hlediska i názory expertů lze v budoucím vývoji zahrnout.

Stejně tak tato kapitola bude při dalším předpokládaném rozvoji ingesčního modelu rozšiřována o další produkty  $p$ .

## 4.2 Výpočet plošného rozložení kritických měrných aktivit kolem zdroje (absolutní hodnoty pro konkrétní scénář)

S odvoláním na 1. kapitulu : „*Segmentovaný Gaussův model – numerický výpočet řídicích proměnných a odhady radiologických veličin*“ je použito:

A) **V prvním roce spadu**, respektován konkrétní den spadu v roce (juliánské datum) :

$$AKT_{abs}^{n,p}(tB, i, k; q) = DEPTOT(tB, n, i, k) \cdot A_p^n(q) \quad (A17)$$

kde

$AKT_{abs}^{n,p}(tB, i, k; q)$  .... Absolutní měrná aktivita (Bq/kg) (vztažená k referenční době  $tB$ , to znamená ve dni spadu,  $tB$  hodin od počátku úniku) nuklidu  $n$  v produktu  $p$  (rostlinném či živočišném); navíc pro živočišný produkt vzniklá konzumací (zkrmováním) komodity  $q$ ; platí pro libovolný uzel výpočtové polární sítě  $(i, k)$ ,  $i=35$  radiálních vzdáleností s rozdělením do 100 km od zdroje úniku,  $k=1$  až 80 rovnoměrného úhlového rozdělení kolem zdroje.

$DEPTOT(tB, n, i, k)$  .... Plošné rozložení aktivity nuklidu  $n$  (Bq/m<sup>2</sup>) usazeného na zemském povrchu vztažené k časné fázi úniku charakterizované dobou  $tB$  (viz podrobný popis v kapitole SGM, vztah (S4)).

$A_p^n(q)$  ..... Měrná aktivita nuklidu  $n$  v produktu  $p$  v (m<sup>2</sup>.kg<sup>-1</sup>) normalizovaná na jednotkovou depozici, v případě živočišných produktů  $p$  jde o aktivitu vyvolanou zkrmováním komodity  $q$ .

B) **V  $m$ -tém roce po spadu** (prozatím se neuvažuje pozdější resuspenze zpět na listovou část) použijeme schéma:

$$AKT_{abs}^{n,p}(T_x, i, k; q) = \Omega_{root}^n(T_x, i, k) \cdot A_p^n(q, t_{spd} = 1.0) \quad (A18)$$

$$T_x = (\tau - TSPAD) + (m-1) * \tau; \quad \tau = 365 * 24 * 3600 \text{ s};$$

$\Omega_{root}^n = DEPTOT(TD, n, i, k)$  podle vztahu (S25d), kde  $TD = T_x$ .  $T_x$  je doba od spadu (s) k 1. 1. roku  $m$  po spadu. Lze použít i jiné modifikace, nicméně musí být zahrnuta fixace nuklidu v půdě, což představuje frakci aktivity, která není k dispozici pro kořenový transport.

Měrné normalizované aktivity  $A_p^n(q, t_{spd} = 1.0)$  pro zimní spad se počítají za předpokladů:

- Fiktivní spad v roce  $m$  po spadu je juliánský den 1 (neboli 1. leden každého dalšího roku po roce spadu)
- Uvažován pouze kořenový transport do rostlin

### 4.3 Výpočet normalizovaných ročních vnitřních příjmů aktivity v důsledku požívání kontaminované potravy

Hlavním výstupem ingesčního modelu systému HARP jsou roční vnitřní příjmy aktivity jedinci ze všech věkových kategorií v důsledku ingesce normalizované na jednotkovou depozici. Měrná normalizovaná aktivita ( $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ) v produktu  $p$  ve dni zahájení konzumace člověkem se určí podle schématu:

$$AKTMER^n(\Delta t_{zdr}^p, p) = AKTMER^n(t_{spd}, t_{skl}^p, p) \cdot \exp\left[-\lambda^n \cdot (t_{skl}^p + \Delta t_{zdr}^p)\right] \quad (A19)$$

$AKTMER^n(t_{spd}, t_{skl}^p, p)$  je měrná normalizovaná aktivita ( $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ) produktu  $p$  v okamžiku sklizně daná vztahem (A1)

$\lambda^n$  je konstanta radioaktivního rozpadu nuklidu  $n$ ;  $t_{skl}^p$  je doba sklizně vztažené k produktu  $p$  a  $\Delta t_{zdr}^p$  je doba zdržení k jeho konzumaci.

Roční normalizovaný příjem aktivity ( $\text{m}^2$ ) radionuklidu  $n$  jedincem z věkové kategorie  $a$  v důsledku přímé konzumace produktu  $p$  je dán integrací:

$$IA_p^{n,a}(t_{skl}^p + \Delta t_{zdr}^p \rightarrow t_{end}) = \int_{t_{skl}^p + \Delta t_{zdr}^p}^{t_{end}} AKTMER^n(t, p) \cdot PD_p^a \cdot dt \quad (A20)$$

$t_{end}$  je zadaná doba skončení konzumace produktu  $p$  v roce, která je volena v základním panelu INGMODEL. Je obvykle zadávána jako konec běžného roku (juliánský den 365), alternativně ji lze prodloužit například o 1/3 roku následujícího (přibližný počátek další sklizně) anebo konečně ji lze zadat jako sezónní konzumaci, kdy je chápána jako  $t_{end}^p$ .

