	ÚJV Řež a.s. – divize ENERGOPROJEKT PRAHA Husinec-Řež, čp. 130, PSČ 250 68		<i>Řídící útvar</i> 2500	<i>Zpracovatelský útvar</i> 2501	<i>Skartační znak</i> V15
	<i>Stavba - akce</i> Hodnocení SW pro SÚJB dle VDS 030		<i>Objekt-provozní soubor</i> -		<i>Pořadové číslo</i> 002
<i>Název zakázky</i> Dokumentace pro hodnocení SW NORMAL verze 2010 Č. úkolu 10Y0033					<i>Stupeň ochrany</i>
<i>Název dokumentace</i> Program NORMAL na ocenění radiační zátěže obyvatelstva v okolí jaderných zařízení za normálního provozu Metodika					<i>Číslo výtisku</i>
<i>Výpracoval</i> kolektiv	<i>Vedoucí zpracovatelského útvaru</i> Ing. V. Horák	<i>Datum</i> Final: 12/2010	<i>Celkem listů</i> 91		
<i>Kontroloval</i> Ing. J. Klumpar	<i>HIP</i> Ing. V. Horák	<i>Soubor</i> Metnor2010.doc			
<p>Zpracovatelský kolektiv: Ing. P. Pecha, CSc. Ing. E. Pechová</p>					
<i>Zakázkové číslo</i> 90-99996-40-155		<i>Archivní číslo</i> EGP 5010-F-100148		<i>Index</i>	<i>Strana</i> 1

OBSAH

Anotace.....	3
1. Metodika hodnocení radiační zátěže populace v důsledku běžných rutinních výpustí radionuklidů při normálním provozu jaderného zařízení	6
2. Fyzikální modely transportu příměsí v atmosféře	8
2.1 Matematický popis atmosférické difúze v přiblížení Gaussovy rovnice šíření	8
2.2 Přímočaré šíření v termínech BOX-modelu	13
2.3 Stanovení efektivní výšky vlečky výpustí h_{ef}	13
2.4 Rozptylové parametry $\sigma_y(x)$ a $\sigma_z(x)$	16
2.5 Vliv blízkostojících objektů	18
2.6 Vliv zvlnění terénu	19
2.7 Modelování inverzní povětrnostní situace.....	20
2.8 Vícenásobné odrazy na horní hranici přízemní směšovací vrstvy H_{mix}	21
2.9 Grupa vypouštěných nuklidů a uvažování rozpadových řetězců	22
3. Dlouhodobé difúzní odhady v termínech diskrétní prostorové a meteorologické sítě.....	24
3.1 Definice diskrétní prostorové sítě pro numerický výpočet.....	24
3.2 Kategorizace meteorologických dat pro danou lokalitu	26
3.3 Dlouhodobé difúzní odhady objemové aktivity nuklidů a jejich zředění v přízemní vrstvě vzduchu.....	29
3.3.1 Transport ovzduším popsáný Gaussovou rovnicí šíření	29
3.3.2 Dlouhodobé odhady na základě BOX-modelu	31
3.4 Dlouhodobé difúzní odhady aktivity nuklidů usazujících se na zemském povrchu.....	33
3.4.1 Dlouhodobé FALLOUT a WASHOUT faktory	33
3.4.2 Časový vývoj usazování aktivity nuklidů na zemském povrchu	35
4. Hodnocení radiačního zatížení obyvatelstva v důsledku úniků do atmosféry při dlouhodobém běžném provozu jaderného zařízení.....	39
4.1 Metodika hodnocení radiační zátěže	39
4.2 Radiační zátěž v důsledku různých cest ozáření.....	41
5. Výpočty dávkové zátěže ingesční cestou	55
5.1 Statický model INTERATOMENERGO podle [1].....	55
5.2 Dynamické modelování transportu radionuklidů potravními řetězci do lidského organismu	56
5.2.1 Příklad krátkodobého úniku radionuklidů ve dni t_{spad}	58
5.2.2 Dynamické modelování přenosu radionuklidů potravními řetězci pro případ normálního provozu 76	
5.2.3 Zahrnutí izotopů C-14 a H-3 do dynamického modelu transportu radionuklidů potravními řetězci 84	
6. Závěrečné poznámky k modulární struktuře systému NORMAL.....	88
7. Význam použitého indexování.....	90
8. Seznam použité literatury.....	90

Anotace

Programový systém NORMAL byl vyvinut pro analýzu šíření a rozptylu radioaktivních exhalací v atmosféře a jejich depozice na zemském povrchu. Z tohoto fyzikálního modelování pak vychází finální hodnocení radiační zátěže obyvatelstva způsobené dlouhodobým normálním provozem jaderného zařízení. Vývoj programového systému NORMAL byl započat převodem původního programu RJ009 vyvinutého v EGP Praha z prostředí počítače VAX do prostředí PC FORTRAN POWER STATION.

Původní program RJ009 byl vyvíjen v EGP Praha od roku 1980 a díky zlepšující se výpočetní technice byl postupně propracováván a rozšiřován. Po zapracování metodiky normy MHS Interatomenergo (viz. lit. [1]) byl program předložen ke standardizačnímu řízení a po akceptování připomínek oponentů byl schválen. Do roku 1987 bylo vypracováno ještě několik jeho verzí, které však nepředstavovaly podstatnější změny v metodickém přístupu. Jedna z posledních těchto verzí byla upravena pro prostředí počítače VAX.

Druhý krok vývoje byl vyvolán požadavkem na vytvoření flexibilního nástroje pro hodnocení vlivu normálního provozu jaderného zařízení na životní prostředí, přičemž bylo třeba zabudovat výsledky či doporučení nových prací v tomto oboru. Předně se jednalo o lit. [2] reprezentující vlastně německou normu hodnocení a dále pak o nová doporučení Mezinárodní komise pro atomovou energii. Cenným materiálem pro zpracování byly též publikace vztahující se k problematice, které byly v průběhu minulých let vypracovány v podniku ŠKODA Plzeň. Konkrétním výsledkem této druhé etapy bylo vytvoření verze programu pro PC prostředí.

Cílem bylo vyvinout interaktivní verzi poskytující uživateli snadný přístup jak ke vstupním datům tak k výsledkům. Data jsou zde zadávána z obrazovky ze vstupních panelů (včetně možnosti automatické archivace výpočtových variant a jejich opětovného rychlého vyvolání) a dále je k dispozici poměrně bohatá nabídka přímé grafické presentace výsledků na obrazovce včetně dvourozměrných grafů izopleť a izodóz.

Současná etapa prací zahájená počátkem roku 1998 byla iniciována dalším tlakem na rozšíření možností systému vyvolaným jednak novými legislativními požadavky závaznými pro výpočetní kódy používané v oblasti hodnocení jaderné bezpečnosti a dále pak konfrontací s nejnovějšími pokročilými metodikami zaváděnými v celoevropském či celosvětovém měřítku. V tomto směru má skupina spolupracující v EGP na vývoji vlastních programů zkušenosti s mezinárodními kódy COSYMA, PC CREAM, RODOS a MACCS, které již byly v některých případech použity při parciálních srovnávacích výpočtech [26, 27].

Byla implementována doporučení vyplývající z Atomového zákona, resp. z jeho prováděcí směrnice (Vyhláška SÚJB č. 307/2002 Sb. [30]). Dále byla provedena celá řada zlepšení a rozšíření kódu inspirovaná nejnovějším přístupem k problematice ve světě. K hlavním nejnovějším modifikacím patří především:

- Použití konverzních faktorů pro výpočet úvazku efektivní dávky z příjmu radionuklidů inhalací a ingescí specifikovaných vyhláškou SÚJB č. 307/2002 Sb. o radiační ochraně v platném znění.
- Použití konverzních faktorů pro výpočet úvazku ekvivalentní dávky z příjmu radionuklidů inhalací a ingescí na základě doporučení ICRP (ref.[17]).

- Použití konverzních faktorů pro výpočet dávky ze zevního ozáření z mraku a z deponitu podle ref. [16].
- Zabudování modelu resuspenze dříve usazené aktivity.
- Realističtější modelování disperze ve větších vzdálenostech od zdroje znečištění.
- Korekce na konečný rozměr mraku při výpočtech externího ozáření v blízkých vzdálenostech od zdroje.
- Přibližné zahrnutí povětrnostních vlivů na úroveň deponované aktivity.
- Zpřesnění výpočtu dlouhodobých faktorů zředění objemové aktivity ve vzduchu a suché či mokré depozice za podmínky dostupnosti podrobnějších dlouhodobých povětrnostních statistik beroucích v úvahu i srážky a výskyt inverzních situací vedoucích k nehomogenní vertikální stratifikaci v přízemní vrstvě vzduchu.
- Implementace dynamického modelování ingesce nahrazující dřívější statický model.
- Možnost vyjádřit očekávané hodnoty dávek s uvažováním faktorů úkrytu resp. stínění.

Takto byl vytvořen programový produkt, označovaný jako NORMAL. Produkt NORMAL je živý kód, rozvíjený, aktualizovaný a udržovaný skupinou autorů včasné reagujících na požadované úpravy. Je natolik flexibilní, že bylo možno přistoupit ke srovnávání jeho výsledků s jinými kódy používanými ve světě. Pro tento účel byl zvolen produkt PC CREAM popsáný v [22, 23]. Při tomto srovnávání výsledků dvou kódů, které nejsou po metodické stránce zcela totožné, se prokázala výhoda úplné kontroly nad zdrojovým kódem a vstupy. V procesu srovnávání vznikla nezbytnost modifikovat nejen data, ale v některých případech i zdrojový kód tak, aby bylo možno realisticky provést srovnání výsledků obou kódů. Tyto přechodné modifikace se musely dělat na straně produktu NORMAL, neboť z tohoto hlediska je produkt PC CREAM pro uživatele “černou bednou”. Současná verze programu má název NORMAL verze 2010. V dalším textu budeme používat název NORMAL bez označení verze.

V současné podobě se dokumentace k programu NORMAL verze 2010 skládá ze tří částí:

- popis metodiky hodnocení (tato práce),
- uživatelský manuál s podrobným popisem vstupů a výstupů [7],
- aplikace a vývoj [8] - srovnání dílčích výsledků s jinými kódy, výsledky validačních úloh, shrnutí prezentací z konferencí a statisticky zpracované epizody povětrnostních situací pro ETE pro vypusti z r.2008.

Paralelně se systémem NORMAL byl v EGP Praha vyvíjen v rámci 3-letého úkolu SÚJB VaV č.6/2003 programový systém HAVAR-RP pro hodnocení radiační zátěže obyvatelstva v důsledku havarijních úniků z jaderných zařízení [12]. Snahou je sjednotit metodiku i filosofii vstupů a výstupů v obou produktech tak, aby použité fyzikální modely i datové struktury byly v obou případech konzistentní a odrážely nejnovější znalosti v oboru. Pokračuje vývoj kódu HAVAR-RP a získávané zkušenosti jsou uplatňovány v obou systémech. Již dnes oba systémy vycházejí ze společných geografických a demografických databází a databází aktuálních konverzních dávkových faktorů. Stejně tak modely vývoje dlouhodobé depozice zahrnují obdobným způsobem migraci a fixaci radionuklidů v kořenové zóně. Důležitým krokem bude sjednocení grafické interaktivní prezentace výstupů vykreslovaných na mapových pozadích zakoupených u firmy PJSOFT, které jsou již dílčím způsobem zaváděny do systému NORMAL, kde nahrazují méně podrobné vektorové mapy.

1. Metodika hodnocení radiační zátěže populace v důsledku běžných rutinních výpustí radionuklidů při normálním provozu jaderného zařízení

Šíření radioaktivity od zdroje možného znečištění směrem k člověku se může dít buď atmosférou nebo vodním prostředím. Hlavním zdrojem průniku radioaktivních příměsí do životního prostředí při normálním kontinuálním provozu jaderného zařízení jsou výpusti ventilačními komíny hlavních výrobních bloků, ventilačními komíny budov pomocných provozů a výpusti ze strojoven. Výsledný dopad takto vypouštěných exhalací na radiační zátěž obyvatelstva žijícího v poměrně rozsáhlém okolí jaderné elektrárny (až do 100 km) je určován postupným řešením ve třech krocích:

- * Přijetí adekvátního fyzikálního modelu transportu škodlivin životním prostředím, jeho matematický popis a nalezení deterministického řešení pro konkrétní jednotlivou množinu vstupních hodnot.
- * Určení dlouhodobých difúzních charakteristik vážením jednotlivých konkrétních řešení jejich pravděpodobností výskytu, danou dlouhodobou statistikou konstruovanou na základě dlouhodobých povětrnostních pozorování v uvažované lokalitě.
- * Vyjádření výsledného radiačního zatížení z namodelovaných dlouhodobých fyzikálních charakteristik s užitím konverzních dávkových faktorů ve formě dávek záření (resp. úvazků dávek) na lidský organismus.

Základním problémem je tedy matematické modelování mimořádně komplikovaného procesu šíření radioaktivních exhalací v ovzduší při uvažování reálné meteorologické situace, reliéfu a drsnosti terénu, tepelně fyzikálních parametrů vypouštěných vzdušín a dalších lokálních charakteristik, přičemž musí být zohledněny mechanismy radioaktivního rozpadu příměsí (včetně zahrnutí významných dceřinných produktů) a interakce vlečky s okolním prostředím vedoucí k vymývání a vypadávání příměsí a k jejich depozici na zemském povrchu.

Je třeba věrohodně namodelovat střední objemovou aktivitu radionuklidů (střední ve smyslu jak konkrétního prostorového uzlu tak z hlediska dlouhodobé časové periody) v poměrně rozsáhlém okolí jaderné elektrárny a určit dlouhodobý faktor zředění této aktivity. Obdobně na základě kvalifikovaného odhadu interakce vlečky s vnějším prostředím jsou pak určovány dlouhodobé faktory depozice radionuklidů (suchý spad, vymývání příměsí srážkami).

V návaznosti je pak z takto určených hodnot prováděno hodnocení vlivu exhalací na obyvatelstvo, kdy je uvažováno:

- zevní ozáření z kontaminovaného ovzduší,
- zevní ozáření radionuklidy deponovanými na zemském povrchu,
- vnitřní ozáření při inhalaci vzduchu kontaminovaného vypouštěnými radionuklidy,
- vnitřní ozáření při inhalaci vzduchu kontaminovaného v důsledku resuspenze radionuklidů původně deponovaných na povrchu,
- vnitřní ozáření v důsledku ingesce potravinových produktů kontaminovaných atmosférickým spadem.

Hodnocení se provádí na základě efektivní dávky resp. ekvivalentní dávky na jednotlivé orgány či tkáň (případně 50-ti letých či 70-ti letých úvazků těchto dávek při vnitřním ozáření), a to jak pro jedince, tak pro celou populaci obyvatel žijící trvale v okolí jaderné elektrárny (kolektivní efektivní a ekvivalentní dávky resp. úvazky dávek).

Program počítá příslušné kolektivní efektivní či ekvivalentní dávky na základě hustoty populace v okolí jaderného zdroje. Hustota populace se zadává na příslušné polární síti s rozlišením na 6 věkových skupin. Dalšími prostorově závislými vstupními veličinami jsou údaje o produkci potravin a krmiv v jednotlivých segmentech zvolené polární sítě, které jsou nutné při užití strategie lokálního modelu produkce-spotřeba v případě popisu ingesčního příjmu aktivity.

System NORMAL neprovádí další hodnocení zdravotní újmy populace vycházející ze stanovených kolektivních dávek. Vypočtené hodnoty jsou dále srovnávány s limity danými příslušnými vládními nařízeními. V těchto limitech je implicitně zahrnuto vyhodnocení stochastického účinku dlouhodobé expozice nízké úrovně na vznik rakovinného onemocnění v populaci či dědičných defektů v generacích následujících. Okamžité deterministické efekty na lidský organismus se neuvažují vzhledem k nízkým úrovním dávek dosahovaných při normálním provozu zařízení vzhledem k těmto deterministickým limitům. Je třeba podotknout, že výsledky programu NORMAL jsou dále zpracovávány radiologickými experty v rámci detailního hodnocení vlivu jaderného zdroje na životní prostředí (EIA studie – použití programu NORMAL pro tyto účely je uvedeno v [15]).

2. Fyzikální modely transportu příměsí v atmosféře

V obecném případě je mechanismus transportu příměsí vypouštěných do atmosféry popsán kinetickou rovnicí. Pokusy o získání výsledků na této obecné bázi však vedou k teoretickým i numerickým problémům. Vzhledem k definovanému cíli spočívajícímu v určení dlouhodobých středních charakteristik přenosu se nezdá reálným ani použití metod stochastického modelování. Jediným prakticky účinným a matematicky zvládnutelným přístupem je difúzní přiblížení, kdy difúzní rovnice představuje určitou aproximaci obecné kinetické rovnice. Jedná se o popis v termínech turbulentní atmosférické difúze, při které jsou současně unášeny radioaktivní příměsi.

Pro získání konkrétního řešení je prováděna celá řada dalších zjednodušujících předpokladů. Jsou uvažovány homogenizované stacionární výpusti exhalací. Řešení se hledá za předpokladu konstantního směru větru s neměnnou rychlostí, což vede k výslednému řešení ve tvaru přímočarých gaussovských trajektorií. Jakkoli se zdá tento postup příliš spekulativní, ve světle dlouhodobých odhadů, kdy tyto jednotlivé stacionární stavy s konstantní rychlostí větru jsou ve druhém kroku dohromady váženy roční (resp. několikaroční) dlouhodobou povětrnostní statistikou, lze tento postup akceptovat a ve světě je tato metodika hojně užívána. Další argumenty pro použití Gaussova modelu přímočarého šíření pro případ modelování dlouhodobých charakteristik přináší obsáhlejší diskuse v [22].

V systému NORMAL je možno alternativně užít nejjednodušší metodu založenou na předpokladu konstantního směru větru během určité doby výpustí - tak zvaný BOX-model. Je založen na předpokladu úplné homogenizace škodlivin ve vzdušných vrstvách kolem místa \underline{x} (šíření probíhá ve směru \underline{x}) v určité výšce a při vertikálním omezení daném zemským povrchem a horní hranicí směšovací vrstvy. BOX-model se ukázal jako velmi flexibilní nástroj pro některá speciální řešení při marginálních odhadech. Obvyklým přístupem (použitým pro konečné hodnocení i zde) je průměrování po úhlových sektorech (sector average), kterou si lze představit jako vodorovnou vrstvu nad terénem s gaussovským vertikálním profilem. Homogenizace po sektoru je fyzikálně oprávněná v důsledku existence dlouhodobějších fluktuací směru proudění atmosférických mas.

2.1 Matematický popis atmosférické difúze v přiblížení Gaussovy rovnice šíření

Prostorové a časové rozložení koncentrace $C(x,y,z;t)$ příměsí v atmosféře je popsáno obecnou difúzní rovnicí, jejíž schématický tvar lze vyjádřit podle:

$$\frac{\partial C(x,y,z;t)}{\partial t} = -\vec{u}(x,y,z;t) \cdot \nabla C(x,y,z;t) + \nabla(K(x,y,z;t) \cdot \nabla C(x,y,z;t)) + S(x,y,z;t) - \beta \cdot C(x,y,z;t) \quad (2.1)$$

První člen na pravé straně popisuje transport vzduchem nesených příměsí advekcí vyvolané větrem s rychlostí \vec{u} . Druhý člen představuje turbulentní difúzi s obecně neizotropním

koeficientem difúze K . Třetí člen značí zdroj příměsí, přičemž v dalším se uvažuje stacionární kontinuální bodový zdroj výpustí v místě (x_0, y_0, H) ve tvaru:

$$S(x, y, z; t) = A \cdot \delta(x - x_0) \cdot \delta(y - y_0) \cdot \delta(z - H) \quad (2.2)$$

A je intenzita stacionárních kontinuálních výpustí, δ značí delta funkci, H je výška ventilačního komína.

Čtvrtý člen na pravé straně schématicky představuje vliv procesů odstraňujících příměsí z oblaku. Koeficient β zahrnuje suché vypadávání radionuklidů z oblaku, jejich vymývání atmosférickými srážkami a radioaktivní rozpad). Zde poznamenejme, že v praxi se rov. (2.1) řeší bez čtvrtého členu a vliv mechanismů odstraňujících příměsí se zahrnuje zpětně pomocí tzv. faktorů ochuzení zdroje.

Difúzní odhady pak mají různé varianty podle účelu, ke kterým mají být výsledky použity. V [4] jsou deklarována dvě základní přiblížení:

- metoda gradientního transportu
- statistická metoda

Jiná diferenciací metodik difúzních odhadů je v [4] činěna z hlediska detailnosti modelování trajektorií příměsí, kdy si analytik může případ od případu zvolit podle charakteru úlohy z modelů:

- simulace průběhu trajektorií
- předpoklad konstantního středního směru větru

První model umožňuje zahrnout prostorové a časové změny podmínek v oblasti (na příklad stáčení směru větru, lokální srážky). Ve druhém případě se jedná o modelování přímočarých gaussovských trajektorií na základě apriorního předpokladu o statistickém rozdělení koncentrace příměsí.

Neexistuje jednoznačné kritérium pro volbu metodiky. Záleží především na cíli, ke kterému mají být výsledky použity, a dále na objemu výpočtu nutných pro dosažení požadované přesnosti. Někdy se jako rozhodující kritérium může ukázat reálnost získání všech nutných vstupních podkladů (vyžadujících například síť měřících stanic dodávajících nezbytné údaje v reálném čase). Podívejme se z tohoto hlediska na problematiku volby metodiky pro dlouhodobé difúzní odhady.

Pro tento účel je na základě dlouhodobých meteorologických pozorování (několik roků) v dané lokalitě určena třírozměrná povětrnostní statistika $QIGM(k, j, m)$, která představuje základní vstupní údaj pro dlouhodobé difúzní odhady. Vyjadřuje pravděpodobnost výskytu směru větru v úhlovém sektoru k , ve třídě rychlosti větru m a při výskytu počasí v třídě stability j . Přetransformovaně pak vyjadřuje časový úsek v roce, během něhož se zachovává konstantní povětrnostní situace charakterizovaná indexy m, k, j . Z hlediska modelování dlouhodobých stacionárních výpustí lze odtud intuitivně vycítit oprávněnost následného použití metodiky založené na předpokladu konstantního středního směru větru vedoucího k přímočarým gaussovským trajektoriím. Tento model byl také v systému NORMAL použit.