S odvoláním na vztahy pro výpočet časového průběhu aktivit v živočišných produktech uvedených v základním metodickém manuálu systému HAVAR [11] uvedeme, že vztah (A20) platí i pro konzumaci živočišných produktů, kde za  $AKTMER$  se dosazují časové průběhy aktivit (opět s respektováním doby zdržení k jejich konzumaci) vycházející z již určených výše uvedených vztahů (A5, A7, A8, A9, A12, A13, A14, A15).

Celkový normalizovaný roční příjem aktivity ( $\text{m}^2$ ) radionuklidu  $n$  od všech produktů konzumovaných jedincem z věkové kategorie  $a$  (konzumace určeny spotřebním košem) je dán součtem:

$$IA_{TOT}^{n,a}(t_{end}) = \sum_{(p)} IA_p^{n,a}(t_{skl}^p + \Delta t_{zdr}^p \rightarrow t_{end}) \quad (A21)$$

Tyto výsledky se opět generují dvakrát pro:

1. Skutečný den spadu v roce  $TSPD$  (juliánský den), kdy je uvažován jak dominantní přenos aktivity listovou částí tak příspěvek od kořenového transportu. Normalizované roční příjmy aktivity podle vztahu (A21) se ukládají jako dvourozměrné pole  $TIA(n,a)$  v ( $\text{m}^2$ ), kde  $n$  je číslo uvažovaného nuklidu v daném úniku a  $a$  je věková kategorie ( $a=1$  až 6). Jejich plošné rozložení je opět dáno přenásobením skutečnou distribucí na terénu ve shodě s předchozími vztahy (A17) a (A18).
2. Fiktivní den spadu 1. ledna (juliánský den = 1.0), za účelem respektování jediného mechanismu transportu aktivity do rostlin kořenovou cestou, což je výchozí hodnota pro výpočty úvazků dávek od ingesce v dalších letech po spadu. Příslušné normalizované roční příjmy aktivity se ukládají jako dvourozměrné pole  $RIA(n,a)$

$v$  ( $m^2$ ), kde  $n$  je číslo uvažovaného nuklidu v daném úniku a  $\underline{a}$  je věková kategorie ( $a=1$  až  $6$ ). Jejich plošné rozložení je opět dáno přenásobením skutečnou distribucí na terénu ve shodě s předchozími vztahy (A17) a (A18).



## 5 METEOROLOGICKÝ PREPROCESOR SYSTÉMU HARP

Je funkční ORACLE client pro prostředí WINDOWS. Dále byly s výhodou využity zkušenosti s podobnou konverzí z prostředí ORACLE do UNIX prostředí systému RODOS. Systém HARP je ve Státním ústavu radiační ochrany napojen na databázový systém ORACLE, do kterého chodí:

- Meteorologická měření ze stanic na jaderných zařízeních EDU a ETE
- Krátkodobé meteorologické předpovědi pro místo JE, vyslán povel:

```
kkc4rodos_fecz -c rodos/rodos@xxxx -s ETE -d 20050608-0300 -n 36 -f HRCFRC
                ↓           ↓           ↓           ↓           ↓
                1           2           3           4           5
```

1 .... Která elektrárna : „ETE“ | „EDU“

2 ..... Datum úniku : „YYYYMMDD“

3 .... Hodina úniku: „HHMM“ (hodina, minuta)

4 .... Počet hodinových předpovědí

5 .... Jméno souboru, kam zapsat výstup z ORACLE (dát natvrdo jméno HRCFRC= do current adr)

- 3-D předpovědi na 48 hodin pro okolí 160 x 160 km kolem jaderného zařízení

Těmto vstupům je přizpůsoben algoritmus produktu HARP.

## 6 INTERAKTIVNÍ PODPORA PRO ASIMILAČNÍ SUBSYSTÉM

V souvislosti s prudkým rozvojem výpočetní techniky jsou zaváděny složitější algoritmy respektující pokročilé fyzikální modely. Jinou cestou jdou postupy založené na procedurách obecně zvaných *data mining*, které v krajním případě obcházejí fyzikální modelování a spoléhají se výlučně na pozorování. A tam, kde tato pozorování nejsou k dispozici, se použijí jednoduché metody matematické interpolace a extrapolace. Technika „data mining“ může být úspěšně používána v těch oblastech, pro které není k dispozici adekvátní model a je shromážděn dostatek informativních dat. V situaci, kdy jsou data zatížena velkými chybami měření či jsou málo vypovídající, vede ignorování akumulované fyzikální (oborové) znalosti k chybným predikcím.

Jediným realistickým východiskem z problému představuje syntéza obou přístupů, nazývaná termínem asimilace dat. Ve svém obecném významu jde o modifikaci výsledků modelu pomocí měřených hodnot, přičemž ve schématu asimilace je současně respektována znalostní apriorní informace obsažená v modelu.

### *Metoda postupných korekcí SCM (Successive corrections)*

Uvažujme situaci, kdy model poskytuje první odhad v bodech polární mříže  $\underline{i}$  a dále jsou k dispozici naměřené hodnoty  $\underline{k}$ . Je k dispozici alespoň rámcový expertní odhad poměru  $\varepsilon^2$  disperzí chyb měření k chybám modelu. Objektivní analýza metody SCM je vyjádřena iteračním cyklem v bodu mříže  $\underline{i}$  a začíná nultou iterací  $x_i^0$  ztotožněnou s daným prvním odhadem (background)  $x_i^0 \equiv x_i^b$ . Postupné upřesňování v dalších iteracích  $\underline{m}$  se děje podle:

$$x_i^{m+1} = x_i^m + \left( \sum_{k=1}^{K(im)} w_{ik}^m \cdot (y_k^p - x_k^m) \right) / \left( \sum_{k=1}^{K(im)} w_{ik}^m + \varepsilon^2 \right) \quad (4)$$

V  $m$ -té iteraci se berou v úvahu pozorování  $y_k^p$  ( $k=1, \dots, K(i,m)$ ) ve sféře vlivu kolem bodu  $\underline{i}$ . Hodnoty  $x_k^m$  jsou hodnoty předchozí iterace přetřansformované pomocí operátoru pozorování z bodů výpočetní mříže do míst pozorování  $\underline{k}$ . Toto schéma je založeno na empiricky volených vahách  $w_{ik}^m$ . V nich se mohou (ale také nemusí) odrážet určité fyzikální nebo statistické vlastnosti. Při  $\varepsilon^2 \rightarrow 0$  se výsledky analýzy pomocí SCM v bodech měření přiklánějí k hodnotám zde měřeným. Vzhledem k empirické volbě  $w$  a  $\varepsilon^2$  patří SCM k empirickým metodám, nicméně byla dlouhodobě úspěšně používána na superpočítačích v oblasti meteorologických předpovědí.

### *Základní statistická metoda objektivní analýzy – optimální interpolace (OI)*

Nechť jsou k dispozici modelové odhady  $i$  měření, jejichž kvalita je vyjádřena pomocí kovariančních matic chyb modelu a měření. Krok analýzy asimilačního cyklu metody OI hledá optimální hodnoty vektoru analýzy  $\mathbf{x}^a$  na základě kritéria minimalizace chyb procedury analýzy (1). Optimální oprava má, viz např. [1,4], tvar:

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^b + \mathbf{W} \mathbf{d} \quad (1)$$

Vektor inovací je definován podle  $\mathbf{d} = \mathbf{y}^p - \hat{H}(\mathbf{x}^b)$ , přičemž  $\hat{H}$  je (lineární) operátor pozorování transformující hodnoty modelu do pozic pozorování podle schématu:

$$(\mathbf{x}^b)^p = \hat{H}(\mathbf{x}^b) \quad (2)$$

N-rozměrné vektory chyb  $\boldsymbol{\varepsilon}^b$  odhadu modelem, chyb  $\boldsymbol{\varepsilon}^a$  výsledné analýzy  $\boldsymbol{x}^a$  a P-rozměrný vektor chyb pozorování  $\boldsymbol{\varepsilon}^p$  definujeme vztahy:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^b = \boldsymbol{x}^b - \boldsymbol{x}^s; \quad \boldsymbol{\varepsilon}^a = \boldsymbol{x}^a - \boldsymbol{x}^s; \quad \boldsymbol{\varepsilon}^p = \boldsymbol{y}^p - \hat{H}(\boldsymbol{x}^s)^p \quad (3)$$

Index  $\underline{s}$  označuje skutečnou hodnotu, kterou odhadujeme. Ta je sice neznámá, nicméně lze zavést určité předpoklady o jejích statistických vlastnostech. Bez dalších detailů uvedeme výsledný vztah pro optimální váhovou matici  $W$  plynoucí z podmínky minimalizace chyby analýzy:

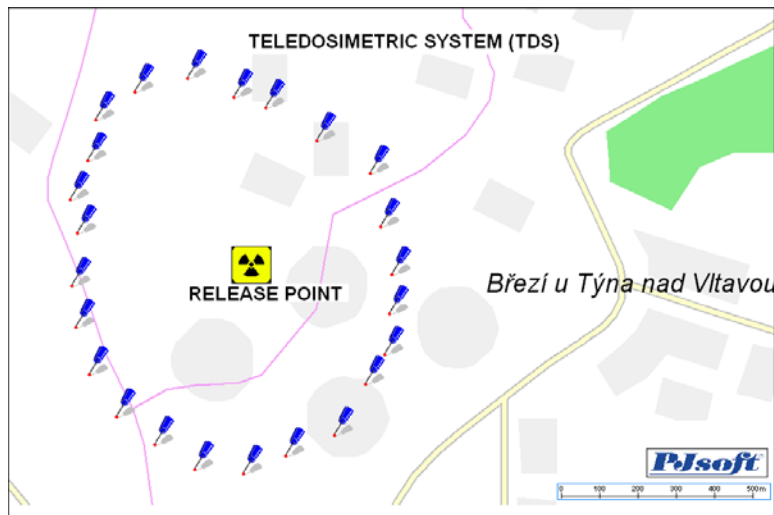
$$W = BH^T (HBH^T + R)^{-1} \quad (4)$$

Horní indexy  $T$  a  $-1$  po řadě označují operaci transponování a inverze.  $H$  je matice  $P \times N$  sdružená s operátorem pozorování.  $B$  značí kovarianční matici ( $N \times N$ ) chyb modelu počítané jako střední hodnota  $\langle \boldsymbol{\varepsilon}^b (\boldsymbol{\varepsilon}^b)^T \rangle$ , tedy s prvky  $b_{ij} = \langle e_i^b \cdot e_j^b \rangle$ ;  $e_i, e_j$  jsou složky vektoru chyb,  $\langle \rangle$  je operátor střední hodnoty. Tuto střední hodnotu lze odhadnout pomocí Monte Carlo procedury z velkého počtu  $K$  realizací modelu. Hodnota  $K$  musí být podstatně větší než je rozměr stavu, tedy řádově několik tisíc. Z důvodů efektivity je nutné užít metodu vzorkování LHS (Latin Hypercube Sampling) pro generování  $M$ -tic náhodných vstupních parametrů modelu  $\{z_1^k, z_2^k, \dots, z_M^k\}_{k=1, \dots, K}$ . Postupným dosazováním těchto  $M$ -tic do modelu se získá zmíněných  $K$  náhodných realizací  $N$ -rozměrného vektoru  $\boldsymbol{x}^b$ .  $R$  značí kovarianční matici ( $P \times P$ ) chyb pozorování počítanou jako střední hodnota  $\langle \boldsymbol{\varepsilon}^p (\boldsymbol{\varepsilon}^p)^T \rangle$ . Optimální váhová matice je tedy dána součinem kovariancí chyb modelu promítnutých do prostoru pozorování a inverzí součtu kovariance chyb modelu a pozorování.

#### ***Použití moderních asimilačních variačních technik a adaptivních statistických postupů založených na bayesovské interpretaci***

Jedná se o rozšíření dimenze úlohy o časovou složku s využitím technik Kalmanových filtrů a s nutností zahrnout časovou evoluci statistik chyb modelu. Téma je řešeno v ÚTIA v rámci grantu podpořeného Grantovou agenturou ČR. V současné době (Q3, 2009) byly ověřeny vhodné asimilační techniky pro použití v pozdějších fázích nehody. Dokončuje se ověřování bayesovského přístupu pro komplikovanou úlohu asimilace v časně fázi nehody.

Časná fáze: TDS na plotě ETE – 24 senzorů:





## 7 REFERENCE

- [1] IAEA-BIOMASS-4 : Testing of environmental transfer models using Chernobyl fallout data, WG of BIOMASS Theme 2, IAEA, April 2003
- [2] Müller H., Pröhl G.: ECOSYS'87: A Dynamic Model for Assessing Radiological Consequences of Nuclear Accidents. Health Physics, Vol. 64, No. 3, 1993.
- [3] Homma T., Matsunaga T.: OSCAAR Calculations for the Input Dose Reconstruction Scenario of BIOMASS Theme 2. JAERI – Research 2000-059, 2001.
- [4] Brown J., Simmonds J. R.: FARMLAND: A Dynamic Model for the Transfer of Radionuclides through Terrestrial Foodchains. NRPB, NRPB-R273, 1995.
- [5] Brown J. : FARMLAND: Validation and Verification Studies on the NRPB Dynamic Terrestrial Foodchain Model, NRPB, NRPB-M523, 1995.
- [6] Bunzl K., Jacob P., Ivanov Y, Kruglov S. V., ...: Cs137 mobility in soils and its long-term effect on the external radiation exposure. Radiat. Environ. Biophys.(1997), 36: 31-37.
- [7] Model description of the terrestrial food chain and dose module FDMT in RODOS PV 6.0. RODOS (RA3) – TN(03) – 06, 2003.
- [8] Documentation of the terrestrial food chain and dose module FDMT in RODOS. RODOS (WG3) – TN(98), 2000.
- [9] Modelle, Annahmen und Daten mit Erläuterungen zur Berechnung der Strahlenexposition bei der Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft oder Wasser zum Nachweis der Dosisgrenzwerte nach § 45 StrlSchV. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1992.
- [10] Panitz H-J., Matzerath C., Pasler-Sauer J.: UFOMOD – Atmospheric Dispersion and Deposition. KfK 4332, Oct. 1990.
- [11] HAVAR: Interaktivní programový systém pro hodnocení radiační zátěže obyvatelstva při havarijních únicích z jaderného zařízení do atmosféry. ČÁST I : Metodika, arch.č.EGP 4104-6-990057, Praha, září 2000.
- [12] Uživatelský manuál systému HAVAR-RP, Závěrečná zpráva k projektu VaV 6/2003 SÚJB, Praha, říjen 2005.
- [13] P. Pecha, E. Pechová, H. Hušťáková: Rozvoj ingesčního modelu systému HAVAR-RP. Pracovní verze, dokumentace k projektu 6/2003, 2005.
- [14] Pecha P.: Návrh metodiky generování pravděpodobnostních charakteristik cílových veličin v modelech šíření radionuklidů životním prostředím. *Dokumentace k etapě E 01 g) projektu 6/2003*, červen 2004.
- [15] Pecha P.: Analýza neurčitostí charakteristik vstupních parametrů do modelů šíření radionuklidů při únicích do životního prostředí. Část II : Volba grupy neurčitostí a metodika generování náhodných realizací vstupních vektorů modelů systému HAVAR . *Dokumentace k etapě E 01 f) projektu 6/2003*, 2004.