Obecně formulovaný difúzní rozptyl podle (2.1) představuje i nadále z hlediska řešení mimořádně složitý problém. Proto se zavádějí další zjednodušující předpoklady, které by však neměly být v rozporu s vytčeným cílem řešení. V dalším bude naznačeno, jak se pomocí takového přístupu dojde ke Gaussovu řešení.

Přijmeme proto výše uvedené zdůvodnění pro použití statistického modelu konstantního středního směru a intenzity větru. Snahou bude přijmout taková zjednodušení, která umožní nalézt řešení v Gaussově vyjádření, které je založeno na užití disperzních parametrů $\sigma_y(x)$ a $\sigma_z(x)$. Původní koeficient difúze K se v tomto případě vyjádří pomocí disperzních koeficientů. Je sice pravda, že pak jde o poměrně hrubé přiblížení, nicméně velká přednost spočívá v tom, že vztahy pro disperzní parametry lze korigovat na základě experimentů prováděných přímo na uvažované lokalitě. Ukazuje se potom, že lze získat vyhovující výsledky, přičemž vazba teorie na fyzikální podstatu je jasná a srozumitelná.

Předpokládejme unášení příměsí větrem ve směru osy x . Pod pojmem příměsí budeme dále rozumět aktivitu jednotlivých vypouštěných radionuklidů. Ke stacionárnímu řešení rovnice (2.1) ve tvaru Gaussovy rovnice šíření se dojde po zavedení dalších předpokladů, z nichž nejvýznamnější jsou:

- předpokládá se rovinný terén
- konstantní rychlost emise radioaktivních příměsí
- stabilní a homogenní meteorologické pole větru
- stacionární a homogenní turbulence
- difúze ve směru šíření vlečky je zanedbatelná ve srovnání s advekcí, tedy:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) \ll u \cdot \frac{\partial C}{\partial x}$$

- vlečka příměsí se jednou odráží od povrchu země (vícenásobný odraz nastává při inverzních situacích resp. při uvažování odrazu na horní hranici směšovací vrstvy H_{mix} - viz kapitoly 2.7 resp. 2.8)

Potom speciální řešení diferenciální rovnice (2.1) ve tvaru Gaussovy rovnice šíření má tvar:

$$C^n(x, y, z) = \frac{A^n}{2\pi \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x) \cdot u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-h_{ef})^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h_{ef})^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) + \eta_{JV}(z) \right] \cdot f_R^n(x) \cdot f_F^n(x) \cdot f_W^n(x) \quad (2.3)$$

zde:

$C(x, y, z)$ střední objemová aktivita radionuklidu \underline{n} kolem (x, y, z) v $[Bq/m^3]$
 x, y, z kartézské souřadnice
ve směru šíření vlečky: x
kolmo ke směru šíření - horizontálně: y
kolmo ke směru šíření - vertikálně: z

σ_y, σ_z	horizontální a vertikální disperzní parametr v místě x ve směru šíření vlečky [m]
A	intenzita kontinuálního zdroje aktivity radionuklidu \underline{n} v [Bq/s]
u	charakteristická rychlost větru v [m/s]
h_{ef}	efektivní výška vlečky nad terénem v [m]
$\eta_{JV}(z)$	korekce zahrnující vliv teplotní inverze ; pro případ homogenní stratifikace je $\eta = 0$; viz dále vztahy (2.14), (2.15); JV značí uvažovaný počet odrazů na inverzní vrstvě
f_R	korekční faktor na radioaktivní rozpad nuklidu \underline{n} ; viz dále vztah (3.8) pro konkrétní meteosituaci
f_F	korekční faktor suchého spadu radionuklidu \underline{n} ; viz dále vztah (3.9)
f_W	korekční faktor na vymývání radionuklidu \underline{n} atmosférickými srážkami; viz dále vztah (3.10)

Poznámka k volbě charakteristické rychlosti větru u :

V literatuře se obvykle uvádí řešení podle vztahu (2.3), do kterého se za u dosazuje střední hodnota rychlosti větru po výšce. V tomto vztahu je součin $\sigma_y \cdot u$ ve jmenovateli. Výsledky experimentů ukazují, že σ_y s výškou klesá a hodnota zmíněného součinu se s výškou téměř nemění - viz rozbor v [22]. Záleží tedy na tom, pro jakou výšku výpustí je určováno σ_y .

Pro výpočet σ jsou dále uvedeny buď následující vzorce (2.7) podle Hoskera (platí pro rovinný terén a pro výšku výpustí 10 m) nebo pro drsnější terén podle formulí Jülich/KFK (2.8), které umožňují výpočet disperze v konkrétní efektivní výšce výpustí.

V prvním případě tedy při výpočtu disperze podle Hoskera by bylo přesnější dosadit do vztahu (2.3) rychlost větru v 10 m. Ve druhém případě (podle Jülich/KFK) pak rychlost větru v efektivní výšce výpustí. Tento druhý případ je též použit v doporučeních německé normy [2].

Z rovnice (2.3) je vidět, že základním mechanismem snižování koncentrace příměsí ve vlečce je proces turbulentní difúze vedoucí k rozptylu exhalací do okolní atmosféry. Toto zředňování je pro všechny nuklidy stejné. K turbulentnímu mísení vyvolanému interakcí dolní vrstvy atmosféry se zemským povrchem dochází v omezené vertikální tloušťce dané buď výškou inverzní vrstvy při nehomogenní vertikální stratifikaci nebo horní hranicí směšovací vrstvy H_{mix} pro případ homogenního vrstvení (podrobněji dále v kap. 2.8).

Dalšími mechanismy vedoucími ke snižování koncentrace příměsí jsou:

- radioaktivní rozpad nuklidů
- suché vypadávání příměsí z vlečky
- vymývání příměsí atmosférickými srážkami

Tyto efekty jsou přibližně zahrnuty součinem korekčních faktorů $f_R^n \cdot f_F^n \cdot f_W^n$ a jsou někdy interpretovány jako faktory ochuzení zdroje - viz následující vztah (2.4), přičemž:

- Korekční faktor na radioaktivní rozpad nuklidu \underline{n} zohledňuje úbytek nuklidu ve vlečce za dobu, za kterou dojdou exhalace ze zdroje do místa x .

- K suchému vypadávání příměsí z vlečky na zemský povrch dochází jednak v důsledku gravitačního působení na různé možné fyzikálně-chemické formy vypouštěných nuklidů (plyny, organická forma, aerosoly) a dále následkem turbulentní difúze těsně nad povrchem. Pro kvalitativní popis se zavádí rychlost suchého vypadávání. Je k dispozici řada teoreticky odvozených vztahů pro tuto rychlost v závislosti na velikosti částice, lokální drsnosti terénu, efektivní výšce usazování, třecí rychlosti, disperzních koeficientech, vazkosti atmosféry a pod. Rychlost suchého spadu byla převzata z [1], kde je tabelována v závislosti na fyzikálně-chemické formě příměsí (elementární prvek, organická sloučenina, aerosol). Pro vlastní hodnotu korekčního faktoru na suchý spad byl převzat doporučený poloempirický vztah z [1]. Nicméně jeho hodnoty se zadávají ve vstupní databázi a při testech systému i srovnávacích výpočtech byly použity i jiné hodnoty podle pramenů [21, 23]. Srovnávací výpočty byly prováděny s hodnotami podle [22]. Integrální efekt je vyjádřený jednak příslušným faktorem ochuzení zdroje a jednak dlouhodobým faktorem suchého výpadku nuklidu na zemský povrch.
- Mimořádně komplikovaný proces vymývání příměsí z ovzduší je opět zahrnut zjednodušenými poloempirickými vztahy. Z fyzikálního hlediska mohou příměsí sloužit jako zárodeční kondenzační centra při tvorbě oblačnosti a mlh, z nichž se pak mohou vypršet (*rainout*). Dále může jít o interakci dešťové fronty s vlečkou exhalací, kdy srážky při svém pádu procházejí vlečkou a zachytávají příměsí (typický *washout*). Je zřejmé, že bude záviset i na skupenství srážek (deště, sněhy). Zde se úloha řeší na základě empirického zákona pro vymývání příměsí z ovzduší založeného na předpokladu konstantní pravděpodobnosti A pro odstranění příměsí z jednotky objemu za jednotku času. Tato pravděpodobnost je ale funkcí intenzity atmosférických srážek a liší se pro jednotlivé fyzikálně-chemické formy nuklidů podle vztahu (3.17 - viz dále). Integrální efekt je vyjádřený jednak příslušným faktorem ochuzení zdroje a jednak dlouhodobým faktorem vymývání nuklidu atmosférickými srážkami na zemský povrch.

Poznámka: Při řešení rov. (2.1) se předpokládalo $\beta = 0$, přičemž korekce na suché vypadávání nuklidu, jeho vymývání atmosférickými srážkami a radioaktivní rozpad jsou zohledněny až ve výsledném řešení pomocí faktorů ochuzení zdroje. Původní vydatnost emisí zdroje se nahradí novou vydatností korigovanou o ztráty uvažovaného nuklidu \underline{n} vzniklé všemi třemi uvažovanými mechanismy odstraňování škodlivin z vlečky od místa výpustí až k výpočtovému bodu \underline{x} podle schématu:

$$\dot{A}_x^n = \dot{A}^n \cdot f_R^n(x) \cdot f_F^n(x) \cdot f_W^n(x) \quad (2.4)$$

Analytické výsledné vztahy pro koncentrace příměsí vyjádřené shora uvedenou Gaussovou rovnicí šíření jsou obecně akceptovány a používány. To potvrdila i obsáhlá rešerše publikací o modelech výpočtu znečištění ovzduší používaných na celém světě, která je provedena v [5]. Její autoři zde na základě dostupné literatury konstatují, že nejčastěji se používají gaussovské vztahy s jedním či několikanásobným odrazem od zemského povrchu a spodní hranice inverze či na horní hranici směšovací vrstvy H_{mix} . Dalším argumentem pro jejich použití je již zmíněná možnost tyto modely “naladit” na základě simultánně prováděných experimentů v dané lokalitě. V neposlední řadě též je třeba respektovat kontinuitu se zavedenými postupy přípravy a předávání klimatologických dat. Analogické

vztahy založené na Gaussově modelu jsou použity též v mezinárodně rozšiřovaném produktu PC CREAM [22] pro analýzu vlivu normálního provozu jaderného zařízení na okolí.

2.2 Přímočaré šíření v termínech BOX-modelu

Je uvažována určitá výšeč kolem zvoleného směru šíření \underline{k} a provádí se homogenizace vypouštěných příměsí v této výšeči od zemského povrchu až do určité výšky, která může být ztotožněna s inverzní výškou či s horní hranicí směšovací vrstvy H_{mix} . Vzhledem k tomu, že konkrétní tvar je spojen se způsobem zavedení diskretní prostorové sítě, příslušné výrazy pro BOX-model budou uvedeny v následujících kapitolách 3.3.2 a 3.4.1 .

2.3 Stanovení efektivní výšky vlečky výpustí h_{ef}

Vypouštěné vzdušiny s příměsemi opouštějí zdroj (např. komín) ve stavební výšce H nad úrovní terénu s určitou tepelnou vydatností a vertikálním impulsem. Dostávají se do unášivého horizontálního proudění okolní atmosféry. Výsledkem je pak efekt, kdy až v jisté vzdálenosti od zdroje x_{max} vlečka dosáhne rovnovážné hodnoty svého převýšení Δh nad terénem, tedy:

$$h_{ef} = H + \Delta h \quad (2.5)$$

Převýšení Δh závisí na tvaru zdroje, charakteristikách vypouštěných vzdušin, třídě stability počasí a stavových charakteristikách okolní atmosféry. Pro výpusti z jaderného zařízení byl převzat doporučený vztah z [1] (bohužel bez bližšího odkazu na původní práce a autory) :

$$\Delta h = D_j \cdot \left(2,61 \cdot \frac{\sqrt{Q_H}}{u_H} - 0,029 \cdot \frac{v_s \cdot d}{u_H} \right) \quad (2.6)$$

D_j bezrozměrný parametr závislý na kategorii j stability počasí

Q_H tepelná vydatnost zdroje (vypouštěných vzdušin) [kW]

u_H rychlost větru ve výšce H v [m/s]; používá se vyjádření:

$$u_H = u_{10} \cdot \frac{H^\epsilon - drs^\epsilon}{10^\epsilon - drs^\epsilon} \quad (2.6a)$$

u_{10} rychlost větru ve standardní meteorologické výšce měření v 10 m nad terénem

drs drsnost terénu [m], bezrozměrný mocninový parametr e je funkcí kategorie stability počasí j

v_s výstupní rychlost vzdušin ve ventilačním komíně [m/s]

d průměr ústí ventilačního komína [m]

Platnost vztahu (2.6) se udává pro interval od 7,5 do $7,0 \cdot 10^4$ kW.

Poznámka: V případě výpustí z klasických zdrojů, majících obvykle velkou tepelnou vydatnost, se dále modeluje průběh kouřových trajektorií až do místa x_{max} (měřeno od zdroje), ve kterém vlečka dosáhne svojí maximální stacionární výšky. Pro vyjádření tvaru

trajektorií $z = f(x)$ na intervalu $\langle 0, x_{\max} \rangle$ jsou užívány různé mocninné závislosti. Pro stacionární dlouhodobé výpusti z jaderných zařízení se neprovádí detailní modelování závislosti na x podle $h_{ef} = h_{ef}(x)$ a hned za hranicí elektrárny se předpokládá dosažení maximálního převýšení. Dále poznamenejme, že inverzní situace si vyžadují zcela speciální korekce pro definování efektivní výšky.

V souvislosti s výpočtem validačních úloh zadaných hodnotící komisí č.6 musel být revidován přístup k určování efektivní výšky výpustí. Validací úloha 2 pro normální provoz se svým zadáním dotýká problematiky modelování v blízkých vzdálenostech od zdroje a dále modelování za extrémních povětrnostních podmínek při nízkých rychlostech větru ($< 1 \text{ m/s}$). Dalším problémem spojeným s malými rychlostmi větru je určování efektivní výšky výpustí h_{ef} pro tyto extrémní případy. Ukázalo se, že použití vztahu (2.6) vede k neúměrně velkým hodnotám h_{ef} pro první dvě zadané kategorie rychlostí (0.2 a 0.65 m/s), jestliže tyto srovnáváme na příklad s limitními odhady v [35]. Proto byly v rámci validační studie provedeny ověřovací výpočty a studie sensitivity i s jinými modely výpočtu převýšení vlečky.

Na základě rešerše z [5, 13, 21, 22, 35, 36, 37, 38] bude dále formulován alternativní postup vzhledem k určování vznosu vlečky. Ve shodě s [36] budeme přibližně modelovat (na základě doporučených poloempirických vztahů) separátně oba hlavní efekty přispívající ke vznosu vlečky, kterými jsou počáteční kinetická energie odpovídající vertikální rychlosti výpustí a dále pak vznos vlečky v důsledku tepelné energie vypouštěných vzdušín. Výsledný vznos je pak dán superpozicí obou efektů.

a) Vzнос vlečky v důsledku vertikální kinetické energie vypouštěných vzdušín z vysokých zdrojů (komínů)

Obecně se předpokládá, že tento efekt je převažující pro stacionární výpusti z jaderných zařízení za normálního provozu, kdy na rozdíl od klasických tepelných zdrojů se teplota vypouštěných vzdušín příliš neliší od teploty okolní atmosféry.

Pro neutrální a nestabilní povětrnostní třídy (uvažujme kategorie podle Pasquilla A, B, C a D) lze Δh_m vyjádřit vztahem:

$$\Delta h_m = 1.44 \cdot d \cdot (v_s / u_H)^{2/3} \cdot (x/d)^{1/3} - 3 \cdot (1.5 - v_s / u_H) \cdot d_e \quad (2.6-1)$$

Poslední člen pravé strany se uplatní pouze v případě, že $v_s < 1.5 u_H$. Dále platí:

u_H	rychlost větru ve výšce zdroje H v [m/s]
v_s	výstupní rychlost vzdušín ve ventilačním komíně [m/s]
d	vnitřní průměr ústí ventilačního komína [m]
d_e	vnější průměr ústí ventilačního komína [m]
x	vzdálenost od zdroje ve směru proudění [m]

V praxi je nutné se omezit určitou referenční vzdáleností (na příklad několik stovek metrů). Pro celkový vznos je podle [37] k dispozici přibližná formule:

$$\Delta h_m = 3 \cdot v_s \cdot d / u_H \quad (2.6-2)$$

Pro stabilní povětrnostní situaci (třídy E a F) je výsledek podle (2.6-1) srovnáván s dalšími dvěma hodnotami podle :

$$\Delta h_m = 4 \cdot (F_m / S)^{1/4} \quad (2.6-3)$$

$$\Delta h_m = 1.5 \cdot S^{-1/6} \cdot (F_m / u_H)^{1/3} \quad (2.6-4)$$

přičemž se bere nejmenší ze tří hodnot.

Zde F_m je tok momentu ve vertikálním směru, $F_m = (v_s)^2 \cdot (d/2)^2$, parametr stability $S = 8.7 \text{ E-}4$ pro třídu E; $S = 1.75 \text{ E-}3$ pro třídu F.

b) Vznos vlečky v důsledku tepelné energie vypouštěných vzdušín

Výpusti z ventilačních komínů jaderného zařízení lze za normálního provozu považovat za zdroj exhalací s malou tepelnou vydatností. Použijeme dále úvahy z [5], kde se pro přibližné vyjádření používá empirických vztahů. Vychází se z faktu, že převýšení vlečky je nepřímo úměrné rychlosti větru ve výšce výpustí u_H a v určité vzdálenosti od zdroje dosáhne svojí stacionární hodnoty :

$$\Delta h_b = \Delta h_b^1 / u_H \quad (2.6-5)$$

Zde Δh_b^1 značí převýšení vlečky při rychlosti větru $u_H = 1 \text{ m/s}$. S uvažováním korekce na stabilitu atmosféry K_S je pak toto vyjádřeno podle:

$$\Delta h_b^1 = K_S \cdot 108.0 \cdot Q_H^{1/3} \quad (2.6-6)$$

Platnost tohoto vztahu je uváděna pro interval $Q_H < 18 \text{ MW}$, korekční faktor K_S má hodnotu 1.0 pro neutrální podmínky, hodnotu 0.6 - 0.7 pro stabilní atmosférické podmínky a hodnoty 1.2 až 1.3 pro nestabilní poměry.

Ve shodě s uvedenou literaturou formulujeme následující alternativní algoritmus pro konzervativní výpočet převýšení vlečky vypouštěných exhalací:

1. Při situacích s malými rychlostmi větru blízcími se bezvětří předpokládáme, že převýšení zůstane stejné jako při rychlosti $u_H = 1 \text{ m/s}$.
2. Převýšení Δh_m v důsledku vertikální kinetické energie vypouštěných vzdušín se spočte ze vztahů (2.6-2), (2.6-3) resp. (2.6-4).
3. Převýšení Δh_b v důsledku tepelného vznosu vlečky se spočte ze vztahů (2.6-5) a (2.6-6).
4. Výsledný vznos se určí součtem $\Delta h = \Delta h_m + \Delta h_b$.

5. Celková výška vlečky nad terénem pro danou kategorii stability atmosféry j nemůže překročit odpovídající výšku směšovací vrstvy $H_{mix}(j)$

Vztah (2.6) popisuje vliv tepelně hydraulických charakteristik vypouštěných vzdušín na převýšení vlečky. V dalších odstavcích budou kvantitativně odhadnuty další dva vlivy na Δh , a sice vliv blízkostojících objektů a vliv zvlnění terénu.

2.4 Rozptylové parametry $\sigma_y(x)$ a $\sigma_z(x)$

Jak je patrné z tvaru Gaussovy rovnice šíření zcela podstatnou roli hraje realistické určení disperzních parametrů. V původní verzi programu PC-RJ009 jsou pro určení disperzních parametrů použity Hoskerovy poloempirické formule (dále model HOSKER), které jsou vyjádřeny podle:

$$\sigma_y(x) = \frac{c_3 \cdot x}{\sqrt{1 + x \cdot 10^{-4}}} \quad (2.7)$$

$$\sigma_z(x) = F(drs, x) \cdot g(x);$$

$$F(drs, x) = \frac{1}{1 + c_2 \cdot x^{d_2}} \cdot \ln(c_1 \cdot x^{d_1}) \quad \text{pro } drs \leq 0,1 \text{ metru}$$

$$F(drs, x) = \left(1 + \frac{1}{c_2 \cdot x^{d_2}}\right) \cdot \ln(c_1 \cdot x^{d_1}) \quad \text{pro } drs > 0,1 \text{ metru}$$

$$g(x) = \frac{a_1 \cdot x^{b_1}}{1 + a_2 \cdot x^{b_2}}$$

a_1, a_2, b_1, b_2, c_3 jsou tabelované koeficienty závislé na kategorii stability počasí j ;
 c_1, c_2, d_1, d_2 jsou tabelované koeficienty závislé na kategoriích drsnosti povrchu;
 drs vyjadřuje drsnost zemského povrchu [m].

Vztahy (2.7) byly nalezeny pro terén typu venkov - rovina na základě měření ve výšce 10 m nad terénem, s průměrnou drsností terénu nepřevyšující 1 m. Platnost těchto vztahů je deklarována do 100 km. Nezdá se však, že by tento stepní charakter terénu zcela korespondoval s lokalitami jaderných elektráren na území České republiky.

Dnes jsou k dispozici poloempirické formule pro výpočet disperzních koeficientů odvozené na základě nejnovějších měření. 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 zahrnuty spolkovým ministerstvem pro životní prostředí, ochranu přírody a reaktorovou bezpečnost do publikace [2] a doporučeny jako standard pro modelování rozptylu a šíření exhalací.