- [16] J.R.A. Lakey, ed.: Off-site emergency response to nuclear accident. SCK/CEN Mol, Belgium 1992. Joint project SCK/CEN – EU.
- [17] J. Päsler-Sauer : Description of the Atmospheric Dispersion Model ATSTEP. RODOS(WG2)-TN(99)-11, Aug. 2000.
- [18] S. R. Hanna, G. A. Briggs, R. P. Hosker, Jr.: Handbook on ATMOSPHERIC DIFFUSION. U. S. Dpt. of Energy, DOE/TIC – 11223 (DE82002045), 1982.
- [19] Lokalizace programového systému HAVAR-RP pro JE Dukovany a JE Temelín. Zpráva k projektu VaV6/2003 SÚJB, Praha, říjen 2005. Archiv dokumentace programového systému HAVAR-RP.
- [20] Meckbach R., Jacob P.: Gamma exposures due to radionuclides deposited in urban environments. Radiat. Protect. Dosim. 25, (1988).
- [21] Pravděpodobnostní přístup k predikci důsledků úniku radioaktivity do životního prostředí. Dokumentace HAVAR-RP k projektu VaV6/2003 SÚJB, Praha, říjen 2005. Archiv dokumentace programového systému HAVAR-RP.

## 8 PŘÍLOHY

### 8.1 Příloha 1: Poznámky ke zjednodušené parametrizaci skutečných fyzikálních dějů

Na základě rešerše z dostupné literatury jsou v [15] uváděny následující hlavní zdroje neurčitostí vstupujících do modelů šíření:

1. Fluktuace vstupních parametrů způsobené jednak jejich možným stochastickým charakterem, neurčitostmi v důsledku použití nepřesně definovaných hodnot a konečně v důsledku chyb měření při případném stanovení jejich hodnot na základě měření.
2. Neurčitosti zavlečené do odhadů v důsledku parametrizace fyzikálních procesů a zjednodušené matematické formulace pro jejich přibližný popis, kdy souhrnně řečeno jde o nedokonalost modelů při popisu fyzikální podstaty.
3. Chyby v důsledku numerického řešení.
4. Neurčitosti související s nedokonalým či nekompletním popisem všech částí uvažovaného scénáře při únicích radionuklidů do životního prostředí.

Uvažujme pro jednoduchost hodnotu depozice  $DEP_n(i,k)$  určitého nuklidu  $n$  na terénu v bodě receptoru v průsečíku polární sítě  $(i,k)$ . Indexy  $i$  a  $k$  reprezentují uzly výpočtové polární sítě,  $i = 1$  až 35 (radiální pásma kolem zdroje až do vzdálenosti 100 km),  $k = 1$  až 80 je jemné rozdělení větrné růžice  $\langle 0, 2\pi \rangle$  rad, číslování po směru hodin od severu. Dřívější deterministické přístupy k hodnocení radiologických důsledků radiačních nehod byly prováděny takovým způsobem, že pro každý vstupní parametr  $j$  modelu byla určována jeho tzv. "nejlepší" hodnota  $\theta_j^{nom}$  („best estimate“ nebo někdy nazývaná též nominální). Predikci zmíněné hodnoty depozice (použit horní index  $f$  – forecast) určuje zde zavedený segmentovaný Gaussův model  $M^{SGPM}$  podle schématu:

$$DEP_n^f(i,k) = M^{SGPM}(\theta_1^{nom}, \theta_2^{nom}, \dots, \theta_j^{nom}, \dots)$$

Je však zřejmé, že v důsledku neurčitostí bude nyní hledaná skutečná („true“ – horní index) hodnota  $DEP_n^{true}(i,k)$  představovat náhodnou proměnnou. Významným faktem se jeví skutečnost, že i kdybychom znali skutečné (true) hodnoty vstupních parametrů  $\theta_j^{true}$ , tak i potom modelovaná hodnota depozice v bodě nutně zůstane neurčitou ve smyslu:

$$DEP_n^{true}(i,k) = M^{SGPM}(\theta_1^{true}, \theta_2^{true}, \dots, \theta_j^{true}, \dots) + \eta(i,j)$$

Zde  $\eta(i,k)$  je náhodná chyba příslušející přibližnosti samotného modelu SGPM včetně jeho neadekvátních parametrizací vnitřních submodelů vyjádřených většinou pomocí poloempirických formulí.

*Pozn.: Při přesnějším prostorovém popisu musíme ovšem uvažovat celý vektor depozice **DEP** ve všech bodech polární sítě, kdy také  $\boldsymbol{\eta}$  je chybový vektor určený střední hodnotou a příslušnou kovarianční maticí.*

A právě první představu o chybě  $\eta(i,k)$  nám může dát možnost volit při běžích úloh alternativní formule vnitřních submodelů (pro modely atmosférické disperze, depozice, vymývání srážkami, alternativní formule pro vliv environmentálních efektů na transport

aktivity apod.), které zmíníme v následujícím textu. Začneme formulemi pro atmosférický a depoziční model, kde bylo využito výsledků obsáhlé fundamentální práce [9], ze které byla převzata celá řada doporučení (disperzní parametry, vznos vlečky, zahrnutí vlivu blízkostojících objektů, přibližné vztahy pro uvažování vlivu převýšení terénu apod. – podrobně shrnuto v [11]).

**Disperzní koeficienty:** Pro klasifikaci stability atmosféry jsou použity standardní povětrnostní třídy podle Pasquilla. Variantní výpočty potvrzují, že jedna z největších neurčitostí výsledků je způsobena subjektivní volbou vztahů pro vyjádření atmosférické disperze v horizontálním a vertikálním směru a dále předpoklady o vztahu mezi horizontální disperzí ve směru pohybu vlečky a jejím vztahu k příčné horizontální disperzi. Jednoduchým zadáním alternativní disperze podle uživatelského manuálu HAVAR-RP [12] a výpočtem s rychlou odezvou dostává uživatel možnost získat kvantitativní odhad tohoto vlivu. Alternativně jsou nabízeny formule pro disperzní koeficienty:

- Hoskerovy poloempirické formule (dále model HOSKER), které jsou deklarovány pro terén typu venkov - rovina, s průměrnou drsností terénu nepřevyšující 1 m. Odrážejí výsledky experimentálních měření nad rozsáhlými nezálesněnými a relativně hladkými rovinami při výšce zdroje 10 metrů (Briggsovy křivky pro horizontální resp. vertikální disperzi komentované v [18]). Konkrétní matematické vyjádření je uvedeno v původní metodice HAVAR v [11]. Je nutno vzít v úvahu, že prováděné terénní experimenty měly délku trvání úniku  $t_{\text{puff}} = 3$  až 10 minut, takže pro jinou dobu trvání je třeba korigovat vypočtenou koncentraci určitým korekčním faktorem. Na příklad pro intervaly úniku  $< 10 \text{ min}, 1 \text{ hodina} >$  je užívána korekce  $(10/t_{\text{puff}})^{0.2}$ , pro intervaly úniku  $< 1 \text{ hodina}, 1 \text{ den} >$  je doporučena korekce  $(10/t_{\text{puff}})^{0.3}$ . Platnost těchto vztahů je deklarována do 100 km. Nezdá se však, že by tento stepní charakter terénu zcela korespondoval s lokalitou JE Temelín nebo Dukovany.
- Model KFK-Jülich pro členitý terén: M. E. Smith shrnul jako první BNL formule [18] do analytických výrazů mocninového charakteru. Obdobné experimenty pokračovaly v Evropě a byly dosaženy významné výsledky. V [9] jsou k dispozici poloempirické formule pro výpočet disperzních koeficientů odvozené na základě měření na lokalitě charakteristické pro střední Evropu. Nejvýznamnějšími se zdají být výsledky experimentů prováděné v jaderných výzkumných zařízeních v Jülichu a Karlsruhe, jejichž výsledkem jsou formule pro výpočet disperzních parametrů zohledňující efektivní výšku výpustí, meteorologické podmínky a drsnosti terénu příslušných lokalit v Německu (v dalším textu zde bude označen pracovním názvem model KFK). Výsledky těchto prací byly Spolkovým ministerstvem pro životní prostředí, ochranu přírody doporučeny [9] jako standard pro modelování rozptylu a šíření exhalací z jaderných zařízení. Pro detaily opět odkazujeme na metodiku původního kódu HAVAR [11]. Zde je uvedeno matematické vyjádření, interpolace pro hodnoty parametrů v jiných než v experimentech uvažovaných výškách, případné korekce na maximální hodnotu vertikálního disperzního parametru vzhledem k výšce směšovací vrstvy, korekce na horizontální disperzi ve větších vzdálenostech a souvislosti s použitím semi-boxového modelu pro větší vzdálenosti od zdroje znečištění (s doporučeními převzatými z kódu UFOMOD [10]).
- Formule SCK/CEN ( Mol, Belgie) pro relativně hladký typický středoevropský terén : Formule jsou implementovány podle [10] v nové verzi produktu HAVAR-RP do všech částí jako alternativní volby. Formule jsou určeny pro výpočty nad relativně



hladkým terénem ( $0.1\text{m} < \text{drsnost} < 1\text{m}$ ) a byly validovány pro úniky s trváním kolem 1 hodiny a pro výšku úniku 69 metrů. Horizontální a vertikální disperze je podobně jako KFK formule vyjádřena mocninovými vztahy typu :

$$\sigma_y = p_y \cdot x^{q_y} \quad (\text{L1})$$

$$\sigma_z = p_z \cdot x^{q_z}$$

Koeficienty jsou brány podle tabulky:

Výška (m)	Kat. stability	$p_y$	$q_y$	$p_z$	$q_z$
69	A	0.946	0.796	1.321	0.711
	B	0.826	0.796	0.950	0.711
	C	0.586	0.796	0.700	0.711
	D	0.418	0.796	0.520	0.711
	E	0.297	0.796	0.382	0.711
	F	0.235	0.796	0.311	0.711