Model KFK je zapracován do programu NORMAL jako alternativa k zabudovanému modelu HOSKER pro výpočet $\sigma_y(x)$ a $\sigma_z(x)$. Výsledky výpočtu získané s tímto modelem lze pokládat za zpřesněnou analýzu situace pro kratší vzdálenosti do 10 km od zdroje (rozsah deklarované platnosti nových vztahů). Formule Jülich / KFK byly odvozeny ve tvaru:

$$\begin{aligned}\sigma_y &= p_y \cdot x^{q_y} \\ \sigma_z &= p_z \cdot x^{q_z}\end{aligned}\quad (2.8)$$

Tyto disperzní koeficienty byly získány metodou nejmenších čtverců z experimentů se šířením oblaku jako střední hodnota pro jednotlivé kategorie počasí j . Vlivy terénu přitom nejsou zohledněny. Informace o turbulentní struktuře atmosféry je pak v principu obsažena v příslušných koeficientech p a q . Experimenty byly prováděny pro efektivní výšky výpustí 50, 100, 180 m. Vztahy platí pro charakter drsnosti odpovídající lokalitě v Německu. Pro jiné než v experimentech uvažované výšky výpustí se používají interpolační vztahy:

$$\begin{aligned}q_{ef,j} &= \frac{(h_{ef} - H_u) \cdot q_{j,o} + (H_o - h_{ef}) \cdot q_{j,u}}{H_o - H_u} \\ p_{ef,j} &= p_{j,o}^{\left[\frac{h_{ef} - H_u}{H_o - H_u}\right]} p_{j,u}^{\left[\frac{H_o - h_{ef}}{H_o - H_u}\right]}\end{aligned}\quad (2.9)$$

zde h_{ef} je efektivní výška výpustí ležící v intervalu experimentálních hodnot výšek výpustí $< H_u ; H_o >$, j je kategorie počasí.

Vztahy byly odvozeny pro vzdálenosti zhruba do 10 km od zdroje. Vertikální šíření vlečky je omezeno inverzními vrstvami či výškou směšovací vrstvy v případě homogenní vertikální stratifikace. Pro tento případ se zavádějí v [2] pro jednotlivé kategorie počasí tak zvané maximální disperzní koeficienty. V systému NORMAL lze provádět alternativní srovnávací výpočty pro větší vzdálenosti od zdroje pomocí následujících předpokladů pro výpočet disperzních koeficientů $\sigma_y(x)$ a $\sigma_z(x)$:

- V celém rozsahu radiálních vzdáleností od zdroje platí vztahy (2.8) a (2.9) bez omezení
- Vztahy (2.8) a (2.9) se použijí do vzdáleností, ve které $\sigma_z(x)$ nepřevýší hodnotu horní hranice přízemní směšovací vrstvy. Pro větší vzdálenosti se je pak možno dynamicky použít vztah (3.11) pro BOX model, představující homogenní promísení škodlivin v rámci uvažované mezikruhové výšeče.

Do nové verze systému je zavedena možnost použitá v [2], kdy $\sigma_z(x)$ může nabýt maximálně hodnoty:

$$0,8 \cdot H_{mix}$$

Dále pro hodnotu $\sigma_y(x)$ se použije postupu z atmosférického modelu ATSTEP systému RODOS [28], kdy disperse v periferním směru y se bere podle vztahů KFK do 10 km, přičemž pro vzdálenosti $x > 10$ km se používá závislost:

$$\sigma_y(x > 10km) = a \cdot \sqrt{x}$$

Konstanta a se určuje z podmínky spojitého přechodu funkce σ na 10. km.

Poznámka:

Získané výsledky podle modelu KFK lze porovnat s výsledky podle boxového modelu. V boxovém modelu se provádí homogenizace příměsí při postupu vlečky v kruhové výšce o úhlu φ_{box} a tloušťce rovné horní hranici směšovací vrstvy. Hodnota $\varphi_{box} = \varphi_g + \varphi_d$, kde φ_g je fluktuace směru větru za konkrétní časový interval. φ_d značí rozptylovou složku v důsledku turbulencí v azimutálním směru a odhaduje se podle velikosti disperze σ_y konzervativního modelu HOSKER ve vzdálenosti 30 km od zdroje (např. pro kategorii F vychází $\varphi_d = 5^\circ$). Pro hodnotu φ_g je použito hodnoty z modelu UFOMOD, který doporučuje např. pro kategorii F a výšku výpustí 50 m desetiminutovou fluktuaci směru větru $\varphi_g \sim 10^\circ$ (odhadnuto na základě experimentů měření fluktuace směru větru v desetiminutových intervalech). Znamená to, že celková výše boxového modelu je cca 15° . Na základě srovnání provedených při testování systému HAVAR [17] lze konstatovat, že výsledky jsou srovnatelné s výsledky výpočtů modelem KFK s upravenými $\sigma_y(x)$ a $\sigma_z(x)$.

2.5 Vliv blízkostojících objektů

Provozní budovy a chladicí věže v areálu jaderné elektrárny ovlivňují šíření emisí. Je třeba přitom uvážit dva efekty. Vlivem objektů stojících v poměrně malé vzdálenosti od zdroje výpustí ve směru pohybu vlečky dochází jednak ke změně proudění a jednak ke zvýšení turbulence. To znamená, že zaváděné korekce parametrů Gaussova modelu budou ovlivňovat jak efektivní výšku zdroje tak disperzní koeficienty. Korekce zaváděné pro jednotlivé modely jsou následující:

a) Model HOSKER: Původní doporučení z [1] zahrnují vliv jen na velikost disperzních parametrů. Jestliže se označí:

$$\begin{aligned} HZ, BZ & \dots \text{výška a šířka blízkostojícího objektu;} \\ HZ1 & = 2 * HZ; \\ AG & = BZ * HZ \quad \dots \text{pro } BZ < HZ; \\ & = HZ * HZ \quad \dots \text{pro } BZ > HZ; \end{aligned}$$

Potom za podmínky $h_{ef} < HZ1$ se v původní metodice provádí korekce disperzních parametrů:

$$\begin{aligned} \Sigma_y & = (\sigma_y^2 + AG / \pi)^{1/2} \\ \Sigma_z & = (\sigma_z^2 + AG / \pi)^{1/2} \end{aligned} \tag{2.10}$$

b) Model KFK: Nová doporučení z [2] vycházejí z původních Briggsových prací a zohledňují vliv blízkostojících objektů jak na změnu proudění ovlivňující výšku vlečky výpustí (v důsledku změny proudění se může dříve dostat k zemi), tak na zvětšení turbulence vypouštěných vzdušnin a tím zvětšení disperzních koeficientů. Označíme:

$$h_{ef}, h'_{ef} \dots \text{původní a nově korigovanou efektivní výšku vlečky;}$$

BZ, HZ výška a šířka blízkojícího objektu;
 $RM = \min \{ HZ; BZ \}$;

Potom jestliže je splněna podmínka $h_{ef} < (HZ + RM)$, provádí se korekce :

α) Efektivní výšky výpustí:

$$h_{ef} = 0.5 \cdot [3 \cdot h_{ef} - (HZ + RM)] \quad \text{..... pro } h_{ef} > HZ \quad (2.11)$$

$$h_{ef} = \max \{ (h_{ef} - 0.5 \cdot RM); RM / 2 \} \quad \text{..... pro } h_{ef} \leq HZ$$

β) Disperzních koeficientů:

$$\Sigma_y = (\sigma_y^2 + RM^2 / \pi)^{1/2} \quad (2.12)$$

$$\Sigma_z = (\sigma_z^2 + RM^2 / \pi)^{1/2}$$

2.6 Vliv zvlnění terénu

V oblasti modelování atmosférické disperze se nejnověji soustřeďuje pozornost na přesnější zahrnutí skutečné členitosti terénu. Doposud jde o dílčí kódy mimořádně náročné na dobu výpočtu a vstupní data. Při hledání časově i prostorově středních charakteristik vlivu výpustí za normálního provozu zůstáváme doposud u gaussovského popisu. Jak bylo uvedeno výše, Gaussova rovnice šíření byla odvozena kromě jiného také za předpokladu šíření nad rovinným terénem. Vzhledem k orografickým poměrům lokality Temelín i Dukovany je nezbytné být alespoň přibližně zahrnout převýšení terénu pod procházející vlečkou. Je třeba poznamenat, že tyto konstrukce jsou jedny z nejspekulativnějších témat v problematice užití statistických modelů šíření exhalací. V programovém systému NORMAL jsou alternativně zahrnuta dvě doporučení.

a) Metodika z [1] zavádí další korekci efektivní výšky vlečky původně definované vztahem (2.5), přičemž takto korigovaná efektivní výška se vyjadřuje podle:

$$h_{ef}^K = h_{ef} - z^K \quad (2.13)$$

kde z^K je korekce v metrech daná podmínkami:

$$z^K = \begin{cases} 0 & \text{pro } \delta(x, y) \leq 0 \\ \delta(x, y) & \text{pro } 0 < \delta(x, y) < 0,8 \cdot h_{ef} \\ 0,8 \cdot h_{ef} & \text{pro } \delta(x, y) \geq 0,8 \cdot h_{ef} \end{cases}$$

$\delta(x, y)$ je převýšení místa (x, y) oproti nadmořské výšce paty zdroje emisí (z hlediska výpočtového modelu oproti odrazové rovině idealizovaného rovinného povrchu).

b) Doporučení z [2] uvádějí, že postup vlečky není ovlivněn při málo skloněném terénu ($< 5^\circ$) a proudění se přizpůsobuje terénu. Pro větší terénní vlny se provádí další rozlišení

v závislosti na termické stabilitě atmosféry. Efektivní výška se koriguje opět podle vztahu (2.13), přičemž korekční faktor se definuje jako:

α) Pro povětrnostní kategorie A, B, C a D z nestabilního okraje spektra třídění podle Pasquilla se definuje :

$$z^K = \begin{array}{ll} \delta(x,y) & \text{pro } \delta(x,y) \leq h_{ef} / 2 \text{ (spolu s předpokladem zachování} \\ & \text{horizontálního průběhu osy vlečky)} \\ h_{ef} / 2 & \text{pro } \delta(x,y) > h_{ef} / 2 \text{ (osa vlečky modeluje terén ve výšce } h_{ef} / 2 \text{)} \end{array}$$

β) Při stabilním termickém vrstvení (pasquillovské povětrnostní kategorie E a F) má předpokládaná korekce tvar:

$$z^K = \begin{array}{ll} \delta(x,y) & \text{pro } \delta(x,y) < h_{ef} \\ h_{ef} & \text{pro } \delta(x,y) \geq h_{ef} \text{ (odpovídá přízemnímu zdroji)} \end{array}$$

2.7 Modelování inverzní povětrnostní situace

Za běžných okolností teplota vzdušných mas s výškou klesá. Takový stav vede k nestabilní situaci v přízemní směšovací vrstvě (povětrnostní kategorie A, B, C ve shora uvedené stupnici třídění podle Pasquilla). Směrem k neutrální situaci se absolutní hodnota gradientu teploty snižuje až k charakteristickému poklesu 1°K na 100 metrů výšky (suchá adiabata). Základní inverzní situace typu *fanning* (foukání) jsou zohledněny v třídách E a F, kdy výškový teplotní gradient má opačné znaménko než v případech nestabilní situace. Teplota v přízemní směšovací vrstvě zde pak roste s výškou, což má za následek potlačení vertikálního rozptylu vypouštěných příměsí a tím i omezení jejich transportu směrem k povrchu země.

Existují však ještě speciální povětrnostní situace, kdy se inverze vyskytuje od povrchu až do určité výšky L , přičemž ve vyšších vrstvách se teplotní gradient láme a přechází do typického neutrálního průběhu. Při těchto situacích dochází ke vznosu (*lofting*) exhalací a jejich transportu převážně v oblasti horní neutrální vrstvy.

Zcela opačný průběh teplotního gradientu má inverzní situace typu *fumigation* (kouřmo), kdy od povrchu až do výšky L je záporný teplotní gradient. Ve výšce L se jeho znaménko mění a tak se inverzní situace vyskytuje až od této výšky. Pokud jsou exhalace vypouštěny pod hranicí L , zůstávají pod touto hranicí a může dojít k extrémním koncentracím příměsí v přízemní vrstvě. Z matematického hlediska je tento problém řešen mnohonásobným odrazem rozptylujících se výpustí mezi dvěma totálně odrážejícími vrstvami: zemským povrchem a spodní hranicí inverzní vrstvy ve výšce L . Příslušné řešení je opět vyjádřeno Gaussovou rovnicí šíření podle (2.3), přičemž výraz v hranatých závorkách je vyjádřen obecněji výrazem:

$$\sum_{f=-\infty}^{+\infty} \left[\exp\left(-\frac{(z - h_{ef} + 2 \cdot f \cdot L)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + h_{ef} + 2 \cdot f \cdot L)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right) \right] \quad (2.14)$$

Odtud plyne konkrétní tvar členů $\eta_{JV}(z)$ v původní rovnici (2.3). Obvykle se dostanou tak, že se omezíme na konečný počet členů shora uvedeného nekonečného součtu. V praxi jsou vyhovující již řešení pro $f = -1, f = +1$. Při numerickém výpočtu lze užít případně podmínky (2.16), uvedené v následujícím odstavci.

2.8 Vícenásobné odrazy na horní hranici přízemní směšovací vrstvy H_{mix}

Intenzita atmosférické turbulence v přízemní směšovací vrstvě s výškou postupně klesá. V určité výšce H_{mix} nad povrchem země pak dojde k vyhlazení vlivu tření atmosféry o zemský povrch a pohyb vzdušných mas má charakter rovnovážného nezrychleného horizontálního proudění (geostrofický vítr). Definování horní hranice směšovací vrstvy H_{mix} provádějí různí autoři různě. Např. je to výška, kde intenzita turbulence dosáhne 1/10 intenzity v povrchové vrstvě. Jiné definice jsou založeny na ustáleném geostrofickém větru či poklesu teplotního gradientu pod určitý limit.

V této práci jsou údaje o výšce směšovací vrstvy v závislosti na povětrnostních třídách převzaty z [21]:

Tab.2.1:

<i>kategorie stability počasí</i>	A	B	C	D	E	F
H_{mix} [m]	1600	1200	800	560	320	200

Výška H_{mix} pak představuje okrajovou podmínku úplného odrazu znečištění. Potom s přihlédnutím k (2.14) je příspěvek vícenásobných odrazů od horní hranice H_{mix} a zemského povrchu formálně shodný s korekcemi na inverze $\eta_{JV}(z)$ ze vztahu (2.3) s tím rozdílem, že výška inverzní vrstvy je nahrazena směšovací výškou H_{mix} , tedy:

$$\eta_{JV}(z) = \sum_{f=1}^{f=JV} \left[\exp\left(-\frac{(z - h_{ef} + 2 \cdot f \cdot H_{mix})^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z - h_{ef} - 2 \cdot f \cdot H_{mix})^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right) + \right. \\ \left. + \exp\left(-\frac{(z + h_{ef} + 2 \cdot f \cdot H_{mix})^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + h_{ef} - 2 \cdot f \cdot H_{mix})^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right) \right] \quad (2.15)$$

Dosazením za $z=0$ tato korekce vyjadřuje vliv konečné výšky směšovací vrstvy na objemovou koncentraci nuklidů v přízemní vrstvě vzduchu. V nové verzi systému NORMAL je možno volit běh úlohy buď s uvažováním či bez vlivu H_{mix} . Při numerickém výpočtu je maximální hodnota indexu JV určována z podmínky:

$$\eta_{JV+1} - \eta_{JV} \leq 10^{-3} \cdot \eta_{JV} \quad (2.16)$$

Je třeba poznamenat, že určení odpovídající hodnoty H_{mix} a její deklarovaný efekt na rozptyl škodlivin v atmosféře je ve shora použitým postupu značně zjednodušený. Samotný fakt, že hodnoty z tab. 1 se vztahují pouze k průměrným typickým denním hodinám za působení slunečního tepelného toku, ukazuje na složitost problému. V nočních hodinách nastupují stabilní povětrnostní podmínky s výskytem inverzní situace a tedy i modelování by mělo postupovat odlišným způsobem než ve dne. Ale i ve dne dochází k podstatným změnám výšky H_{mix} v závislosti na lokálním kolísání tepelného toku. Modelováním tohoto efektu se zabývají některé práce spíše na teoretické úrovni.

2.9 Grupa vypouštěných nuklidů a uvažování rozpadových řetězců

Zadávané výpusti musejí korespondovat s příslušnou grupou $ANUK(n)$ z databáze DATABANK.DAT (zahrnuje 109 nejdůležitějších izotopů včetně jejich různých fyzikálně-chemických forem - popis databanky uveden v uživatelském manuálu systému NORMAL). V první fázi výpočtu jsou zadávané výpusti konfrontovány s databází $ANUK(n)$, je provedena kontrola obsahu a do dalšího zpracování jsou automaticky zahrnuty ty dceřinné nuklidy, které mohou dát nezanedbatelný příspěvek k radiačnímu zatížení okolí. Způsob automatického výběru (rozšíření) je řízen proměnnými IIP(n), IIP2(n), BET1(n) a BET2(n) popsány v uživatelském manuálu v kapitole o vstupních datech k programu. V algoritmu výpočtu je tedy zohledněn vznik významných dceřinných produktů během transportu atmosférou a v procesu usazování na zemský povrch.

O fyzikálně-chemické formě výpustí se rozhoduje již v případě zadání. Jak je uvedeno v popisu syntaxe názvu nuklidu v databázi $ANUK(n)$, tento název (a identická pravidla platí i pro zadávanou množinu konkrétních výpustí) je tvořen zřetěžením značky nuklidu (obecně ZZ), jeho hmotového čísla (třeba NNN) a jednoho dalšího znaku (C). Název má tedy schematický tvar ZZNNNC. Koncový charakter C pak nabývá tří možných hodnot. Pro aerosolovou formu výpusti je C=A, pro organickou sloučeninu C=O a konečně pro elementární formu se C nahradí mezerou (prázdným znakem). Ve svém důsledku to znamená, že pokud se může na příklad určitý nuklid vyskytovat ve výpustích ve všech třech formách, je ho možno zadat též jako tři separátní entity ve vstupní grupě.

Maximální počet nuklidů v databance programu NORMAL verze 2010 je v současné době 109 (s možností doplnění o dalších 11) a je tedy zřejmé, že se nemůže jednat o obecně formulovanou úlohu uvažující reálné rozpadové řady, kdy se vychází ze soustavy simultánních diferenciálních rovnic:

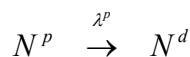
$$\frac{dN_i}{dt} = -\lambda^i \cdot N_i + \sum_{j=1}^{i-1} \beta_{j \rightarrow i} \cdot \lambda^j \cdot N_j \quad (2.17)$$

N je koncentrace jader v jednotce objemu vzdušiny,
 λ jsou příslušné konstanty radioaktivního rozpadu,
 $\beta_{j \rightarrow i}$ jsou pravděpodobnosti izomerních přechodů.

V práci [13] je použit tento časově náročný postup, přičemž se vychází z databanky o 584 štěpných produktech a uvažují se rozpadové řetězce až do maximálního počtu 10 členů.

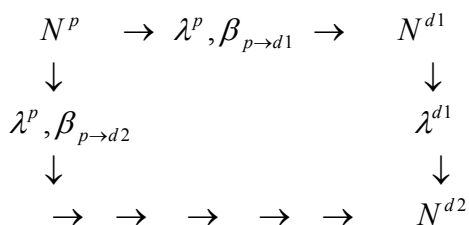
Jak již bylo řečeno, zde byl zohledněn jen vznik nejdůležitějších dceřinných produktů, přičemž jsou uvažovány pouze první dva nejjednodušší řetězce (indexy p a d značí mateřský resp. dceřinný prvek):

a) základní řetězec:



.....

b) jednoduchý izomerní rozpad:



Přízemní objemová aktivita dceřinných produktů se pak určuje v prvním případě jako součet její základní složky vypouštěné ze zdroje (může být nulová) a příspěvku od rozpadu mateřského izotopu. Tento příspěvek je vyjádřen podle:

$$C_{k,j}^d(x,y,z=0) = A^p \cdot \hat{\chi}_{k,j}(x,y) \cdot f_F \cdot \frac{\lambda^d}{(\lambda^p + \Lambda^p) - (\lambda^d + \Lambda^d)} \cdot \left[\exp\left(-\frac{(\lambda^d + \Lambda^d) \cdot x}{\bar{u}_{k,j}}\right) - \exp\left(-\frac{(\lambda^p + \Lambda^p) \cdot x}{\bar{u}_{k,j}}\right) \right] \quad (2.18)$$

Čistě atmosférický koeficient zředění $\hat{\chi}_{k,j}$ je vyjádřen v dalším pomocí (3.6c), vztah platí pouze za předpokladu, že rychlosti suchého vypadávání mateřského i dceřinného nuklidu jsou stejné.

U izomerních rozpadů podle schématu b) se postupuje analogicky. Poznamenejme jen, že objemovou aktivitu dceřinného prvku $d1$ určíme stejnou úvahou jako u jednoduchého případu a). Příspěvek od mateřského nuklidu p je dán výrazem (2.18), kde formálně index d je nahrazen $d1$ a celý výraz je přenásoben výtěžkem $\beta_{p \rightarrow d1}$. Pro dceřinný produkt $d2$ je příspěvek od původního mateřského prvku p určen analogicky záměnou $d2$ za d a přenásobením výtěžkem $\beta_{p \rightarrow d2}$. Další příspěvek od prvku $d1$ (představuje nyní vlastně další mateřský izotop pro $d2$) se určí opět s využitím schématu a).

3. Dlouhodobé difúzní odhady v termínech diskretní prostorové a meteorologické sítě

Modelování dlouhodobého vlivu exhalací na radiační situaci v okolí jaderné elektrárny se provádí za předpokladu kategorizace reálného spojitého rozsahu vstupních veličin. Toto rozdělení do konečného počtu diskretních hodnot se provádí podle doporučení z [19]. Okolní prostředí se pro potřeby výpočtu pokryje diskretní prostorovou sítí. Dále je nutné znát s dostatečnou přesností dlouhodobou povětrnostní statistiku charakterizující četnost výskytu jednotlivých kategorií počasí, směr a sílu větru, četnost a intenzitu atmosférických srážek, četnost a výškové rozložení inverzních vrstev a dále kompletní orografické a demografické údaje pro uvažované lokality s požadovaným rozsahem zhruba do 80 až 100 km od zdroje exhalací. Idealizované předpoklady (homogennost a časová konstantnost) jsou zaváděny také pro zdrojový člen definující výpusti jednotlivých radionuklidů a jejich fyzikálně-chemickou formu.

3.1 Definice diskretní prostorové sítě pro numerický výpočet

Celý prostor kolem bodového zdroje emisí je pro potřeby numerického výpočtu rozdělen na $IPS1$ úhlových sektorů k a dále na IX radiálních pásem i . Dílčí úhlový sektor má velikost $2\pi/IPS1$ radiánů, směr č.1 směřuje na sever a číslování probíhá ve směru pohybu hodin. Data pro výpočet jsou zde připravena pro max. hodnotu $IPS1=16$, přičemž těchto 16 sektorů pokrývá celý prostorový úhel 2π radiánů.

IX radiálních uzlů pokrývá vzdálenost až do 100 km od zdroje. Data jsou připravena pro max. hodnotu $IX=20$, příslušné poloměry soustředných kružnic mají hodnoty (v [km]):

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 100;

Prostor kolem zdroje emisí je tedy rozdělen na $IPS1 * IX$ mezikruhových výsečí. V dalším výpočtu je v každé z nich provedeno středování parametrů výpočtu (rychlosti větru, disperzní koeficienty apod.) a zadávaných výpočetních vstupů (orografická a demografická data, předpoklad stálé povětrnostní situace ve všech segmentech i daného sektoru k atd.). Radiační situace v konkrétním segmentu (i,k) je reprezentovaná střední hodnotou přízemní objemové aktivity, střední hodnotou depozice apod.).

Vlastní výpočet probíhá postupně pro všechny segmenty (i,k) , $((i=1,IX), k=1,IPS1)$; pro různé variantní srovnávací výpočty byla již do původní verze programu RJ009 implementována možnost provádět zkrácený výpočet pro vybraných IPS úhlových sektorů ($IPS \leq IPS1$). Lze provádět výpočet v radiálním směru pro $i=1$ až $IX1$, kde $IX1 \leq IX$. Tato možnost nejen umožňuje zkrátit variantní výpočty, ale též zmenšuje systematickou chybu, kterou do výpočtu zanáší středování těch parametrů, které se středují pro konkrétní sektor k přes všechny segmenty i .

Diskretizace prostorové a meteorologické sítě sebou přináší nutnost definovat specifický formát vstupních dat, který je nutno mít na paměti již v samé počáteční fázi objednávky a sběru vstupních údajů. Představu o jejich rozsahu je možno si učinit z následujícího popisu, který musí být specifikován pro každou lokalitu jaderného zařízení (hodnoty pro Temelín jsou uvedeny v uživatelském manuálu).

a) Reliéf terénu je popisován databázemi sjednocenými pro oba systémy NORMAL i HAVAR-RP (podrobně v [9]), které zahrnují:

- Výškopis pro ETE a EDU v alternativách:
 - Maximální nadmořské výšky na polárních výsečích
 - Střední nadmořské výšky na polárních výsečích
- Distribuce typu zemského povrchu (*zastavěné oblasti, travnaté plochy + nedefinovaný, zemědělské kultury, zalesněné oblasti, vodní plochy*) na polárních výsečích v jednotlivých směrech větrné růžice kolem ETE a EDU:
 - Distribuce typu zemského povrchu na polárních výsečích v jednotlivých směrech větrné růžice kolem JE
 - Převládající typ zemského povrchu na polárních výsečích
 - Vážené hodnoty drsnosti povrchu

b) Střední drsnosti terénu: Zatímco v dřívějším algoritmu se zadávaly jen vystředované drsnosti (pro celý sektor jediná hodnota), v předkládané verzi se vychází z dvourozměrného pole zadávaných lokálních drsností terénu (střední hodnota pro každý segment (i,k)). Do systému NORMAL je zabudován zpřesněný model efektu lokální drsnosti terénu. U dřívějšího postupu byly zadávány pouze diskrétní kategorie drsnosti $ZD(k)$ jako střední hodnota v celém sektoru k , jimž se přiřadí odpovídající referenční drsnost v [m] jako jedna ze 6 možných diskrétních hodnot (viz popis pole $ZO(6)$ v databázi). Lokální drsnosti pro každý segment (k,i) se zadávají jako pole $ZDRS(i,k)$. Podrobnější specifikace je uvedena v popisu vstupního souboru NORLOK.DAT v uživatelském manuálu systému NORMAL. Střední drsnosti pro daný sektor k a pro dané rozdělení v radiálním směru x_i ($i=1$ až $IX1$) se napočítávají do pole $ZDR(16)$ podle vztahu:

$$ZDR(k) = \frac{\sum_{i=1}^{IX1} ZDRS(k,i) \cdot S_{k,i}}{\sum_{i=1}^{IX1} S_{k,i}}, \quad (3.1)$$

kde plocha segmentu (k,i) se počítá podle: $S_{k,i} = \pi / IPS \cdot (x_i^2 - x_{i-1}^2)$

Místo jedné diskrétní hodnoty se tedy při výpočtu uvažuje skutečná střední drsnost $ZDR(k)$ pro každý konkrétní směr k . Nadto se dosáhne snížení systematické chyby výpočtů užitím skutečné střední drsnosti v sektoru (nabývá spojitých hodnot na rozdíl od dřívějšího zadávání několika málo diskrétních tříd), a to ve vztazích pro výpočet rychlosti větru $u(z)$ ve výšce z (viz dále vztah (3.2a)), průměrné rychlosti větru \bar{u} užitě v korekčních faktorech na radioaktivní rozpad, suchý spád a vymývání (viz dále vztah (3.2b)) a hlavně pro lineární aproximaci disperzních koeficientů pro reálnou střední drsnost $ZDR(k) = DRSKPS$ ležící mezi původními diskrétními drsnostmi (ke kterým se model HOSKER vztahuje $\langle ZO(JDRS); ZO(JDRS+1) \rangle$, $JDRS=1, \dots, 6$).

Zadávané vstupní hodnoty pro lokalitu Temelín jsou uvedeny v uživatelském manuálu [7].

c) Blízkostojící objekty v areálu jaderné elektrárny

Velká koncentrace nejrůznějších objektů v samotném areálu elektrárny (budovy, chladičí věže) ovlivňuje atmosférické proudění. Na závětrné straně překážek dochází k tvorbě vírů, což má za následek jednak zvětšení disperzních parametrů a jednak je ovlivněno převýšení vlečky exhalací v bezprostřední blízkosti zdroje výpustí. Oba tyto vlivy jsou ve výpočtu respektovány na základě zadaných údajů o výšce a šířce blízkostojících objektů. Pro případ JE Temelín byly tyto hodnoty odečteny pro jednotlivé úhlové sektory ze situačního plánu staveniště a jsou uvedeny v uživatelském manuálu.

d) Hustota osídlení v okolí lokality JE

Za účelem detailnějšího hodnocení dopadu radiačního zatížení na populaci je obyvatelstvo rozděleno do 6 věkových skupin a podle schématu:

<i>Věková kategorie</i>	<i>Charakteristika</i>
$a = 1$	děti do 1 roku
$a = 2$	děti 1 až 2 roky
$a = 3$	děti 2 až 7 let
$a = 4$	děti 7 až 12 let
$a = 5$	děti 12 až 17 let
$a = 6$	dospělí

Do programu vstupují data o obyvatelstvu ve formě třírozměrného pole $OBVYV(k,a,i)$, které vyjadřuje počet obyvatel věkové skupiny a v jednotlivých segmentech mezikruhových výsečí (i,k) hypotetické výpočtové sítě (i je index radiální vzdálenosti, k značí úhlový sektor) – viz popis v [7]. Bylo nutné provést rekonstrukci existujících diskretních dílčích neúplných údajů na mřížová demografická data pro úplné pokrytí definované výpočtové polární sítě. Počet obyvatel v obcích ČR podle věkových skupin vycházel ze stavu k 1.1.2003 (6249 obcí pro celou ČR). ČSÚ nebyl schopen dodat ke kódu obce příslušné souřadnice a musela být využita další primární databáze ÚIR (Územně Identifikační Registr), a sice její modul základních sídelních jednotek ÚIRZSJ. Další postup je podrobně popsán v [10].

3.2 Kategorizace meteorologických dat pro danou lokalitu

Východním materiálem je směrnice [19]. Pokud v následujících tabulkách jsou uvedeny konkrétní číselné hodnoty, jedná se o výsledky dlouhodobých meteorologických pozorování předané v prosinci 1994 z observatoře ČHMÚ Temelín pro účely hodnocení radiační situace v okolí jaderné elektrárny Temelín při jejím normálním provozu. Aktualizované údaje byly zakoupeny od ČHMÚ počátkem roku 1998. V r.2007 byly od ČEZ ETE získány meteorologické údaje pro jednotlivé roky 2000 až 2006, z nichž pak byl vypočten průměr pro období 2000-2006.

a) Kategorie povětrnostních situací

Při zpracování výsledků dlouhodobých meteorologických pozorování pro lokality jaderných zařízení je používána Pasquillova klasifikace výskytu možných povětrnostních situací. Jednotlivé povětrnostní třídy A, B, C, D, E, F jsou odstupňovány podle míry vertikální turbulence v přízemní vrstvě atmosféry:

A	vysoce nestabilní situace (intenzivní vertikální turbulence)
B	středně nestabilní
C	mírně nestabilní
D	neutrální
E	mírně stabilní
F	středně stabilní

V literatuře lze najít přiřazení mezi mírou stability počasí (charakterizovanou intenzitou proudění vzdušných mas, lokálními poměry, slunečním osvitem zemského povrchu, střídáním noci a dne a ročních období a pod.) a přibližnou povětrnostní situací. Kategorie počasí A je charakterizována vysokou nestabilitou s intenzivní vertikální turbulencí (např. slunečný letní den s větrem do 2 m/s). Neutrální situace je charakteristická pro zataženou oblohu (den či noc). Třída F pak reprezentuje stabilní povětrnostní situaci s velmi nízkou vertikální turbulencí a tím i míšením příměsí v atmosféře (jasná noc, mírný vítr; též inverzní situace). Z hlediska homogenosti vertikální vrstvy vede nestabilní situace k homogenní vertikální stratifikaci, zatímco v případě velmi stabilních podmínek může dojít k inverzní situaci.

Pravděpodobnosti výskytu jednotlivých kategorií počasí jsou určovány na základě dlouhodobých povětrnostních pozorování v dané lokalitě a jsou zohledněny v třírozměrné povětrnostní statistice $QIGM(k,j,m)$. Pro lokalitu JE Temelín jsou hodnoty uvedeny v uživatelském manuálu.

b) Horní hranice směšovací vrstvy H_{mix}

Diskrétní rozdělení v závislosti na kategorii počasí udává Tab. 2-1 v kapitole 2.8.

c) Atmosférické srážky

Program NORMAL uvažuje celkem 10 srážkových kategorií \underline{s} . Pravděpodobnosti výskytu srážek v roce $PS(s)$ a velikosti srážek $TH(s)$ v jednotlivých kategoriích \underline{s} je třeba určit na základě dlouhodobých meteorologických pozorování v každé lokalitě. Pro lokalitu JE Temelín jsou hodnoty poskytnuté ČHMÚ uvedeny v uživatelském manuálu.

d) Kategorie rychlostí větru

Je třeba kategorizovat spektrum rychlostí větru. Obecně doporučený postup (viz též [19]) vychází ze způsobu meteorologických měření v lokalitě. Měří se rychlost větru v referenční výšce 10 m nad zemí, přičemž skutečné spojitě spektrum rychlostí větru se rozdělí na konečný počet intervalů \underline{m} s jedinou charakteristickou (střední) rychlostí $u_{10}(m)$. Pro vyjádření vertikálního rychlostního profilu po \underline{z} je užít empirický vztah z [1]:

$$u(z) = u_{10} \cdot \frac{z^\varepsilon - drs^\varepsilon}{10^\varepsilon - drs^\varepsilon} \quad (3.2a)$$

drs ... drsnost zemského povrchu v [m],
bezrozměrný parametr ε je tabelován v [1] v závislosti na kategorii stability počasí.

Střední rychlost po z je brána podle:

$$\bar{u} = \frac{u_{10}}{10^\varepsilon - drs^\varepsilon} \cdot \left(\frac{h_{ef}^\varepsilon}{\varepsilon + 1} - drs^\varepsilon \right) \quad (3.2b)$$

Zde h_{ef} je efektivní výška vlečky exhalací.

Uvažuje se celkem 9 kategorií větru m . Velikosti rychlostí větru $u_{10}(m)$ v jednotlivých kategoriích m pro lokalitu JE Temelín jsou uvedeny v uživatelském manuálu [7].

e) Třírozměrná povětrnostní statistika $QIGM(m,k,j)$

Veličina $QIGM(k,j,m)$ udává pravděpodobnosti výskytu velikosti větru z kategorie m se směrem do úhlového sektoru k a při výskytu kategorie stability počasí j . Naměřené údaje se normují ke 100 (100 %). Pro lokalitu JE Temelín jsou hodnoty pro všechny kategorie počasí uvedeny v uživatelském manuálu systému NORMAL.

f) Charakteristiky výskytu inverzní situace

K dispozici jsou zatím jen dílčí údaje o pravděpodobnosti výskytu inverze a počtu hodin v roce, kdy trvá inverzní situace. Výšky inverzních vrstev pro konkrétní lokalitu obvykle k dispozici nejsou a extrapolují se údaje z jiných oblastí. Pro Předprovozní bezpečnostní zprávu JE Temelín zpracoval ČHMÚ Praha údaje o výškách inverzních vrstev na základě sady měření z některých lokalit. Data jsou uvedena v tabulce v uživatelském manuálu [7].

3.3 Dlouhodobé difúzní odhady objemové aktivity nuklidů a jejich zředění v přízemní vrstvě vzduchu

3.3.1 Transport ovzduším popsaný Gaussovou rovnicí šíření

Objemová aktivita nuklidů v přízemní vrstvě atmosféry je jeden z hlavních údajů vstupujících do výsledného hodnocení radiální zátěže. Vyjdeme z řešení Gaussovy rovnice šíření podle vztahu (2.3) pro konkrétní povětrnostní situaci třídy \underline{j} , přičemž vítr vane ve směru sektoru \underline{k} a má rychlost z třídy \underline{m} a při kategorii výskytu srážek \underline{s} . Dosazením $z=0$ a středováním po \underline{y} v rámci určitého sektoru směru větru dostaneme pro střední hodnotu přízemní objemové aktivity v [Bq.m⁻³] radionuklidu \underline{n} vztah:

$$\bar{C}_{k,j,m,s}^n(x, z=0) = \frac{A^n}{2\pi \cdot \sigma_{y,j}(x) \cdot \sigma_{z,j}(x) \cdot u_{k,j,m}} \left\{ \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_{y,j}^2(x)}\right) \right\}_{str} \cdot \left[2 \cdot \exp\left(-\frac{h_{ef}^2(k,j,m)}{2\sigma_{z,j}^2(x)}\right) + \eta_{JV}(z=0; k, j, m) \right] \cdot f_R^n(x; k, j, m) \cdot f_F^n(x; k, j, m) \cdot f_W^n(x; k, j, m, s) \quad (3.3)$$

přičemž pro vyjádření střední hodnoty po \underline{y} je použit konzervativní odhad:

$$\left\{ \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_{y,j}^2(x)}\right) \right\}_{str} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_{y,j}^2(x)}\right) \cdot dy}{2\pi \cdot x / IPS1} = \frac{\sigma_{y,j}(x) \cdot IPS1}{\sqrt{2\pi} \cdot x} \quad (3.4)$$

IPS1 je celkový počet úhlových sektorů \underline{k} , na něž je rozdělena větrná růžice.

$u_{k,j,m}$ je referenční rychlost větru v efektivní výšce v sektoru \underline{k} při kategorii větru \underline{m} a při počasí z kategorie \underline{j} . Obvykle se ztotožňuje se střední rychlostí vzdušných mas v sektoru podle vztahu (3.2b). Pro přesnější rozlišení však platí pro volbu referenční konstantní rychlosti stejný komentář jako v případě předchozího základního vztahu (2.3) a měla by se vztahovat k té výšce, pro kterou byly odvozovány příslušné poloempirické formule pro disperzní koeficienty.

Faktor zředění přízemní objemové aktivity radionuklidu \underline{n} se definuje obecně jako:

$$\chi^n(x) = \bar{C}^n(x, z=0) / A^n \quad [\text{s.m}^{-3}] \quad (3.5)$$

Pro případ dceřinného izotopu se k (3.3) přičítá příspěvek od mateřského nuklidu ve smyslu vztahu (2.18).

Je třeba si znovu uvědomit, že vztah (3.3) představuje řešení pro jednu konkrétní povětrnostní situaci danou konkrétní kategorií počasí \underline{j} a konkrétní kategorií intenzity srážek

\underline{s} , přičemž vítr stabilně fouká ve směru sektoru \underline{k} a má rychlost z kategorie \underline{m} . Pro časovou periodu několika let je k dispozici dlouhodobá povětrnostní statistika $QIGM(k,j,m)$. Pak lze najít dlouhodobý faktor zředění vážením přes všechny možné povětrnostní situace, které se během dlouhé periody provozu vyskytují. S přihlédnutím k předchozím vztahům lze vyjádřit střední (středovanou jak z hlediska prostorového segmentu diskrétní sítě tak z hlediska dlouhodobého) přízemní objemovou aktivitu nuklidu \underline{n} podle:

$$\bar{C}_k^n(x) = \bar{A}^n \cdot \frac{IPSI}{\sqrt{2\pi} \cdot x} \sum_j \sigma_{y,j}(x) \sum_m \sum_s \sum_{g=0}^{INV} \left\{ \frac{\Psi_{k,j,m}^g(x)}{u_{k,j,m}} \cdot QIGM(k,j,m) \cdot \right. \quad (3.6a)$$

$$\left. \cdot f_R^n(x;k,j,m) \cdot f_F^n(x;k,j,m) \cdot f_W^n(x;k,j,m,s) \cdot PS(s) \cdot PIN(g) \right\}$$

Zde $IPSI$ je celkový počet směrů větru, na které je rozdělena větrná růžice, $PIN(g)$ značí pravděpodobnost výskytu inverzní vrstvy z kategorie g charakterizovanou výskytem spodní základny inverze s výškou $HS(g)$. První krok pro $g=0$ se týká homogenní stratifikace, kdy $PIN(g=0)$ představuje pravděpodobnost výskytu povětrnostní situace bez inverze. Funkce Ψ má význam přízemní osová aktivity ve vzdálenosti x při parametrech (k,j,m,g) a je popsána dále vztahem (3.7).

Příslušný dlouhodobý faktor zředění [$s \cdot m^{-3}$] se vyjadřuje jako:

$$\bar{\chi}_k^n(x) = \frac{IPSI}{\sqrt{2\pi} \cdot x} \sum_j \sigma_{y,j}(x) \sum_m \sum_s \sum_{g=0}^{INV} \left\{ \frac{\Psi_{k,j,m}^g(x)}{u_{k,j,m}} \cdot \right. \quad (3.6b)$$

$$\left. \cdot f_R^n(x;k,j,m) \cdot f_F^n(x;k,j,m) \cdot QIGM(k,j,m) \cdot f_W^n(x;k,j,m,s) \cdot PIN(g) \cdot PS(s) \right\}$$

Stěžejní práce v oboru (např. lit. [2], [4]) kvantitativně popisují transport mas vypouštěných vzdušín směrem do přízemní vrstvy vzduchu pro různé směry větrné růžice a pro různé vzdálenosti od zdroje (tedy v uzlových bodech prostorové sítě (k,i)) pomocí dlouhodobého koeficientu, který vyjadřuje pouze zředování těchto vzdušín. V této fázi není zohledněno zředování současně vypouštěných radioaktivních příměsí v důsledku suchého a mokrého vypařování a radioaktivního rozpadu. Jde o vyjádření základního vlivu prostorového efektu zředování s přihlédnutím k dlouhodobé povětrnostní statistice. Takto definovaný dlouhodobý faktor zředění vzdušných mas [$s \cdot m^{-3}$] se vyjádří analogicky s (3.6b) jako:

$$\hat{\chi}_k^n(x) = \frac{IPSI}{\sqrt{2\pi} \cdot x} \sum_j \sigma_{y,j}(x) \sum_m \sum_g \left\{ \frac{\Psi_{k,j,m}^g(x)}{u_{k,j,m}} \cdot QIGM(k,j,m) \right\} \quad (3.6c)$$

Ve všech třech předchozích vztazích se dosazuje normovaná přízemní osová aktivity [m^{-2}]:

$$\psi_{k,j,m}^g(x) = \frac{1}{\pi \cdot \sigma_{y,j} \cdot \sigma_{z,j}} \cdot \left[\exp\left(-\frac{h_{ef}^2(k,j,m)}{2\sigma_{z,j}^2}\right) + \eta_{JV}^g(k,j,m) \right] \quad (3.7)$$

Přítom turbulentní vlastnosti atmosféry jsou omezené inverzní výškou. Je třeba zdůraznit, že ve vztazích (3.6) se jedná o středování jednak z hlediska “dlouhodobého” a dále středování kolem místa \underline{x} v periferním směru, přičemž jde o radiální výseč $2\pi / IPSI$ radiánů s osou v uvažovaném směru \underline{k} .

Korekční faktor na radioaktivní rozpad se bere podle:

$$f_R^n(x; k, j, m) = \exp\left(-\lambda_n \cdot \frac{x}{\bar{u}_{k,j,m}}\right) \quad (3.8)$$

λ_n je rozpadová konstanta nuklidu \underline{n}

\bar{u} je střední rychlost po \underline{z} počítaná ze vztahu (3.2b)

Korekční faktor na suchý spad:

$$f_F^n(x; k, j, m) = \exp\left[-\sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{v_g^n}{u_{k,j,m}^0} \cdot \int_0^x \frac{dx}{\sigma_{z,j} \cdot \exp(h_{ef}^2(k,j,m)/2 / \sigma_{z,j}^2)}\right] \quad (3.9)$$

v_g^n efektivní rychlost suchého usazování [m/s]

u^0 referenční rychlost větru v 10 metrech [m/s]

Korekční faktor na vymývání atmosférickými srážkami:

$$f_W^n(x; k, j, m, s) = \exp\left(-\Lambda_s^n \cdot \frac{x}{\bar{u}_{k,j,m}}\right) \quad (3.10)$$

Λ_s^n konstanta vymývání nuklidu \underline{n} srážkami z kategorie \underline{s} ; je vyjádřena dále podle (3.17)

\bar{u} střední rychlost po \underline{z} počítaná ze vztahu (3.2b)

3.3.2 Dlouhodobé odhady na základě BOX-modelu

BOX-model se používá pro orientační či limitní odhady a je založený na výpočtu středních hodnot koncentrace nuklidů v ovzduší v jednotlivých mezikruhových výsečích (boxech). Střední atmosférická koncentrace se při kontinuálním rovnoměrném postupu vlečky vyjádří jako podíl škodlivin emitovaných za časovou jednotku k objemu vzduchu v boxu ve vzdálenosti \underline{x} , kterým projdou vzdušniny za tentýž čas.

Při konstrukci boxu ve shodě s [20] se předpokládá, že kontinuální stacionární exhalace unášené vzduchem postupují konstantní střední rychlostí \bar{u} podle (3.2b) ve směru sektoru \underline{k} a homogenně se rozptylují v mezikruhové výseči s osou ve směru \underline{k} a s úhlem výseče φ_k . Vertikální omezení boxu tvoří horizontální rovina ve vzdálenosti H_{box} nad terénem. Tuto výšku položíme rovnu horní hranici směšovací vrstvy H_{mix} pro případ homogenní vertikální stratifikace a nebo výšce spodní základny inverzní vrstvy pro případ výskytu inverzí. Úhel výseče φ_k s osou ve směru \underline{k} má pro každý směr konstantní hodnotu $2\pi / IPS1$ radiánů.

Za všech shora uvedených předpokladů je pak přízemní objemová aktivita nuklidu \underline{n} ve vzduchu pro boxový model rovna střední koncentraci v celém boxu kolem místa \underline{x} a najde se podle vztahu (v analogii se vztahem (3.2)):

$${}^{BOX}C_{k,j,m,s}^n(x,y,z=0) = \frac{\dot{A}^n}{\bar{u}_{k,j,m} \cdot H_{box,j} \cdot x \cdot \varphi_k} \cdot {}^{BOX}f_R^n(x;k,j,m) \cdot {}^{BOX}f_F^n(x;k,j,m) \cdot {}^{BOX}f_W^n(x;k,j,m,s) \quad (3.11)$$

Zde $\varphi_k = 2\pi / IPS1$. Rozměr koncentrace aktivity je v $[Bq / m^3]$ a jde o únik ve směru \underline{k} s rychlostí \underline{m} při kategorii počasí \underline{j} , srážkách \underline{s} a střední unášivé rychlosti vlečky $\bar{u}_{k,j,m}$.

Je zřejmé, že dlouhodobé charakteristiky analogické s (3.6a), (3.6b) a (3.6c) se nyní opět dostanou vážením (3.11) pomocí dlouhodobé povětrnostní statistiky $QIGM(k,j,m)$.

Zbývá definovat tvar faktorů ochuzení pro BOX-model. Vyjdeme ze vztahu (2.4), který je výsledkem řešení bilanční diferenciální rovnice :

$$\frac{d \dot{A}^n(x)}{dx} = - \left(\frac{\lambda^n}{\bar{u}_{k,j,m}} + \frac{\bar{\Lambda}}{\bar{u}_{k,j,m}} + \int_{-\infty}^{+\infty} v_g^n \cdot \chi_{k,j,m}^n(x,y) \cdot dy \right) \cdot \dot{A}^n(x) \quad (3.12)$$

Odtud plyne, že korekční faktory pro radioaktivní rozpad a pro vymývání atmosférickými srážkami jsou i pro případ BOX-modelu vyjádřeny vztahy (3.8) resp. (3.10). Korekční faktor pro suchý spad se určí (s přihlédnutím ke vztahu (3.5)) podle:

$$\frac{d \dot{A}^n(x)}{dx} = - \int_{-Y_{mez}}^{+Y_{mez}} v_g^n \cdot {}^{BOX}C_{k,j,m}^n(x,y) \cdot dy \quad (3.13)$$

Zde $Y_{mez} = 1/2 \cdot x \cdot \text{tg}(\varphi_k) \approx x \cdot \pi/IPS1$

Odtud pak je korekční faktor na suchý spad pro případ BOX-modelu vyjádřen vztahem:

$${}^{BOX}f_F^n(x, k, j) = \exp\left(-\frac{v_g^n}{\bar{u}_{k,jm} \cdot H_{box,j}} \cdot x\right) \quad (3.14)$$

3.4 Dlouhodobé difúzní odhady aktivity nuklidů usazujících se na zemském povrchu

3.4.1 Dlouhodobé FALLOUT a WASHOUT faktory

K deponování radionuklidů z vlečky na zemský povrch dochází jednak mechanismem suchého vypadávání v přízemní vrstvě a dále vymýváním aktivity z radioaktivního oblaku atmosférickými srážkami. V důsledku těchto procesů současně dochází k “ochuzování” obsahu škodlivin ve vlečce, jak bylo podrobněji uvedeno v kapitole 2.1 při diskuzi k faktorům ochuzení zdroje zaváděných do základního řešení podle vztahu (2.3).

a) Dlouhodobý faktor suchého vypadávání nuklidů (FALLOUT)

Proces suchého výpadku závisí na stavu v přízemní vrstvě, a proto dlouhodobý faktor suchého spadu nuklidu n v místě x sektoru k v $[m^{-2}]$ se určuje přímo v závislosti na dlouhodobém faktoru zředění přízemní objemové aktivity $\bar{\chi}^n$ definovaném výrazem (3.6b) podle vztahu:

$$\bar{F}_k^n(x) = v_g^n \cdot \bar{\chi}_k^n(x) \quad (3.15a)$$

resp. pro BOX-model:

$${}^{BOX}\bar{F}_k^n(x) = v_g^n \cdot {}^{BOX}\bar{\chi}_k^n(x) \quad (3.15b)$$

Efektivní rychlosti usazování v_g^n v $[m \cdot s^{-1}]$ jednotlivých radionuklidů n jsou rozlišeny podle jejich fyzikálně-chemické formy. Jejich doporučené hodnoty jsou uvedeny v [1], pro účely srovnávacích výpočtů byly použity hodnoty z produktu PC CREAM [22, 23].

b) Dlouhodobý faktor vymývání příměsí atmosférickými srážkami (WASHOUT)

Proces vymývání se uskutečňuje podél celé dráhy pádu vodních částic jako důsledek jejich interakce s příměsí ve vlečce. Obecné vyjádření rychlosti depozice aktivity v $[Bq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$ má tvar:

$$W_{k,j,m,s}^n(x, y) = \int_0^\infty \Lambda_s^n \cdot C_{k,j,m,s}^n(x, y, z) \cdot dz \quad (3.16)$$

x, y, z jsou kartézské souřadnice : x - ve směru šíření vlečky exhalací

y - kolmo ke směru šíření (horizontálně)

z - kolmo ke směru šíření (vertikálně)

C^n je objemová aktivita prvku \underline{n} ve vzduchu daná vztahem (2.3) z kapitoly 2.1, přičemž jde o jednu konkrétní meteorologickou situaci charakterizovanou indexy k, j, m, s . Konstanta Λ_s^n vymývání prvku \underline{n} při intenzitě srážek z kategorie \underline{s} má rozměr [s^{-1}] a uvažuje se ve tvaru:

$$\Lambda_s^n = \gamma^n \cdot \mathcal{G}_s \quad (3.17)$$

γ^n parametr závislý na fyzikálně-chemické formě exhalace radionuklidu \underline{n}
 [$hod. mm^{-1} \cdot s^{-1}$]

ν_s intenzita srážek kategorie \underline{s} [$mm \cdot hod^{-1}$]

Integrací (3.16) po \underline{z} se dostane pro případ homogenní vertikální stratifikace :

$$W_{k,j,m,s}^n(x, y) = \frac{\Lambda_s^n \cdot A^n}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_y(x) \cdot u_{k,j,m}} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y^2(x)}\right) \cdot f_R^n(x; k, j, m) \cdot f_F^n(x; k, j, m) \cdot f_W^n(x; k, j, m, s) \quad (3.18)$$

$\sigma_y(x)$ horizontální disperzní parametr v místě x ve směru šíření vlečky [m]

A intenzita kontinuálního zdroje radionuklidu \underline{n} v [Bq / s]

u rychlost větru v efektivní výšce vlečky z kategorie \underline{m} v [m/s]

f_R korekční faktor na radioaktivní rozpad nuklidu \underline{n} ;

f_F korekční faktor suchého spadu radionuklidu \underline{n} ;

f_W korekční faktor na vymývání radionuklidu \underline{n} atmosférickými srážkami;

Po vystředování předchozího vztahu po \underline{y} dostaneme:

$$W_{k,j,m,s}^n(x) = \frac{IPS1}{2\pi \cdot x} \cdot \frac{\Lambda_s^n \cdot A^n}{u_{k,j,m}} \cdot f_R^n(x; k, j, m) \cdot f_F^n(x; k, j, m) \cdot f_W^n(x; k, j, m, s) \quad (3.19)$$

Obě strany tohoto výrazu nyní dělíme A^n a pro konkrétní \underline{k} provedeme vážení přes všechny uvažované kategorie počasí \underline{j} , rychlosti větru \underline{m} a kategorie srážek \underline{s} s využitím povětrnostní statistiky QIGM(k, j, m), statistiky ročních srážek PS(s) a pravděpodobností výskytu inverze PIN(g). Dojde se pak k následujícímu tvaru pro vyjádření dlouhodobého faktoru vymývání atmosférickými srážkami [m^{-2}] v jednotlivých sektorech \underline{k} :

$$\bar{W}_k^n(x) = \frac{IPS1}{2\pi \cdot x} \cdot \sum_j \sum_m \sum_s \sum_{g=0}^{INV} \left[\frac{\Lambda_s^n}{u_{k,j,m}} \cdot QIGM(k, j, m) \cdot PS(s) \cdot PIN(g) \right] \quad (3.20a)$$

$$\cdot f_R^n(x; k, j, m) \cdot f_F^n(x; k, j, m) \cdot f_W^n(x; k, j, m, s) \quad]$$

Zde *IPSI* je celkový počet směrů větru, na které je rozdělena větrná růžice, *PIN(g)* značí pravděpodobnost výskytu inverzní vrstvy z kategorie *g* charakterizovanou výskytem spodní základny inverze s výškou *HS(g)*. První krok pro *g=0* se opět týká homogenní stratifikace, kdy *PIN(g=0)* představuje pravděpodobnost výskytu povětrnostní situace bez inverze.

Analogický vztah pro BOX-model se dostane dosazením (3.11) do (3.16), přičemž se integruje v intervalu $\langle 0; H_{mix,j} \rangle$. Je zřejmé, že dostaneme:

$$\begin{aligned} \bar{W}_k^n(x) = \frac{IPSI}{2\pi \cdot x} \cdot \sum_j \sum_m \sum_s \left[\frac{\Lambda_s^n}{u_{k,j,m}} \cdot QIGM(k, j, m) \cdot PS(s) \cdot \right. \\ \left. \cdot \bar{f}_R^{BOX}(x; k, j, m) \cdot \bar{f}_F^{BOX}(x; k, j, m) \cdot \bar{f}_W^{BOX}(x; k, j, m, s) \right] \end{aligned} \quad (3.20b)$$

Střední rychlost (po \underline{z}) větru $\bar{u}_{k,j,m}$ se určuje podle vztahu (3.2b).

3.4.2 Časový vývoj usazování aktivity nuklidů na zemském povrchu

V případě normálního provozu jaderného zařízení dochází ke kontinuálnímu usazování radionuklidů na zemském povrchu. Časové průběhy usazené aktivity berou v úvahu zjednodušený model rozpadových řetězců ve smyslu předchozí kapitoly 2.9, kdy je zahrnuta tvorba nejdůležitějších dceřinných produktů. Podrobnější vysvětlení je uvedeno v uživatelském manuálu systému NORMAL (viz popis polí IIP(n), IIP2(n), BET1(n), BET2(n)).

Pomocí předchozích vztahů definujeme veličinu:

$$\bar{S}_k^n(x) = A^n \cdot \left[\bar{F}_k^n(x) + \bar{W}_k^n(x) \right] \quad (3.21)$$

Tato veličina má rozměr $[Bq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$ a v dlouhodobém stacionárním procesu kontinuálního usazování nuklidů na zemském povrchu představuje vlastně zdrojový člen rovný konstantní rychlosti usazování aktivity na jednotku plochy ve vzdálenosti \underline{x} za 1 sec v důsledku stacionárních výpusť při normálním provozu.

Uvažujme rozpadový řetězec :

nuklid *n* (rodičovský) ---> **nuklid *d*** (dceřinný) ---> **stabilní**

Hledanou střední (z dlouhodobého hlediska) usazenou plošnou aktivitu nuklidů \underline{n} a \underline{d} v místě \underline{x} daného sektoru \underline{k} a v čase *t* od počátku provozu označíme $\bar{\Omega}_k^n(t, x)$ resp. $\bar{\Omega}_k^d(t, x)$. Mají rozměr $[Bq \cdot m^{-2}]$ a jejich bilanční rovnice mají tvar:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\bar{\Omega}_k^n(t, x)) &= \bar{S}_k^n(x) - \lambda^n \cdot \bar{\Omega}_k^n(t, x) - \lambda_{pov}^n \cdot \bar{\Omega}_k^n(t, x) \\ \frac{d}{dt}(\bar{\Omega}_k^d(t, x)) &= \bar{S}_k^d(x) - \lambda^d \cdot \bar{\Omega}_k^d(t, x) - \lambda_{pov}^d \cdot \bar{\Omega}_k^d(t, x) + \\ &+ \lambda^d \cdot \beta_{n \rightarrow d} \cdot \bar{\Omega}_k^n(t, x) \end{aligned} \quad (3.22)$$

Zdrojové členy S jsou dány vztahem (3.21); necht' v čase $t=0$ (okamžik počátku usazování v místě x) je usazená aktivita Ω_0^n resp. Ω_0^d .

λ rozpadová konstanta radionuklidu [1/s]
 λ_{pov} konstanta odstraňování nuklidu z povrchu jinými mechanismy než rad. rozpadem [1/s]; Platí:
 $\lambda_{pov}^r = \ln 2 / TCEZ(r)$ (3.23)

Zde hodnota TCEZ(r) značí poločas setrvání radionuklidu r na zemském povrchu a zadává se na vstupu (viz popis souboru NORIN.DAT v uživatelském manuálu systému NORMAL)

$\beta_{n \rightarrow d}$ pravděpodobnost izomerního přechodu při rozpadu mateřského prvku na dceřinný

Hledaný časový průběh usazené aktivity pak má tvar:

$$\begin{aligned} \bar{\Omega}_k^n(x, t) &= \Psi_{part}^n + (\Omega_0^n - \Psi_{part}^n) \cdot \exp(-\lambda_{ef}^n \cdot t) \\ \bar{\Omega}_k^d(x, t) &= \Psi_{part}^d + (\Omega_0^n - \Psi_{part}^n) \cdot \frac{\lambda^d \cdot \beta_{n \rightarrow d}}{\lambda_{ef}^d - \lambda_{ef}^n} \cdot \exp(-\lambda_{ef}^n \cdot t) + \\ &+ \left[(\Omega_0^d - \Psi_{part}^d) - (\Omega_0^n - \Psi_{part}^n) \cdot \frac{\lambda^d \cdot \beta_{n \rightarrow d}}{\lambda_{ef}^d - \lambda_{ef}^n} \right] \cdot \exp(-\lambda_{ef}^d \cdot t) \end{aligned} \quad (3.24^*)$$

Efektivní rozpadová konstanta je zavedena podle $\lambda_{ef}^n = \lambda^n + \lambda_{pov}^n$ resp. $\lambda_{ef}^d = \lambda^d + \lambda_{pov}^d$; příslušné partikulární integrály jsou:

$$\begin{aligned} \Psi_{part}^n &= \bar{S}_k^n(x) / \lambda_{ef}^n \\ \Psi_{part}^d &= \frac{\lambda^d \cdot \beta_{n \rightarrow d}}{\lambda_{ef}^n \cdot \lambda_{ef}^d} \cdot \bar{S}_k^n(x) + \bar{S}_k^d(x) / \lambda_{ef}^d \end{aligned}$$

Pro zkrácení zápisu se dále (např. při integraci dávkového příkonu od depozice) budeme odvolávat na první rovnici pro mateřský izotop, kterou přepíšeme do tvaru:

$$\bar{\Omega}_k^n(t, x) = \bar{S}_k^n(x) \cdot \left[1 - \exp(-\lambda_{ef}^n \cdot t) \right] / \lambda_{ef}^n \quad (3.24)$$

Poznamenejme, že při výpočtech v této práci byl použit další konzervativní předpoklad $\lambda_{pov} = 0$. Pro lokalitu Temelín ani Dukovany tato hodnota nebyla dosud zadána, nicméně program NORMAL byl rozšířen o možnost zadávat obecně nenulovou hodnotu λ_{pov} . V práci

[9] je učiněn pokus o realistický odhad vlivu odstraňování usazenin z povrchu. Zde bylo použito v praxi naměřených hodnot λ_{pov} pro izotop Cs137 a na základě ověřovacích výpočtů je konstatováno až dvouřádkové snížení hodnot dávky od tohoto izotopu usazeného na povrchu.

V souvislosti s prováděním srovnávacích výpočtů s produktem PC CREAM byla u produktu NORMAL provedena revize určování a zadávání konstanty λ_{pov}^n . Problematika je podrobněji diskutována v [29]. Složitost problému podtrhuje fakt lokální závislosti mechanismů odstraňování. Záleží na typu povrchu (propustný, nepropustný), jeho orientaci v prostoru (střechy, kolmé zdi) i okamžitých povětrnostních podmínkách. V podstatě jsou v literatuře rozlišovány tři hlavní procesy přispívající k odstraňování radionuklidů z daného místa:

- Část usazeného materiálu původně deponovaného na externích površích je vystavena působení větru, deště, sněhu a jiným povětrnostním vlivům, které mají tendenci odnášet usazeniny. Tento efekt je označován jako “povětrnostní” (**weathering**)
- V případě atmosférických srážek jistá část srážek nezůstává na konkrétním místě spadu, nýbrž odtéká do vodotečí a pod. Tento efekt popisují tzv. **run-off** modely.
- Nuklidy usazené na propustných površích postupem času migrují do vnitřních vrstev. V [22] je tato problematika zpracována podrobněji pro případ půdního povrchu, kdy se rozlišují další možné alternativy:
 - půdní povrch je dobře promícháván - na příklad orná půda, kdy orná vrstva má tloušťku zhruba 30 cm a ve které se předpokládá homogenní koncentrace usazených nuklidů
 - nenarušovaný povrch, u kterého se počítá (resp. měří) postupná migrace nuklidů do spodních vrstev

Zohlednění efektů odstraňování nuklidů z povrchu se v produktu NORMAL děje již zmíněným $TCEZ(n)$ (representuje “run-off” mechanismy) ve vstupním souboru NORIN.DAT (viz popis v uživatelském manuálu). Do této veličiny si může uživatel aditivně zahrnout i další způsob a zadat koeficienty k_{11} resp. k_{44} . Zde k_{11} vyjadřuje poměrnou ztrátu nuklidu z vrchní zóny půdy (relativní únik z kořenové zóny) o tloušťce 30 cm v případě promíšené horní vrstvy, obdobný význam má k_{44} pro případ nenarušovaného povrchu (např. pastevní plochy). Lze použít číselné hodnoty uváděné v [23]:

$$\begin{aligned}k_{11} &= 6.94 \cdot 10^{-3} \text{ [rok}^{-1}\text{]} \\k_{44} &= 1.39 \cdot 10^{-2} \text{ [rok}^{-1}\text{]}\end{aligned}$$

Tyto hodnoty se tedy považují jako únikové hodnoty z kořenové zóny (dokonalé odstínění horní vrstvou půdy) a vnitřně se připočítávají k již zadaným hodnotám $TCEZ(n)$. V uživatelském manuálu je popsán způsob, jak lze tyto hodnoty interaktivně měnit zadáváním ze vstupního panelu obrazovky.

Poznamenejme, že poněkud jiný význam má druhá sada migračních koeficientů λ_{m1} a λ_{m2} , které vystupují dále ve vztahu (4.8c). Pomocí nich se počítá stínící korekční faktor při výpočtu očekávané dávky záření od usazených nuklidů, který představuje stínící efekt půdy při postupném pronikání nuklidů z povrchu.

V úvodu jsme zmínili snahu o unifikaci modelování v NORMAL se systémem HAVAR-RP. V systému HAVAR-RP [12] jsou určovány konstanty odstraňování λ_{mig}^n a λ_{fix}^n v důsledku migrace a fixace aktivity s rozměrem s^{-1} na základě obsáhlého zpracování literatury a mohou být alternativně použity i v systému NORMAL. V některých pramenech

je migrace označována jako vyluhování (leaching), 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 [43]). Existují odhady založené na předpokladu o velikosti střední perkolační rychlosti vody v půdě (na příklad je brána hodnota 2 m/rok). Při výpočtech příjmu aktivity při ingestci od kořenové cesty z půdy do rostliny pak není k dispozici pro transport ta složka aktivity, která je fixovaná v půdě. Některé prameny (např. [45]) k migraci a fixaci 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 [44] byly do systému RODOS [28] převzaty hodnoty, které byly použity i v kódu HAVAR-RP pro přípravu implicitních číselných nabídek v panelech ingestčního 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 [44, 45, 28] :

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

Údaje o míře fixace pro jiné nuklidy v literatuře chybějí. V produktu ECOSYS [44] není proces fixace pro jiné nuklidy považován za významný a je zanedbán. Co se týká migrace, budeme vycházet z přístupu v produktu RODOS [28] shrnutém v následující tabulce, která rozlišuje intenzitu migrace pro tři skupiny prvků podle typu půdy.

typ půdy	migrační konstanta λ_{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	6.9×10^{-3} ($T_{1/2}=100.4$ rok)	1.4×10^{-2} ($T_{1/2}=49,5$ rok)	2.8×10^{-1}
pastviny	1.7×10^{-2} ($T_{1/2}=40,765$ rok)	3.5×10^{-2} ($T_{1/2}=19,8$ rok)	6.9×10^{-1}

Direktiva HSK-R-41 (1998) udává pro konstanty odstraňování (neradioaktivní) hodnoty:

Prvek	λ_{env} (rok-1)	$T_{1/2}$ (rok)
Tc, Sr, Cs	7.0×10^{-2}	9.9
Ca, Br, Ba, Mn, Zn	3.5×10^{-2}	19.8
I, Te	1.7×10^{-2}	40.7

Další experimentální údaje byly čerpány z [43] a jsou používány k upřesnění dlouhodobého transportu radionuklidů při vývoji produktů NORMAL a HAVAR-RP.

4. Hodnocení radiačního zatížení obyvatelstva v důsledku úniků do atmosféry při dlouhodobém běžném provozu jaderného zařízení

4.1 Metodika hodnocení radiační zátěže

V dalším textu jsou uvažovány následující kategorie orgánů resp. tkání, které se rozlišují indexem \underline{o} ($\underline{o}=1$ až 7) s významem:

$\underline{o} = 1$	celé tělo (k efektivní dávce)
$\underline{o} = 2$	gonády
$\underline{o} = 3$	červená kostní dřev
$\underline{o} = 4$	pľíce
$\underline{o} = 5$	štitná žláza
$\underline{o} = 6$	vrchní část tlustého střeva
$\underline{o} = 7$	kůže

Za účelem detailnějšího hodnocení dopadu radiačního zatížení na populaci je obyvatelstvo rozděleno na 6 věkových skupin charakterizovaných indexem \underline{a} podle schématu:

<i>Věková kategorie</i>	<i>Charakteristika</i>
$\underline{a} = 1$	děti do 1 roku
$\underline{a} = 2$	děti 1 až 2 roky
$\underline{a} = 3$	děti 2 až 7 let
$\underline{a} = 4$	děti 7 až 12 let
$\underline{a} = 5$	děti 12 až 17 let
$\underline{a} = 6$	dospělí

Uvedené rozdělení vzešlo z vyhlášky SÚJB 307/2002 Sb. [30]. Jak již bylo zmíněno, je připravena [10] konverzní automatická procedura, která bude sloužit k pravidelné aktualizaci dat o obyvatelstvu. Na základě roční bilance vydávané Českým statistickým úřadem pro jednotlivé obce ČR jsou generována data o obyvatelstvu na variabilní polární síti (s volitelným krokem sítě i počtem zadávaných věkových skupin). Jedná se o data o populaci na zhuštěné polární síti s 20 nebo 35 radiálními pásmy od zdroje do 100 km.

Jako míru účinku radioaktivního záření na lidský organismus definuje vyhláška [30] následující veličiny, které se pak používají v radiační ochraně:

Ekvivalentní dávka H^o [Sv] : Je vyjádřena součinem střední absorbované dávky záření $\mathfrak{R}^{r,o}$ v orgánu nebo tkáni \underline{o} vyjádřené v [Gy] a radiačního váhového faktoru W^r . Je-li pole záření tvořeno více druhy záření \underline{r} , výsledná ekvivalentní dávka na orgán či tkáň \underline{o} se vyjádří podle vztahu:

$$H^o = \sum_{(r)} W^r \cdot \mathfrak{R}^{r,o} \quad (4.1)$$

Index \underline{r} značí druh záření a radiační váhový faktor W^r reprezentuje efekt rozdílného biologického účinku (a tím i rozsah a závažnost vzniklé zdravotní újmy) jednotlivých druhů

záření (případně s dalším rozlišením podle energie). Pro nejdůležitější druhy záření se uvádí:

<u>Druh záření:</u>	<u>Radiační váhový faktor W^r :</u>
fotony všech energií	1
elektrony a miony všech energií	1
neutrony (v závislosti na energii)	5 až 20
α částice, těžká jádra	20

Efektivní dávka $H^{o=1}$ [Sv] : Určuje se jako součet součinnů ekvivalentní dávky v ozářených tkáních či orgánech a tkáňových váhových faktorů podle vztahu:

$$H^{o=1} = \sum_{o=2,\dots} W^o \cdot H^o \quad (4.2)$$

Váhové faktory pro orgány či tkáň se berou podle [30]:

<u>Orgán (tkáň):</u>	<u>Tkáňový váhový faktor W^o :</u>
gonády	0.20
červená kostní dřeň	0.12
tlusté střevo	0.12
plíce	0.12
žaludek	0.12
močový měchýř	0.05
mléčná žláza	0.05
játra	0.05
jícen	0.05
štítná žláza	0.05
kůže	0.01
povrchy kostí	0.01
zbytek	0.05

Dále se zavádějí veličiny charakterizující vliv vnitřního ozáření :

Úvazek ekvivalentní dávky a úvazek efektivní dávky [Sv] : Jsou to časové integrály příkonu ekvivalentní resp. efektivní dávky od okamžiku příjmu radionuklidu po dobu τ , přičemž se bere hodnota $\tau=50$ roků pro příjem radionuklidu u dospělých a $\tau=70$ roků pro děti do 1 roku.

Dále jsou definovány veličiny umožňující kvantifikovat vliv ozáření celé populace. V [30] jsou definovány kolektivní dávky pro každou příslušnou dávku (ekvivalentní, efektivní, případně jejich úvazků) jako součet této dávky přes všechny exponované jedince. Definují se tedy následující veličiny vyjadřované v jednotkách [Sv]:

- kolektivní ekvivalentní dávka
- kolektivní efektivní dávka
- úvazek kolektivní ekvivalentní dávky
- úvazek kolektivní efektivní dávky

Do programu vstupují data o obyvatelstvu ve formě třírozměrného pole $OBYV(k,a,i)$ (viz popis vstupů v uživatelském manuálu systému NORMAL), které vyjadřuje počet obyvatel věkové skupiny a v jednotlivých segmentech (i,k) zvolené polární výpočtové sítě (i je index radiální vzdálenosti, k značí úhlový sektor totožný se směrem pohybu vlečky škodlivin). Pro výpočet kolektivních dávek KDE je pak užito následujícího schématu reflektujícího zvolenou diskrétní síť:

$$KDE^{o,a} = \sum_i \sum_k H_{i,k}^{o,a} \cdot N_{i,k}^a \quad (4.3)$$

$N_{i,k}^a$ počet jedinců z věkové skupiny a trvale pobývajících v oblasti mezikruhové výšeče (i,k)

$H_{i,k}^{o,a}$ příslušná dávka záření (střední na výšeči (i,k)) na jedince věkové skupiny a .

Pro vyjádření déletrvající časově proměnné expozice se výsledné dávky počítají jako časový integrál příkonu dávky podle schématu:

$$H^o(T) = \int_{t_0}^{t_0+T} \dot{H}^o(t) \cdot dt \quad (4.4)$$

$H^o(T)$... celková dávka obdržená za čas T [Sv]

$\dot{H}^o(t)$... dávkový příkon [Sv/s]

t_0 ... počátek expozice [s]

T ... uvažovaná doba trvání expozice [s]

4.2 Radiční zátěž v důsledku různých cest ozáření

Hodnoty dávek záření na orgán nebo tkáň o jedince z věkové skupiny a je dán součtem dávek od uvažovaných nuklidů n realizovaných různými možnými cestami ozáření p . K jejich vyjádření se obecně používá schéma:

$$H^{o,a}(T;x,y) = \sum_p \sum_n H_p^{a,n,o}(T;x,y) \quad (4.5)$$

Kolektivní dávky se pak následně určují podle:

$$KDE^{o,a}(T;x,y) = H^{o,a}(T;x,y) \cdot N^a(x,y) \quad (4.6)$$

Zde $N^a(x,y)$ značí počet osob věkové skupiny a žijících celou dobu T kolem místa (x,y) . Celkové hodnoty kolektivních dávek pro celou populaci žijící kolem jaderné

elektrárny se pak určují součtem hodnot kolektivních dávek z jednotlivých dílčích oblastí podle (4.3).

Předkládaná verze systému NORMAL aplikuje myšlenku rozlišení dávek na potenciální a očekávané, zavedené v systému RODOS. Potenciální dávky jsou určovány za konzervativních předpokladů “maximálně nepříznivého” působení kontaminovaného prostředí na populaci. Například jedinec setrvává jen v místě x , a to celou dobu venku na otevřeném prostranství. Ve skutečnosti hraje roli celá řada přirozených bariér podílejících se na snižování úrovně obdržených dávek. Přitom se samozřejmě nejedná o cílené akce vedené člověkem mající charakter protiopatření.

Podrobnější rozbor je např. v [31]. Zde jsou zavedeny lokační faktory definované jako poměr střední hodnoty dávky obdržené v dané skutečné konfiguraci lokality k plné dávce na otevřeném prostranství (tedy bez jakéhokoliv vlivu stínících či filtračních struktur). V této definici je zahrnut i efekt “přítomnosti” v daném místě, který vyjadřuje frakci času stráveného v daném místě (konfiguraci) a nazveme jej faktorem setrvání (occupancy factor). Uvažuje se jeho zjednodušení na frakci času, kterou lidé stráví uvnitř budov. Výsledný lokační faktor se pak získá korekcí původní hodnoty pro setrvání 100 % hodnotou odhadnutého faktoru setrvání. V [31] jsou uvedeny odhady faktorů setrvání pro Německo a Velkou Británii, které se pohybují od 75% do 88% (v zimě jsou hodnoty vyšší). Střední hodnota pro svět jako celek se udává 80%.

V následujícím textu jsou pro některé cesty ozáření zaváděny lokační faktory, přičemž potenciální maximální dávky se dostanou, jestliže se tyto faktory položí rovny jedné. V systému NORMAL jsou zabudovány implicitní (default) hodnoty, které je ale možno měnit interaktivně ze vstupních panelů. Je možno provést jejich bližší rozlišení pro město a venkov, jakož i pro jednotlivé věkové skupiny.

Dále přistoupíme ke konkrétnímu vyjádření pro hodnocení radiační zátěže v termínech přijaté diskretní prostorové sítě. Je uvažováno pět možných mechanismů (cest) ozáření osob:

- Zevní ozáření z radioaktivního oblaku (fotony a β -záření)
- Zevní ozáření od kontaminovaného zemského povrchu (fotony a β -záření)
- Vnitřní ozáření při inhalaci kontaminovaného vzduchu při průchodu oblaku
- Vnitřní ozáření v důsledku dlouhodobé inhalace vzduchu kontaminovaného v důsledku resuspense usazených radionuklidů
- Vnitřní ozáření z ingesce potravinových produktů kontaminovaných atmosférickým spadem

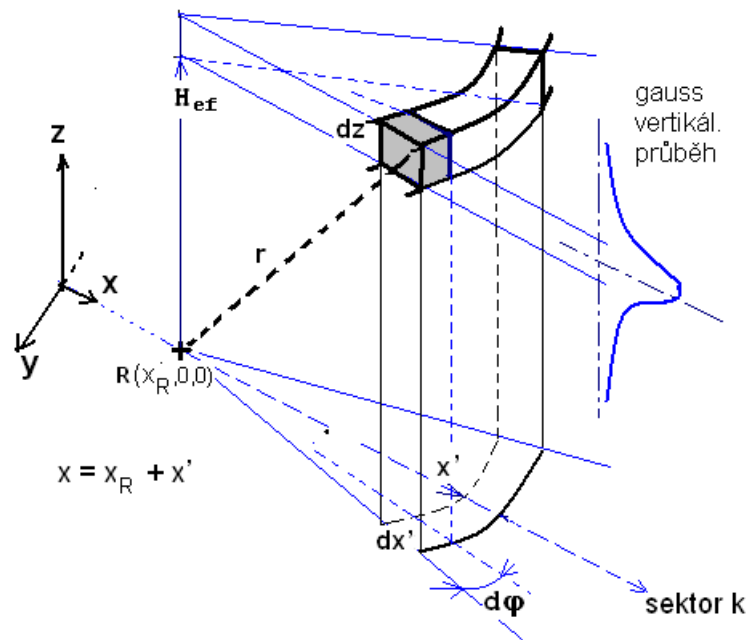
a) Zevní ozáření z oblaku:

Výpočet dávky od externího ozáření fotony z radioaktivního oblaku postupuje obecně ve dvou krocích. V prvním kroku se počítá absorbovaná dávka ve vzduchu, a ve druhém se pak provádí konverze této hodnoty na dávku na orgány či tkáň podle ICRP doporučení. Absorbovanou dávku ve vzduchu ve větších vzdálenostech od zdroje výpustí je možno s dostatečnou přesností určovat na základě polonekonečného modelu radioaktivního mraku, kdy se předpokládá homogenní rozdělení koncentrace radionuklidů v mezní vrstvě atmosféry. Dávkový příkon (přesněji jeho střední hodnota po \underline{y}) v $[\text{Sv}\cdot\text{s}^{-1}]$ v segmentu sektoru \underline{k} ve vzdálenosti \underline{x} se potom určuje podle:

$$\dot{H}_{oblak}^{n,o,k}(x) = A^n \cdot \bar{\chi}_k^n(x) \cdot R_{oblak}^{n,o} \quad (4.7a)$$

- $\dot{H}_{oblak}^{n,o,k}(x)$ dávkový příkon [Sv/s]
- A^n intenzita kontinuálního zdroje radionuklidu n [Bq/s]
- $\bar{\chi}_k^n(x)$ dlouhodobý faktor zředění přízemní objemové aktivity nuklidu n
v sektoru k a ve vzdálenosti x [$s \cdot m^{-3}$] - viz vztah (3.6b), resp. ekviv. vztah pro BOX model
- $R_{oblak}^{n,o}$ dávkový faktor pro ozáření z oblaku od nuklidu n na orgán o
[$Sv \cdot m^3 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$] (tabelován v [16])

Pro menší vzdálenosti od zdroje může dojít k situaci, kdy disperze oblaku bude menší resp. srovnatelná se střední volnou dráhou μ^{-1} (μ je energeticky závislý lineární koeficient absorpce γ -záření ve vzduchu). V závislosti na energii fotonu může jít o hodnoty desítky až stovky metrů. V blízkých vzdálenostech od zdroje znečištění při únicích s efektivní výškou h_{ef} výrazněji převyšující okolní terén může dojít k situaci, kdy disperze bude menší (nebo dokonce mnohem menší), než je h_{ef} . Vypouštěná aktivita bude dosud soustředěna hlavně kolem osy vlečky ve výšce h_{ef} , přičemž vzhledem k malé vertikální disperzi se vlečka zatím ani nemusela dotknout terénu (třeba na úrovni $3\sigma_z$). Je zřejmé, že odhad zevního ozáření z mraku s použitím vztahu (4.7a) pro polonekonečný oblak by situaci výrazně podcenil.



Obrázek 4.1 Schéma k určení příspěvku elementárního objemu mraku $dV = x' dx' d\phi dz$ k zevnímu ozáření v místě receptoru R .

Proto pro blízké vzdálenosti od zdroje znečištění přejdeme k modelu konečného mraku. Dávkový příkon $\dot{H}(x_R, 0, 0)$ v [$Gy \cdot s^{-1}$] absorbovaný v tkáni v místě receptoru $R(x_R, 0, 0)$ od

radioaktivního mraku postupujícího nad terénem v efektivní výšce h_{ef} je dán integrací přes všechny elementární objemy $dV=x'.dx'.d\varphi'.dz$ podle:

$$\dot{H}(x_R,0,0)=\frac{K \cdot \mu_a \cdot E_\gamma}{\rho} \iiint_{(V)} \frac{B(E_\gamma, \mu r) \cdot \exp(-\mu r) \cdot C(x_R + x'; z)}{4\pi |\vec{r}|^2} \cdot x'.dx'.d\varphi'.dz \quad (4.7b)$$

C je měrná aktivita ve vzduchu; E_γ značí energii záření; μ je lineární koeficient zeslabení ve vzduchu a μ_a je koeficient absorpce energie ve vzduchu (oba jsou závislé na E_γ); ρ označuje hustotu vzduchu; r je vzdálenost elementárního objemu mraku dV od receptoru R ; dávkový koeficient K je vyjádřen v $[\text{Gy} \cdot \text{kg} \cdot \text{MeV}^{-1}]$. Koeficient nakupení $B(E_\gamma, \mu r)$ spolu s dalšími číselnými hodnotami uvádíme pro konkrétní výpočty v [8].

Obecné schéma (4.7b) budeme dále konkretizovat pro případ dlouhodobého provozu jaderného zařízení. Uvažujme Gaussovu rovnici šíření (2.3). Středováním po úhlovém sektoru o velikosti $2\pi/\text{IPS1}$ radiánů ($\text{IPS1}=16$ je počet sektorů větrné růžice) v analogii s rovnicí (3.3) a s využitím (3.4) dostáváme již zmíněné „semiboxové“ řešení v proměnných (x,z) :

$$\bar{C}^n(x,z) = \frac{\overset{n}{A}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_z(x) \cdot u_{10}} \frac{\text{IPS1}}{x \cdot 2\pi} \times \left[\exp\left(-\frac{(z-h_{ef})^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h_{ef})^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) + \eta_{JV}(z) \right] \cdot f_R^n(x) \cdot f_F^n(x) \cdot f_W^n(x)$$

Dlouhodobou koncentraci aktivity ve vzduchu $\bar{C}_k^n(x,z)$ v $[\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}]$ středovanou v sektoru k popíšeme obdobně jako v rovnici (3.6a) vztahem:

$$\bar{C}_k^n(x,z) = \overset{n}{A} \cdot \frac{\text{IPS1}}{\sqrt{2\pi} \cdot x} \sum_j \sigma_{y,j}(x) \sum_m \sum_s \sum_{g=0}^{\text{INV}} \left\{ \frac{\Psi_{k,j,m}^g(x,z)}{u_{k,j,m}} \cdot \text{QIGM}(k,j,m) \times \right. \\ \left. \times f_R^n(x;k,j,m) \cdot f_F^n(x;k,j,m) \cdot f_W^n(x;k,j,m,s) \cdot PS(s) \cdot PIN(g) \right\} \quad (4.7c)$$

Význam jednotlivých komponent a indexů je stejný jako u (3.6a), normovanou osovou aktivitu vyjádříme podle:

$$\Psi_{k,j,m}^g(x,z) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_{y,j}(x) \cdot \sigma_{z,j}(x)} \times \left[\exp\left(-\frac{(z-h_{ef})^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h_{ef})^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) + \eta_{JV}(z) \right]$$

Dále, příspěvky koncentrací aktivity v $[\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}]$ v uzlu x_R ve směru úhlového sektoru k od jednotlivých povětrnostních epizod (k,j,m,s,g) vážených jejich pravděpodobnostmi (podrobně definice u rovnice (3.6a)) označíme jako :

$$\Delta EPI_k^n(x_R, z; k, j, m, s, g) \quad (4.7d)$$

Na dlouhodobé koncentrace aktivity radionuklidu n ve vzduchu $\bar{C}_k^n(x,z)$ z výrazu (4.7c) lze pak pohlížet jako na sumu příspěvků těchto dílčích povětrnostních epizod podle schématu:

$$\bar{C}_k^n(x_R, z) = \sum_{(k,j,m,s,g)} \Delta EPI_k^n(x_R, z; k, j, m, s, g) \quad (4.7e)$$

Zevní ozáření z mraku bude dáno součtem dílčích dávek od jednotlivých epizod vážených jejich dlouhodobými statistikami (pro konkrétní výpočty podrobněji v [8]). Uvažujme určitou konkrétní dílčí epizodu $\Delta EPI_k^n(k, j, m, s, g)$. Pro její průběh platí všechny doposud učiněné závěry. Jde tedy o původně gaussovský průběh vystředovaný po úhlových sektorech, což vede ke zmíněnému semi-boxovému přiblížení. To lze ilustrovat podle obrázku 4.1, kdy koncentrace aktivity ve vodorovném směru má lokálně tvar určité „desky“ nad terénem s gaussovským průběhem ve vertikálním směru, což dobře konvenuje se zkušeností s rozložením koncentrací v periferním směru při normálním provozu. Koncentrace $\bar{C}_k^n(x_R, z)$ v diferenciálním prstenci $2\pi \cdot x' \cdot dx' \cdot dz$ je rovna středované hodnotě v daném sektoru (vztažena k výpočtovému uzlu x_R) a diferenciální příspěvek k dávkovému příkonu v bodě receptoru R od zevního ozáření z uvažovaného prstence je:

$$d\dot{H}^n(x_R, 0, 0) \Big|_{(k,j,m,s,g)} = \frac{K \cdot \mu_a \cdot E_\gamma \cdot B(E_\gamma, \mu r) \cdot \exp(-\mu|\vec{r}|) \cdot \Delta EPI_k^n(x_R, z; k, j, m, s, g)}{\rho \cdot 4\pi |\vec{r}|^2} \cdot 2\pi \cdot x' \cdot dx' \cdot dz \quad (4.7f)$$

Integrací předchozí rovnice přes (x', z) pro celou vrstvu podle obrázku 4.1 dostaneme:

$$\Delta \dot{H}^n(x_R, 0, 0) \Big|_{(k,j,m,s,g)} = \frac{K \cdot \mu_a \cdot E_\gamma}{\rho} \times INTEG \quad (4.7g)$$

$$INTEG = \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{B(E_\gamma, \mu r) \cdot \Delta EPI_k^n(x_R, z; k, j, m, s, g) \exp(-\mu|\vec{r}|)}{4\pi |\vec{r}|^2} \cdot 2\pi \cdot x' \cdot dx' \cdot dz \quad (4.7h)$$

kde $|\vec{r}|^2 = (x')^2 + z^2$. Integrál INTEG je počítán numericky Gaussovou kvadraturou.

V [8] uvádíme příklad aplikace nové verze NORMAL 2010 na plynné vypuštění z JE Temelín za rok 2008. Je zpracováno celkem 60 480 epizod povětrnostní situace a ilustrovány histogramy dílčích příspěvků podle (4.7d). Současně jsou v jednotlivých vzdálenostech od zdroje počítány střední a minimální hodnoty vertikálních disperzních koeficientů pro jednotlivé ΔEPI . Ukazuje se, že v blízkých vzdálenostech od zdroje jsou tyto hodnoty několikanásobně menší než výška zdroje $h=100$ m. Znamená to, že model polonekonečného mraku (4.7a) bude podhodnocovat odhady ozáření z mraku. Nicméně v [8] je testována idea zavedení korekčního faktoru na konečný rozměr mraku, která by umožnila realistické odhady ozáření pomocí modelu polonekonečného mraku s následující korekcí na konečný rozměr. Nejdříve poznamenejme, že v předchozí verzi NORMAL bylo možno počítat dávku z mraku konzervativně pro polonekonečný model mraku podle :

$$\dot{H}_{oblak}^{a,n,o,k}(x) = A^n \cdot \bar{\chi}_k^n(x; z_{ref}) \cdot R_{oblak}^{n,o} \quad (4.7i)$$

Jedná se o modifikaci základního vztahu (4.7a), kdy z_{ref} vztáhneme ke koncentraci aktivity v ose mraku (tedy výšce h_{ef} nad terénem). Je zřejmé, že takto dojde ke konzervativnímu odhadu pro bližší vzdálenosti od zdroje. Přitom takový rychlý odhad je

vždy konzervativní. Pokud jsou překročeny limity, je nutné zpřesnit odhad výše uvedeným postupem podle (4.7g). V takových případech se však nabízí také možnost korigovat dávku počítanou pro polonekonečný mrak faktorem korigujícím tuto maximální hodnotu na konečný rozměr podle závislosti (v místě receptoru x_R nebo obecněji v libovolném výpočtovém uzlu x_L pod osou mraku, $L=1, \dots, 35$):

$$\Delta \dot{H}^n(x_L, 0, 0) \Big|_{(k,j,m,s,g)} = CF(\sigma_z(x_L), H / \sigma_z(x_L)) \times \Delta \dot{H}_\infty^n(x_L, 0, z = z_{ref}) \Big|_{(k,j,m,s,g)} \quad (4.7j)$$

Kde $\Delta \dot{H}_\infty^n$ je dávka zevního ozáření z mraku vypočítaná pomocí konverzních faktorů pro polonekonečný mrak. S přihlédnutím k (4.7g) a k závislosti funkce $\Psi_{k,j,m}^g(x, z)$ ze vztahu (4.7c) na σ_z příslušné dané epizodě formulujeme intuitivně zmíněný korekční faktor CF jako:

$$CF(\sigma_z(x_L), H / \sigma_z(x_L)) = \frac{INTEG(h_{ef} = h, \sigma_{z,j}(x_L))}{INTEG(h_{ef} = 0, \sigma_{z,j}(x_L))} \quad (4.7k)$$

kde h je výška zdroje. Předchozí formulaci korekčního faktoru podporuje fyzikální hledisko, kdy $INTEG(h_{ef} = 0, \sigma_{z,j}(x_L))$ reprezentuje přízemní transport, kdy „gaussovská deska“ klesne na povrch, a tento útvar může být chápán jako 2-D nekonečný vzhledem k receptoru. Numerické výsledky podle NORMAL verze 2010 pro plynné vypusti z JE Temelín za rok 2008 jsou v [8].

Konečně přistoupíme ke konstrukci dlouhodobé dávky ozáření z radioaktivního mraku. Hledáme veličinu $H_{obлак}^{n,o,k}(T; x)$ vyjádřenou v [Sv] představující celkovou dávku od radionuklidu n za dobu T na tkáň o jedince, který pobývá celou dobu T v segmentu sektoru k ve vzdálenosti x (přesněji střední hodnota této dávky po y). Je zřejmé, že v případě idealizovaných dlouhodobých stacionárních výpustí veličina dávkového příkonu (vychází z vážených koncentrací epizod) představuje časově konstantní hodnotu a pak tedy hodnota příslušné dávky z ozáření radionuklidem n za dobu T je dána (s využitím (4.4)) alternativními výrazy:

- 1) V případech, že lze použít polonekonečný model mraku (při vertikální homogenizaci, kdy přízemní koncentrace znečištění se blíží k osově koncentraci znečištění v efektivní výšce):

$$H_{obлак}^{n,o,k}(T; x) = T \times R_{obлак}^{n,o} \times \sum_{(k,j,m,s,g)} \Delta EPI_k^n(x_R, z; k, j, m, s, g) \quad (4.7m1)$$

- 2) Obecná integrační formule použitelná i v blízkých vzdálenostech od zdroje, kdy s využitím vztahu (4.7f) dostáváme:

$$H_{obлак}^{n,o,k}(T; x) = T \times \sum_{(k,j,m,s,g)} \Delta \dot{H}^n(x, 0, 0) \Big|_{(k,j,m,s,g)} \quad (4.7m2)$$

- 3) Vždy konzervativní odhad (může značně nadhodnotit dávky v blízkosti zdroje, při vertikální homogenizaci koncentrace znečištění ve větších vzdálenostech od zdroje se blíží k odhadům podle (4.7m1)). Je použit konverzní faktor pro polonekonečný model, ale konzervativně se bere koncentrace aktivity v referenční výšce $z_{ref} = h_{ef}$:

$$H_{oblak}^{n,o,k}(T; x, z_{ref} = h_{ef}) = T \times R_{oblak}^{n,o} \times \sum_{(k,j,m,s,g)} \Delta EPI_k^n(x_R, z = z_{ref} = h_{ef}; k, j, m, s, g) \quad (4.7m3)$$

4) Předchozí konzervativní odhad pro blízké vzdálenosti lze zmírnit korekčním faktorem (4.7k) podle:

$$H_{oblak}^{n,o,k}(T; x) = H_{oblak}^{n,o,k}(T; x, z_{ref} = h_{ef}) \times CF(\sigma_z(x_L), H / \sigma_z(x_L)) \quad (4.7m4)$$

Celková dávka od grupy uniklých nuklidů se pak vypočte sumací:

$$H_{oblak}^{o,k}(T; x) = \sum_{(n)} H_{oblak}^{n,o,k}(T; x, z) \quad (4.7n)$$

Výhodou používání modelu polonekonečného zdroje je ten fakt, že jsou k dispozici obecně přijímané a ověřené konverzní koeficienty $R_{oblak}^{n,o}$, které v sobě zahrnují skutečné energetické spektrum γ -kvant uvažovaného nuklidu n s následným přesným zahrnutím koeficientu nakupení. Z tohoto hlediska i veličina $d\dot{H}(x_R, 0, 0)_{(k,j,m,s,g)}^n$ ze vztahů (4.7g) a (4.7h) by měla uvažovat skutečné energetické závislosti γ -kvant nuklidu n . Tento problém je zmíněn v [8] v souvislosti s modelem tzv. efektivních energií.

Poznámka k β -ozáření:

Vzhledem k silné absorpci β -záření v tkáních je ve shodě s programem PC CREAM zaměřena pozornost pro případ vnějšího ozáření na jeho účinky na kůži. V programu NORMAL je vliv β -záření zahrnut přibližným způsobem, kdy konverzní faktor $R_{oblak}^{n,o}$ pro kůži (tzn. $o = 7$) je příslušně zvětšen. V nové verzi je zabudován přesnější způsob, založený na použití polonekonečného modelu radioaktivního mraku, kdy vzhledem k malému doběhu β -částic ve vzduchu (maximálně několik málo metrů) může být jako řídicí veličina použita přízemní objemová aktivita nuklidu ve sledovaném místě. Z literatury [22] byla převzata tabulka konverzních faktorů pro nejdůležitější radionuklidy, která umožňuje vypočítat roční normalizovaný (t. zn. pro jednotkovou přízemní koncentraci) dávkový příkon od β -záření pro jednotlivé radionuklidy. Roční hodnota dávky na kůži [Sv.rok^{-1}] je pak dána vztahem:

$$H_{oblak}^{\beta,n}(T = rok; x) = A^n \cdot \bar{\chi}_k^n(x) \cdot R_{oblak}^{\beta,n} \quad (4.7o)$$

Tabulka hodnot koeficientů $R_{oblak}^{\beta,n}$ [$\text{Sv.rok}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{m}^3$] převzatá z [22] je uvedena v uživatelském manuálu. Doposud nejsou k dispozici hodnoty s rozlišením podle věkových kategorií.

Vztah (4.7b) se pro případ očekávaných dávek přenásobuje lokačním faktorem L_{oblak} , který vyjadřuje vliv zmírnění radiačního zatížení v důsledku reálného modelu pobytu člověka uvnitř budov, kterým je jednak stínící efekt stěn a stropu a dále i možná interní filtrace vzduchu. V [22] jsou uváděny následující hodnoty stínících faktorů budov:

rodinné domky : 0.2
vícepodlažní budovy : 0.07

Korekci těchto hodnot doporučeným faktorem setrvání (0.8) lze vypočítat příslušnou hodnotu L_{oblak} a zadat ji k výpočtu vyplněním na příslušném vstupním panelu.

b) Zevní ozáření od zemského povrchu kontaminovaného suchým a mokřým spadem:

Dávkový příkon v $[Sv \cdot s^{-1}]$ v určitém časovém okamžiku t na orgán o jedince z kategorie a od radionuklidu n ve vzdálenosti x od zdroje výпустí a ve směru sektoru k se určuje podle vztahu:

$$\dot{H}_{povrch}^{a,n,o,k}(t;x) = \dot{A}^n \cdot \left[\bar{F}_k^n(x) + \bar{W}_k^n(x) \right] \cdot K^n(t) \cdot R_{povrch}^{n,o} \quad (4.8a)$$

$\bar{F}_k^n(x)$ dlouhodobý faktor suchého spadu radionuklidu n ve vzdálenosti x sektoru ve směru větru k v $[m^{-2}]$ - viz vztah (3.15)

$\bar{W}_k^n(x)$ dlouhodobý faktor vymývání radionuklidu n atmosférickými srážkami ve vzdálenosti x a ve směru sektoru k v $[m^{-2}]$ - viz vztah (3.20)

$R_{povrch}^{n,o}$ tabelovaný [16] dávkový faktor ozáření od kontaminovaného povrchu pro nuklid n a orgán o $[Sv \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}]$

Tvar výrazu $K^n(t)$ plyne z řešení (3.24) bilanční rovnice a má tvar:

$$K^n(t) = \frac{1 - \exp(-\lambda_{ef}^n \cdot t)}{\lambda_{ef}^n}$$

Hodnota příslušné dávky za dobu T je dána (opět s využitím (4.4)) výrazem:

$$\begin{aligned} H_{povrch}^{a,n,o,k}(T;x) &= \dot{A}^n \cdot \left[\bar{F}_k^n(x) + \bar{W}_k^n(x) \right] R_{povrch}^{n,o} \cdot \int K^n(t) \cdot dt = \\ &= \dot{A}^n \cdot \left[\bar{F}_k^n(x) + \bar{W}_k^n(x) \right] R_{povrch}^{n,o} \cdot \frac{1}{\lambda_{ef}^n} \cdot \left[T + \frac{1}{\lambda_{ef}^n} \cdot (\exp(-\lambda_{ef}^n \cdot T) - 1) \right] \end{aligned} \quad (4.8b)$$

$H_{povrch}^{a,n,o,k}(T;x)$ celková dávka za dobu T od depozice nuklidu n pro tkáň o jedince z věkové kategorie a , který pobývá celou dobu T v segmentu sektoru k ve vzdálenosti x (přesněji střední hodnota této dávky po y) $[Sv]$

Poznámka: Při analýze ozáření od depozice je v systému RODOS zaváděna korekce na odstínění záření v důsledku časové migrace usazovaného radionuklidu do půdy. Časově závislý korekční faktor $Y(t)$ se v [24] uvažuje ve tvaru :

$$Y(t) = a_1 \cdot \exp(-\lambda_{m1} \cdot t) + a_2 \cdot \exp(-\lambda_{m2} \cdot t)$$

Pro migrační konstanty se uvádějí hodnoty:

$$\lambda_{m1} = 1,01 \cdot 10^{-3} [\text{den}^{-1}]; \quad \lambda_{m2} = 0,0 [\text{den}^{-1}];$$

$$a_1 = 0,6; \quad a_2 = 0,5.$$

Tyto migrační konstanty byly odvozeny z měření externího ozáření deponovaného cesia po nehodě v Černobylu. Je zde zohledněno původní usazování jak suchou tak mokrou cestou. Pro jiné nuklidy zatím podobná data nejsou k dispozici, používá se však pro hrubé odhady i pro jiné prvky s dlouhým poločasem rozpadu. V programu NORMAL tento efekt doposud zahrnout není. Jeho použití pro případ mimořádných úniků je popsáno v nové verzi manuálu systému HAVAR-RP.

Poznámka k β -ozáření:

Příspěvek β -ozáření od depozice je obecně považován za malý ve srovnání se složkou od fotonů. Některé kódy (na př. DOSE-MARC) proto příspěvek od β -ozáření neuvažují. Produkt RODOS vzhledem ke svojí orientaci na havarijní problematiku tento efekt zanedbává také a uvažuje jen přímou depozici na kůži a oděvu. V programu NORMAL se β -ozáření od radionuklidů usazených na zemském povrchu také zanedbávalo. V nové verzi však je zabudován postup, který umožňuje prověřit alespoň pro nejdůležitější nuklidy příspěvek od jejich depozice. Je převzata metodologie z [22], kde jsou uvedeny výsledky výpočtů ročního dávkového příkonu v bazální vrstvě kůže (t. zn. v hloubce 70 μm) pro výšku 1 metr nad zemí. Příslušná tabulka konverzních koeficientů $R_{depo}^{\beta,n}$ [$\text{Sv} \cdot \text{rok}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{m}^2$] pro 9 význačných nuklidů je uvedena v uživatelském manuálu systému NORMAL [7]. Potom kontrola přijaté dávky od β -ozáření [$\text{Sv} \cdot \text{rok}^{-1}$] od deponovaného radionuklidu n se provádí podle vztahu:

$$H_{depo}^{\beta,n}(t_2, x) = \bar{\Omega}^n(t_2, x) \cdot R_{depo}^{\beta,n} \quad (4.8c)$$

$\bar{\Omega}^n(t_2, x)$ je modifikací vztahu (3.24) a představuje hodnotu usazené aktivity radionuklidu n [$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$] na zemském povrchu ve vzdálenosti x od zdroje, a sice střední hodnotu v roce t_2 po zahájení provozu jaderného zařízení. Vzhledem ke kontinuálním výpustím představuje vztah (3.24) monotonní neklesající funkci, a tudíž aproximace hodnotou t_2 představuje pesimistický odhad.

Pro případ očekávaných dávek se vztah (4.8b) přenásobuje lokačním faktorem L_{depo} , který vyjadřuje vliv zmírnění radiačního zatížení v důsledku reálného modelu pobytu člověka v terénu, který by měl zahrnout jednak stínící efekt stěn a stropu a i možnou interní filtraci vzduchu při pobytu uvnitř budov a dále při pobytu na otevřeném prostranství drsnost terénu, stínění okolních budov a stínící efekt půdy v důsledku průniku radionuklidů do půdy při mokřém usazování. V práci [22] je na základě výpočtů podle modelu EXPURT určen rozsah konečného lokačního faktoru mezi 0.1 pro průměrnou zástavbu v obydlených oblastech po 0.01 v betonových vícepodlažních budovách. Zvolenou hodnotu lze opět zadat ze vstupního panelu.

c) Vnitřní ozáření při inhalaci vzduchu obsahujícího radioaktivní příměsi

Dávkový příkon v $[\text{Sv}\cdot\text{s}^{-1}]$ na orgán \underline{o} pro jedince z věkové kategorie \underline{a} vyvolaný radionuklidem \underline{n} ovlivňující orgán skrze mechanismus dýchání tohoto jedince dlouhodobě pobývajících v místě \underline{x} sektoru \underline{k} se určuje podle:

$$\dot{H}_{inh}^{a,n,o,k}(x) = \dot{B}_{inh}^{a,n,k}(x) \cdot R_{inh}^{a,n,o} \quad (4.9)$$

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

$\dot{B}_{inh}^{a,n,k}$ je vteřinový příjem radionuklidu \underline{n} při inhalaci jedince z kat. \underline{a} žijícího v místě \underline{x} sektoru \underline{k} a je dán vztahem:

$$\dot{B}_{inh}^{a,n,k}(x) = A^n \cdot \bar{\chi}_k^n(x) \cdot u_{inh}^a \quad (4.10)$$

Ke dříve definovaným významům zopakujeme:

- A^n intenzita kontinuálního zdroje radionuklidu \underline{n} $[\text{Bq/s}]$
- $\bar{\chi}_k^n(x)$ dlouhodobý faktor zředění přízemní objemové aktivity ovzduší ve směru sektoru \underline{k} a ve vzdál. \underline{x} od zdroje výpustí (pro nuklid \underline{n}) - viz vztah (3.6b)
- u_{inh}^a tabelovaná rychlost dýchání jedince věkové kategorie \underline{a} $[\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$

Stejně jako v případě ozáření z mraku je zřejmé, že v případě idealizovaných dlouhodobých stacionárních výpustí veličina (4.9) představuje časově konstantní hodnotu a pak tedy hodnota příslušného úvazku (50-ti či 70-ti letého) v $[\text{Sv}]$ od příjmu radionuklidu \underline{n} po dobu T (obvykle se bere 1 rok) je dána (s využitím (4.4)) výrazem:

$$H_{inh}^{a,n,o,k}(T;x) = \dot{B}_{inh}^{a,n,k}(x) \cdot R_{inh}^{a,n,o} \cdot T \quad (4.11)$$

Je zřejmé, že se jedná o konzervativní odhad, který předpokládá, že jedinec žije v místě \underline{x} po celou uvažovanou dobu T .

Očekávané dávky se získají přenásobením vztahu (4.11) lokačním faktorem L_{inh} , který vyjadřuje vliv zmírnění radiačního zatížení v důsledku reálného modelu pobytu člověka v dané lokalitě. Týká se pobytu uvnitř budov a zahrnuje jednak faktor setrvání, možnou interní filtraci vzduchu a případně i ochuzování škodlivin uvnitř uzavřeného prostoru usazováním. V [31] jsou shrnuty v literatuře citované hodnoty. Ty jsou rozlišovány jednak podle fyzikálně chemické formy a dále podle typu budov (privátní domy, velké budovy). L_{inh} se zde udává v rozmezí 0.3 až 1.0 při faktoru setrvání 1.0.

d) Vnitřní ozáření v důsledku inhalace vzduchu kontaminovaného resuspenzí deponovaných radionuklidů

Vlivem atmosférického proudění nebo činností člověka (zviřování vzduchu v důsledku dopravní činnosti, výkopových a stavebních prací či zemědělské činnosti) dochází ke zpětnému přenosu radionuklidů usazených na zemském povrchu do přízemní vrstvy vzduchu. Je zřejmé, že lidská činnost je silně lokálně vázaná, a tedy i jí vyvolaná resuspenze závisí na konkrétní lidské aktivitě v jednotlivých oblastech. Globálnější charakter z hlediska polohy i času má resuspenze v důsledku interakce větru se zemským povrchem, které byla v celé řadě prací věnována pozornost s cílem kvantifikovat tento efekt z hlediska další dodatečné radiační zátěže, které je jedinec vystaven. Dále bude uveden všeobecně přijímaný způsob zahrnutí vlivu resuspenze v důsledku atmosférického působení.

Pro kvantitativní vyjádření využijeme výsledků obsáhlé rešerše o fenoménu resuspenze, který je podán v [22]. Pro určitý radionuklid n se dodatečná přízemní objemová aktivita vyvolaná resuspenzí vyjadřuje v závislosti na usazené aktivitě pomocí faktoru resuspenze k [m^{-1}] jako:

$$k(t,x) = \frac{\text{Koncentrace ve vzduchu v důsledku resuspenze v místě } x \text{ a čase } t \text{ [Bq } \cdot \text{ m}^{-3} \text{]}}{\text{Okamžitá depozice v daném místě a čase [Bq } \cdot \text{ m}^{-2} \text{]}}$$

neboli při vyjádření pomocí dlouhodobých veličin lze tuto dodatečnou aktivitu v přízemní vrstvě vzduchu vyjádřit jako:

$$\bar{C}_{RES}^n(t,x) = \bar{\Omega}^n(t,x) \cdot k(t,x) \quad (4.12)$$

kde postupujeme v souladu se značením ze vztahu (3.24). Pro koeficient resuspenze použijeme výraz, který je v [22] označován jako vhodný pro lidskou činností nenarušovaný zemský povrch přírodního prostředí severní části Evropy. Tento empirický model je značným zjednodušením složitějšího jevu resuspenze, nicméně jeho validací (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 dlouhodobých dávek.

Model koeficientu resuspenze je založen na předpokladu jeho časové závislosti jako funkce $1/t$, přičemž maximální hodnota tohoto koeficientu podložená experimenty je $1,2 \cdot 10^{-6}$ [m^{-1}]. Je obecně přijat vztah:

$$k(T) = 1,2 \cdot 10^{-6} \cdot T^{-1} \quad (4.13)$$

kde T je čas ve dnech po depozici.

Pro případy havarijních úniků se v práci [25] používá empiricky odvozený vzorec pro $K^n(T)$ s exponenciálním poklesem až ke zbytkové hodnotě odpovídající $T \rightarrow \infty$. Obdobně je tomu v práci [24] s exponenciálním poklesem $k(T)$ pro časovou a střední fázi až ke konstantní ustálené hodnotě ve fázi pozdní.

Pro kontinuální usazování $1 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, které se děje po dobu jednoho roku, lze integrální resuspendovanou aktivitu ve vzduchu za čas t_2 vyjádřit vztahem :

$$I_{RES} = 8.64 \cdot 10^4 \cdot \sum_{t1=1}^{t1=365} \int_1^{t2-t1} k(t) \cdot dt \quad (4.14)$$

I_{RES} má rozměr [Bq.m⁻³.s]. Pro velký časový interval ($t2$ je řádově několik roků) lze použít zjednodušený výraz :

$$I_{RES}(t2) = 3.15 \cdot 10^7 \cdot \int_1^{t2} k(t) \cdot dt \quad (4.15)$$

Pro konkrétní radionuklid s rozpadovou konstantou λ^n je pak časová závislost koeficientu resuspenze vyjádřena podle:

$$k^n(T) = 1,2 \cdot 10^{-6} \cdot T^{-1} \cdot \exp(-\lambda^n \cdot T) \quad (4.16)$$

Dosazením do vztahu pro I_{RES} však dostáváme integrál, který nemá exaktní řešení a je určován numericky.

Potom úvazek dávky od ročního usazování radionuklidu způsobené inhalací vzduchu znečištěného resuspenzí, vyvolaný pobytem jedince v místě x po dobu $t2$ je dán podle:

$$H_{inh,RES}^{a,n,o,k}(t2;x) = \bar{S}_k^n(x) \cdot I_{RES}(t2,x) \cdot u_{inh}^a \cdot R_{inh}^{a,n,o} \quad (4.17)$$

Člen S značí rychlost kontinuálního usazování radionuklidu danou vztahem (3.21).

Zůstávají otevřené otázky kolem odhadů dávkových úvazků z resuspenze. Existuje dosud nedostatečné množství reliabilních experimentálních podkladů, které by umožnily odpovědi například na závislost na velikosti pŕdních částeček, na nichž se váže aktivita, na důležitost zpětné resuspenze na svrchní části rostlin a s následným transportem aktivity přes potravní řetězce nebo na možnou diferenci resuspenzního procesu mezi jednotlivými prvky. Pokud se týká poslední otázky, například i v nejnovější verzi produktu PC CREAM z roku 2008 se konstatuje, že dosud nejsou žádné indikace o závislosti koeficientu resuspenze na prvcích. Zdá se, že z fyzikálně-chemických vlastností by zde mohl být určitý vliv. Nicméně, vzhledem k velkým neurčitostem v experimentech žádná závislost na prvku nebyla prokázána. Jistým pokusem o spekulativní zavedení alespoň nějakého vlivu jsou „koeficienty obohacení“ (resuspension enrichment factors - závislost na typu půdy, mobilitě prvku apod.). V produktu RODOS se podle tohoto pro Cs a několik dalších prvků zavedl faktor obohacení 3. Současná verze produktu NORMAL ale tyto spekulace nezahrnuje a akceptuje pro všechny nuklidy základní mechanismus vyjádřený vztahem (4.13). Nicméně na tomto místě zdůrazněme, že NORMAL je „živý“ produkt, a tudíž s krátkou odezvou na zabudování nově zjištěných důležitých fakt.

e) **Vnitřní ozáření z ingescce potravinových produktů** kontaminovaných atmosférickým spadem

Úvazek ekvivalentní resp. efektivní dávky v [Sv] na orgán \underline{o} jedince z věkové kat. \underline{a} vyvolaný ročním příjmem nuklidu \underline{n} při ingestci potravinových produktů se určuje podle:

$$H_{ing}^{a,n,o,k}(x) = A_{ing}^{a,n,k}(x) \cdot R_{ing}^{a,n,o} \quad (4.18)$$

$R_{ing}^{a,n,o}$ je tabelovaný dávkový faktor ozáření při ingestci radionuklidu \underline{n} na orgán \underline{o} jedince z věkové kategorie \underline{a} [Sv.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 \underline{a})

$A_{ing}^{a,n,k}(x)$ značí příjem radionuklidu \underline{n} v [Bq] od ingescce kontaminovaných potravinových produktů vypěstovaných v místě \underline{x} sektoru \underline{k} . Obvykle se jedná o roční příjem radionuklidu a pak tedy i dávka podle (4.18) představuje úvazky od ročního příjmu.

O způsobu konzumace kontaminovaných produktů je možno dále spekulovat. Konzervativní model (ve smyslu individuálních dávek) **lokální produkce - lokální spotřeby** předpokládá, že jedinec z věkové skupiny \underline{a} trvale žijící ve vzdálenosti \underline{x} od zdroje vypustí ve směru sektoru \underline{k} konzumuje pouze produkty vypěstované v tomto místě, tedy :

$$A_{ing}^{a,n,k}(x) = \sum_l E_l^{n,k}(x) \cdot P_l^a \quad (4.19)$$

kde P_l^a je roční spotřeba produktu \underline{l} jedincem z \underline{a} a $E_l^{n,k}(x)$ je měrná aktivita radionuklidu \underline{n} v produktu \underline{l} vypěstovaném v místě \underline{x} sektoru \underline{k} [Bq.kg⁻¹]. Jiným modelem spotřeby (realističtější pro některé lokality) je vyjádřen předpokladem **lokální produkce - globální distribuce** potravin. Jednou z jeho variant je předpoklad, že jedinec z věkové skupiny \underline{a} trvale žijící ve vzdálenosti \underline{x} od zdroje vypustí ve směru sektoru \underline{k} konzumuje část Z_l^k produktu \underline{l} ze svojí zóny \underline{k} a zbytek pochází z čistých nekontaminovaných zdrojů. Roční příjem radionuklidu je pak dán vztahem:

$$A_{ing}^{a,n,k}(x) = \sum_l E_l^{n,k}(x) \cdot Z_l^k \cdot P_l^a \quad (4.20)$$

Model globální spotřeby může mít řadu dalších modifikací, na příklad že jedinec z věkové skupiny \underline{a} trvale žijící ve vzdálenosti \underline{x} od zdroje vypustí ve směru sektoru \underline{k} konzumuje část produktu \underline{l} ze svojí zóny \underline{k} , další část tohoto produktu z jiných kontaminovaných zón a případně ještě zbytek produktu z nekontaminovaných oblastí. Potom je potřeba provést důkladnou analýzu způsobu realizace distribuce a spotřeby potravin v konkrétních zónách. Poznamenejme, že následující výpočty jsou prováděny zatím podle lokální spotřeby (4.19), nicméně lze provést studie sensitivity na variace parametrů Z_l^k , a tak odhadovat míru konzervatismu zavlečenou do výpočtů. Pro potřebu výpočtů dopadu mimořádných úniků pomocí systému HAVAR-RP byly již odhadnuty varianty alternativních spotřebních košů (lokální, farmářský, globální, též rakouský), které po určité modifikaci (naladění grupy uvažovaných potravin) jsou k dispozici i pro aplikaci některého z těchto specifických modelů spotřeby do výpočtů pomocí produktu NORMAL.

Programový systém NORMAL byl rozšířen o možnost dynamického modelování transportu radionuklidů potravními řetězci, který představuje transparentní a realistickou cestu hodnocení vlivu ingesce. Vycházelo se z modelu ENCONAN popsaného v [32], který byl metodicky rozvinut a podstatně přepracován. Originální myšlenkou je zavedení principu modelování při kontinuálním dlouhodobém ponoření ekosystému v prostředí kontaminovaném v důsledku rutinního provozu jaderného zařízení (popsáno v následující kapitole 5.2.2). Sumárně platí, že při výpočtech s užitím systému NORMAL lze volit alternativně ze dvou modelů ingesční zátěže:

1. statický model INTERATOMENERGO podle [1]
2. dynamický model podle [32] s rozšířeními popsány zde a v [41, 42].

Oba modely jsou ve stručnosti popsány v následující kapitole 5.

Zahrnutí zpřesněných dávkových faktorů podle [30] pro cesty inhalace a ingesce

V prováděcí vyhlášce [30] Atomového zákona jsou definovány závazné hodnoty konverzních dávkových faktorů pro příjem radionuklidů vdechnutím (inhalací) a požitím (ingescí). Konverzní faktory $R_{inh}^{a,n,o}$ ze vztahu (4.11) pro inhalaci resp. $R_{ing}^{a,n,o}$ ze vztahu (4.18) pro ingesci byly původně přebírané z [1], později z [3]. Nyní jsou do programu NORMAL zahrnuty aktuální doporučení z [30] pro zahrnutí vlivu radionuklidů vstupujících do organismu při inhalaci a ingesci.

Ve vyhlášce [30] jsou uvedeny konverzní faktory pouze pro výpočet úvazku efektivní dávky. Konverzní faktory pro inhalaci jsou uvedeny v závislosti na typu absorpce v plicích (fast, moderate, slow). Do databáze systému NORMAL jsou přeneseny pouze hodnoty, které byly pro jednotlivé nuklidy vybrány po konzultacích s odborníky původně i do programu HAVAR-RP. V případě blíže neidentifikovaných chemických forem nebo vlastností vdechovaného aerosolu jsou uvedeny nejrestriktivnější hodnoty.

Konverzní faktory pro výpočet úvazku ekvivalentní dávky na jednotlivé tkáně či orgány v závislosti na věkové kategorii jsou převzaty z ref. [17] pro gonády, červenou kostní dřeň, plíce, štítnou žlázu a horní část tlustého střeva. Velikost uvažovaných aerosolů byla v souladu s vyhláškou [30] brána 1 μm . Uvažovaná doba pro výpočet úvazku dávky od příjmu radionuklidů je 70 let pro děti do 1 roku (přesně 69 let 9 měsíců), 69 let pro děti 1-2 roky, 65 let pro věkovou skupinu 2-7 let, 60 let pro 7-12 let, 55 let pro věkovou skupinu 12-17 let a 50 let pro dospělé.

Hodnoty těchto konverzních faktorů pro radionuklidy z databáze programu NORMAL jsou uvedeny v tabulkách v příloze 2 uživatelského manuálu [7].

Poznámka: Původní zastaralé koeficienty pro inhalaci resp. ingesci jsou označovány v uživatelském manuálu jako pole $RIN(o,n)$ resp. $RIG(o,n)$. V databázi DBRES.DAT tyto koeficienty zůstaly uvedeny (původně použity k ladění nového přístupu), jsou ale neaktivní.

5. Výpočty dávkové zátěže ingesční cestou

5.1 Statický model INTERATOMENERGO podle [1]

Vzhledem k sezónnímu charakteru výroby potravin jsou hledány úvazky ekvivalentní resp. efektivní dávky od ročního příjmu radionuklidů ingesční cestou. Je použit konzervativní předpoklad, že jedinec žijící v místě \underline{x} sektoru \underline{k} realizuje veškerou svoji roční spotřebu sledovaných potravinových produktů ze zásob vypěstovaných tamtéž. Sleduje se celkem 6 produktů ($l=1, \dots, 6$) :

- l=1 maso;
- l=2 mléčné produkty;
- l=3 pšenice;
- l=4 okurky;
- l=5 zelí;
- l=6 brambory;

Příslušný úvazek ekvivalentní resp. efektivní dávky se počítá podle vztahu (4.18), přičemž roční příjem radionuklidu $A_{ing}^{a,n,k}(x)$ se opět vypočte podle některého ze vzorců (4.19) resp. (4.20). Veličina $E_l^{n,k}(x)$, což je měrná aktivita radionuklidu \underline{n} v produktu \underline{l} vypěstovaném v místě \underline{x} sektoru \underline{k} [$Bq \cdot kg^{-1}$], se určuje pro všechny radionuklidy s výjimkou H3 a C14 pomocí depozice na povrchu v místě \underline{x} , přičemž je doporučena formule:

$$E_l^{n,k}(x) = \bar{A}^n \cdot T \cdot \left[\left(\bar{F}_k^n(x) + 0,2 \cdot \bar{W}_k^n(x) \right) \cdot KN1_l^n + \left(\bar{F}_k^n(x) + \bar{W}_k^n(x) \right) \cdot KN2_l^n \right] \quad (5.1)$$

Zde dlouhodobé faktory suchého spadu a vymývání atmosférickými srážkami jsou určeny vztahy (3.15) a (3.20).

$KN1_l^n$ tabelovaný koeficient hromadění nuklidu \underline{n} v procesu ‘spad - potravinový produkt’

normovaný na výnos produktu \underline{l} [$m^2 \cdot kg^{-1}$ resp. $m^2 \cdot l^{-1}$]

$KN2_l^n$ tabelovaný koeficient hromadění nuklidu \underline{n} v procesu ‘půda - potravinový produkt’ normovaný na výnos produktu \underline{l} [$m^2 \cdot kg^{-1}$ resp. $m^2 \cdot l^{-1}$]

Pro zbývající dva prvky H3 a C14 poznamenejme, že výrazy pro jejich měrnou aktivitu v potravinových produktech se určují pomocí příslušných dlouhodobých koeficientů zředění přízemní objemové aktivity a průměrné vlhkosti vzduchu ve vegetačním období (podrobné vztahy jsou v [1]). Zahnutí specifického chování izotopů C14 a H3 pro případ dynamického modelování je podrobněji popsáno v následující kapitole 5.2.3.

5.2 Dynamické modelování transportu radionuklidů potravními řetězci do lidského organismu

Modernější přístupy k hodnocení radiační zátěže v důsledku vnitřního ozáření cestou ingesce jsou založeny na dynamickém (z hlediska času) modelování transportu radionuklidů v potravních řetězcích. Především je třeba zmínit dva celoevropsky přijímané modely ECOSYS a FARMLAND, které jsou integrovány v mezinárodně užívaných kódech a nejnověji i v celoevropsky koncipovaném projektu RODOS [28]. Modely ECOSYS a FARMLAND řeší dynamiku transportu radionuklidů potravními řetězci na základě obecného kompartmentového modelu pro simultánní popis migrace radionuklidu v půdě, přenosu do rostlin a transportu do zvířecího organismu a pak dále k člověku. Umožňují uplatnit různé scénáře a strategie (již zmíněný lokální model produkce-spotřeba - vše vypěstováno a konzumováno v určitém místě; globální model produkce-spotřeba - bere v úvahu skutečnou zemědělskou a distribuční síť lokality JE, přičemž na konzumaci se podílí celá populace v určitém regionu).

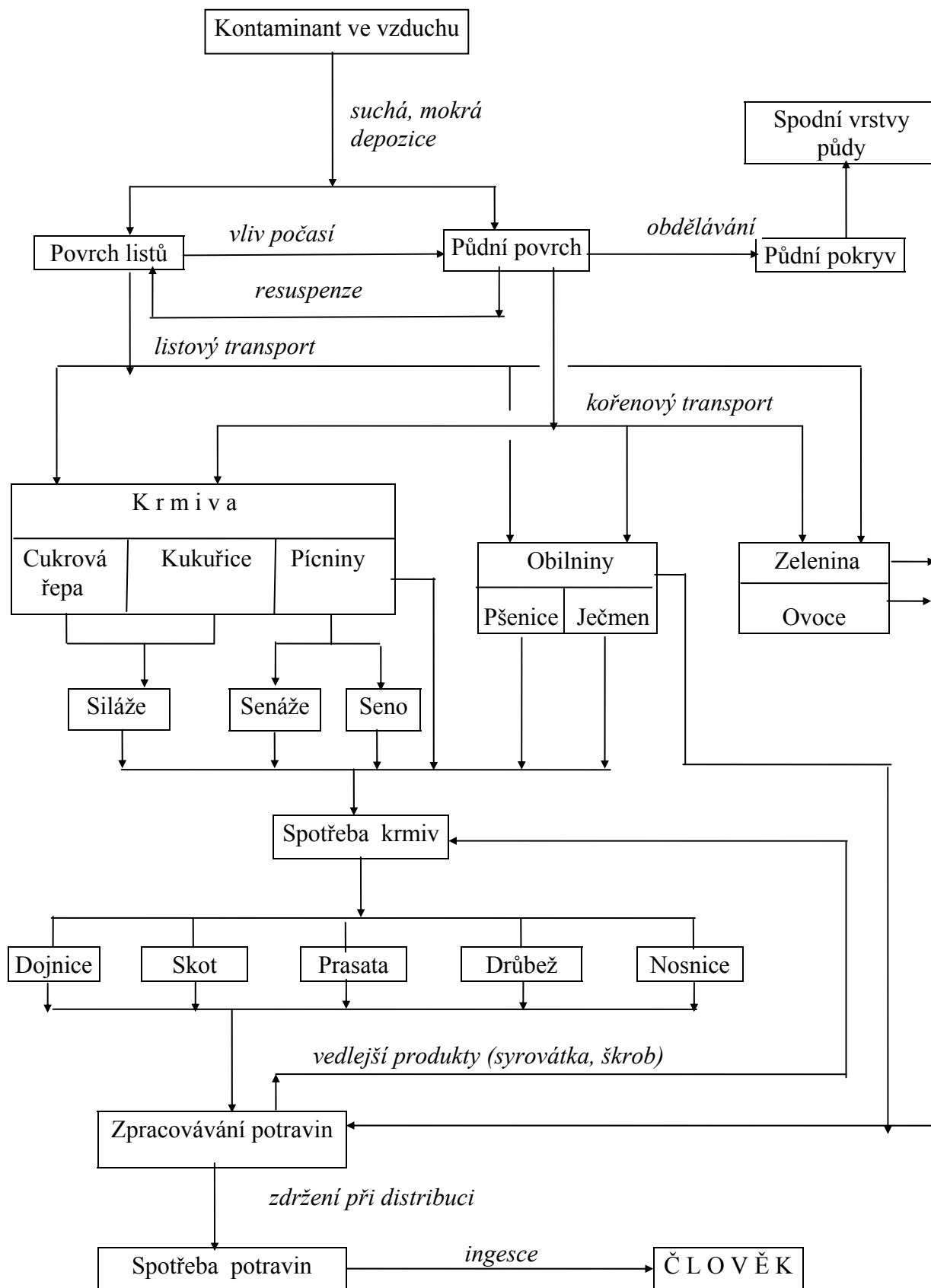
Dynamické modely jsou mimořádně náročné na vstupní data příslušná danému rozdělení na různé radioekologické zóny. Implementace těchto velkých systémů je proto velmi náročná a může se stát, že některá data nejsou v nové lokalitě ještě vůbec k dispozici. Jedná se o časově náročné výpočty prováděné většinou v prostředí výkonných pracovních stanic. Problematika je popsána v [34].

Do systému HAVAR-RP byl zabudován a později podstatně rozšířen dynamický model ENCONAN vyvinutý v ČR a popsáný v [32], do systému NORMAL je včleněna jeho modifikace pro případ dlouhodobých stacionárních výпустí. Model sice neřeší problematiku v plném rozsahu, nicméně jeho předností je flexibilita a skutečnost, že dává k dispozici vstupní parametry shromážděné na základě existujících údajů v ČR. Významným faktem je skutečnost, že model ENCONAN byl validován v rámci projektu VAMP organizovaného MAAE.

Základní schéma modelu ENCONAN je znázorněno na obrázku 5.1. Uvažuje se přenos aktivity do rostlin listovou i kořenovou cestou. S určitým charakteristickým zdržením následuje buď přímá konzumace plodin člověkem nebo jejich zkrmování zvířaty a transport aktivity do živočišných produktů. Živočišné produkty jsou opět s určitým zdržením zpracovávány (část odpadu při zpracování se znovu zkrmuje) na potraviny a tyto jsou skladovány a dopravovány ke spotřebitelům.

V průběhu let 1997 až 1999 probíhaly v ÚTIA AV ČR paralelní práce na lokalizaci evropského produktu RODOS pro podporu rozhodování při mimořádných jaderných událostech. Podstatnou částí těchto prací byly lokalizace tam použitého modelu ingesce, který je založen na moderní hypotéze o rozdělení celého území na tak zvané radioekologické zóny. V rámci RODOS projektu probíhala i revize existujících lokálních dat a jejich aktualizace pro ČR ([34,39]), která zpětně ovlivní i zpřesnění vstupních podkladů pro systém NORMAL.

Obr. 5.1: Transport radionuklidů potravními řetězci podle modelu ENCONAN



5.2.1 Příklad krátkodobého úniku radionuklidů ve dni t_{spad}

Celkový příjem aktivity $A_l^{a,n}(x,y;t)$ v [Bq] radionuklidu n jedincem z věkové kategorie a konzumujícím produkt l vypěstovaný v místě spadu (x,y) ke dni t vyjádřen vztahem:

$$A_l^{a,n}(x,y;t) = \Omega_0^n(x,y;t_{spd}) \cdot I\mathcal{E}_l^{a,n}(t) \quad (5.2)$$

Zde:

$\Omega_0^n(x,y;t_{spd})$ depozice v místě (x,y) v důsledku suchého vypadávání a vymývání radionuklidu v [Bq/m²], vztaženo ke dni spadu t_{spd} (juliánský den)

$I\mathcal{E}_l^{a,n}(t)$ integrální normalizovaný příjem aktivity nuklidu n v důsledku konzumace produktu l jedincem z věkové kategorie a za dobu od spadu ke dni t [m²]

Platí:

$$I\mathcal{E}_l^{a,n}(t) = \int_{t_{skl}+t_{zd}}^t \mathcal{E}_l^n(t') \cdot PD_l^a \cdot dt' \quad (5.3)$$

PD_l^a je průměrná denní spotřeba produktu l jedincem z věkové kategorie a [kg/d resp. l/d]

$\mathcal{E}_l^n(t')$ normalizovaná (na jednotku depozice) měrná aktivita nuklidu n v produktu l (na jednotku hmotnosti produktu l) ke dni t' [m² · kg⁻¹]

t_{skl} den sklizně [d]- juliánské datum

t_{zd} zdržení od sklizně ke konzumaci produktu l [d]

Do produktu se radionuklid dostává buď listovou nebo kořenovou cestou. Frakce radionuklidu ze spadu během vegetačního období, usazená na listech vytvářejících produkt l , je vyjádřena faktorem

$$R^l = 1 - \exp(-\mu \cdot V_{such}^l) \quad (5.4)$$

V_{such}^l suchá hmotnost rostliny na jednotku plochy v době spadu [kg/m²]

μ míra depozice aerosolů i elementárního jódu na porostu [m²/kg]

Pro určení časové závislosti hmotnosti listové části rostlin jsou použity detailnější experimentální vztahy pro pšenici, píceňiny (1. seč) a kukuřici v těchto tvarech:

pšenice:

$$Y_M = Y_{MS} / \left\{ 1.0 + \exp \left[\left(41.3 - (t_{spd} - t_{veg1}) \right) / 12.5 \right] \right\}$$

píceňiny (1. seč):

$$Y_M = Y_{MS} \cdot 5.25 / \left\{ 4.75 \cdot \left[1.0 + \exp \left[\left(12.7 - (t_{spd} - t_{veg1}) \right) / 19.0 \right] \right] \right\}$$

kukuřice:

$$Y_M = Y_{MS} / \left\{ 1.0 + \exp \left[\left(46.05 - (t_{spd} - t_{veg1}) \right) / 14.79 \right] \right\}$$

Zde Y_M je hmotnost listové části rostliny v čerstvém stavu na jednotku plochy v době spadu v $[\text{kg}/\text{m}^2]$;

Y_{MS} je hmotnost listové části rostliny v čerstvém stavu v době sklizně $[\text{kg}/\text{m}^2]$ (viz tab.č.5.1);
 t_{veg1}^1 značí počátek vegetačního období produktu l [d];

Pokud nejsou k dispozici detailnější růstové křivky, je pro další produkty užít vztah:

$$Y_M = Y_{MS} \cdot Y$$

kde faktor Y zohledňuje pokročilost vegetačního období:

$$Y = \left[1 + \exp \left[- \left(0.5 - \frac{(t_{spd} - t_{veg1})}{\Delta t_v} \right) \cdot \frac{\Delta t_v}{\