**Vymývání aktivity atmosférickými srážkami:** Základní popis uvažovaných mechanismů vymývání radionuklidů z vlečky je uveden v [11]. Kromě globálních srážek v celé oblasti kolem zdroje znečištění je možno uvažovat dva typy výskytu lokálních srážek:

- Průchod dešťovou clonou fixně definovanou v terénu (prostorově konstantní). Zadává se podle [12] v kapitole 4.5 „Vstupní panel: Meteorologické sekvence“ za předpokladu, že je zvoleno přímočaré šíření.
- Při úniku prší jen v určitém časovém intervalu – viz. [12] v kapitole 4.5 „Vstupní panel Meteorologické sekvence“ za předpokladu, že je zvoleno „stáčení podle meteorologických sekvencí“, vlastní dešťové sekvence se zadávají na další záložce „Meteorologické sekvence“ – viz Obrázek 4-7 v [12].

Alternativně jsou v HAVAR-RP pro výpočet srážkové intenzity užity dvě formule. V programu HAVAR [11] byl pro vymývání atmosférickými srážkami zaveden vztah podle původní metodiky Interatomenergo s lineární závislostí  $\Lambda$  na intenzitě srážek ve tvaru:

$$\Lambda = C^f \cdot g \quad (\text{L2a})$$

kde je provedeno rozlišení podle fyzikálně-chemické formy  $f$ :

- $C^f = 1,3\text{E-}4$  pro elementární jód
- 1,3E-6 pro organický jód
- 2,6E-5 pro aerosoly
- $g$  - srážky v mm/h

Při srovnání s jinými programy, zejména v předchozích letech s programem PC COSYMA, se ukázalo nutné zabudovat do nově vyvíjené verze programu HAVAR-RP i mocninovou závislost běžně používanou v programech COSYMA (tam převzaty závislosti z UFOMOD[10] i RODOS [17]):

$$\Lambda = a \cdot G^b \quad (\text{L2b})$$

kde:

fyz.-chem. forma	a	b
elementární jód	8,0E-5	0,6
organický jód	8,0E-7	0,6
aerosoly	8,0E-5	0,8

Za těchto předpokladů pro  $v=5$  mm/h vychází pro  $\Lambda$ :

frakce	$\Lambda$ podle COSYMA, 5 mm/h	$\Lambda$ podle lineární, 5 mm/h
elementární jód	2,1E-4	6,5E-4
organický jód	2,1E-6	6,5E-6
aerosoly	2,9E-4	1,3E-4

Potom korekční faktor na vymývání atmosférickými srážkami na úseku  $< 0; x >$  se užije v modelu ochuzení zdroje v postupující vlečce [11] ve tvaru:

$$f_w^n(x; k, j) = \exp\left(-\bar{\Lambda}^n \cdot \frac{x}{\bar{u}_{k,j}}\right) \quad (\text{L3})$$

$\bar{\Lambda}^n$  ..... konstanta vymývání nuklidu  $n$  srážkami (její střední hodnota při šíření ve směru  $x$  od 0 do  $x$  ( $s^{-1}$ ));

$\bar{u}_{k,j}$  je střední horizontální rychlost vlečky v m/s ve směru osy  $x$  (t. zn. zvoleného šíření ve směru sektoru  $k$ ).  $j$  je aktuální kategorie stability atmosféry podle Pasquilla.

**Další možnosti alternativních voleb:** V předchozím smyslu lze pokračovat vyjmenováváním dalších alternativních voleb. Na pořadí důležitosti by nyní bylo určování hodnot rychlosti suchého usazování různých fyzikálně-chemických fixací radionuklidů v radioaktivním oblaku, mající dominantní vliv na ochuzování vlečky a depozici aktivity na terénu. Zde se omezíme konstatováním, že uživateli jsou nabízeny možnosti podrobně popsané v uživatelském manuálu systému HAVAR-RP [12]. Konkrétně pro modifikaci hodnot rychlosti suché depozice je k dispozici interaktivní panel č. 4.2 „Ochuzování vlečky“, kde je možno měnit číselné hodnoty podle doporučení různých pramenů (někdy poměrně značně rozdílných). Na tomto místě lze změnit i nabízenou implicitní volbu modelu srážek. Sekvence interaktivních nabídek z [12] je natolik podrobná, že si uživatel může udělat odpovídající představu o jeho vlastním postupu zadávání nabízených parametrů scénáře.

Dosavadní úvahy je možné aplikovat i na celý scénář zadávání ingesčního modelu. Komparativní výpočty popsané v kapitole 10 v [11] umožňují modifikovat ingesční scénář základní spočtené varianty a po provedení alternativního výpočtu pak provést srovnání vlivu provedené změny (provedených změn). Široké spektrum povolených modifikací je zřejmé z popisu kapitoly 5 v [12] „Struktura ingesčního modelu programu HAVAR-RP“. Je zřejmé, že se uživateli nabízí mnoho desítek možností jak modifikovat vstupy pro následnou komparaci, a to od časových charakteristik (zde například možnost měnit juliánský den spadu v roce a tak testovat rozdíly při zimním a letním spadu) přes alternativní charakteristiky

půdního transportu, parametry dlouhodobé depozice a resuspenze, charakteristiky kořenového a listového transportu aktivity do rostlin, zdržení vegetace v daném roce promítnuté do fenologie, spotřební zvyklosti populace, charakteristiky výkrmu a případných opatření změny režimu výkrmu v případě nehod a pod. Kromě toho většina modifikací může být chápána jako testování efektivity zaváděných protiopatření na zmírnění následků nehod. Další použití spočívá v nastavení dat buď pro výpočet potenciálních dávek (konzervativní, na otevřeném prostranství) nebo s nastavením pro dávky očekávané vztahující se k dávkám za běžného životního rytmu (uvažovány faktory lokační a faktory setrvání, případně s upřesněním transportních mechanismů deklarovaných pro danou lokalitu).

## 8.2 Příloha 2: Časový integrál depozice Cs-137 pro různé tvary korekční stínící funkce E(t)

$$\Delta TID^n(tB \rightarrow TD; x, y) = \Omega^n(tB; x, y) \cdot \int_0^{TD-tB} R(t) \cdot E(t) \cdot dt$$

$$R(t) = \exp(-\lambda_r^{\text{Cs-137}} \cdot t)$$

$$\Omega^{\text{Cs-137}}(tB; x, y) = 1$$

$$tB = 0$$

$$\lambda_r^{\text{Cs-137}} = 7.280\text{E-}10 \text{ s}^{-1}$$

### 1. Podle vztahu Meckbach-Jacoba [20]:

$$E(t) = a_1 \cdot \exp(-\lambda_1 \cdot t) + a_2 \cdot \exp(-\lambda_2 \cdot t)$$

$$\lambda_1 = 1.46 \text{ E-}03 \text{ den}^{-1} = 1.690\text{E-}08 \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda_2 = 3.87 \text{ E-}05 \text{ den}^{-1} = 4.479\text{E-}10 \text{ s}^{-1}$$

$$a_1 = 0.36$$

$$a_2 = 0.64$$

### 2. Podle modifikace vztahu 1 podle Jacoba použitá v kódu RODOS [7]:

$$E(t) = a_1 \cdot \exp(-\lambda_1 \cdot t) + a_2 \cdot \exp(-\lambda_2 \cdot t)$$

$$\lambda_1 = 1.01 \text{ E-}03 \text{ den}^{-1} = 1.690\text{E-}08 \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda_2 = 0.0 \text{ den}^{-1} = 0.0 \text{ s}^{-1}$$

$$a_1 = 0.6$$

$$a_2 = 0.4$$

### 3. Podle Bunzl [6] pro německé oblasti

$$E(t) = a_1 \cdot \exp(-t/b_1) + a_2 \cdot \exp(-t/b_2)$$

$$1/b_1 = 2.08\text{E-}01 \text{ rok}^{-1} = 6.606\text{E-}09 \text{ s}^{-1}$$

$$1/b_2 = 3.36\text{E-}02 \text{ rok}^{-1} = 1.064\text{E-}09 \text{ s}^{-1}$$

$$a_1 = 0.331$$

$$a_2 = 0.254$$

### 4. Podle Bunzl [6] pro Černobylskou oblast

$$E(t) = a \cdot \exp(-t/b)$$

$$1/b_1 = 3.39E-02 \text{rok}^{-1} = 1.075E-09 \text{ s}^{-1}$$

$$a = 0.591$$

### 5 Bez korekční stínící funkce

pro  $E(t) = 1$

uvažován pouze radioaktivní rozpad  $R(t) = \exp(-\lambda_r^{\text{Cs-137}} \cdot t)$ .

Průběh časového integrálu  $\Delta TID^n (tB \rightarrow TD; x, y)$  pro různé tvary korekčních funkcí je uveden v následující tabulce a znázorněn na následujícím obrázku.

Časový integrál depozice Cs-137 - $\Delta TID$ (Bq.s/m <sup>2</sup> )					
TD [rok]	1	2	3	4	5
1	2,852E+07	2,813E+07	1,711E+07		3,118E+07
5	1,113E+08	1,011E+08	6,582E+07		1,490E+08
10	1,890E+08	1,601E+08	1,019E+08	1,422E+08	2,818E+08
15	2,526E+08	2,083E+08	1,247E+08	1,881E+08	4,002E+08
20	3,054E+08	2,506E+08	1,407E+08	2,227E+08	5,058E+08
25	3,493E+08	2,883E+08	1,522E+08	2,487E+08	5,999E+08
30	3,858E+08	3,218E+08	1,608E+08	2,683E+08	6,838E+08
35	4,160E+08	3,518E+08	1,672E+08	2,830E+08	7,586E+08
40	4,412E+08	3,784E+08	1,721E+08	2,941E+08	8,253E+08
45	4,621E+08	4,022E+08	1,757E+08	3,024E+08	8,848E+08
50	4,795E+08	4,234E+08	1,785E+08	3,087E+08	9,378E+08

**Časový integrál depozice Cs-137 pro korekční stínící funkce E(t) podle**

1. Meckbach-Jacoba
2. modifikace 1 v RODOSu
3. Bunzla pro německé oblasti
4. Bunzla pro černobylskou oblast
5. Pro E(t) = 1

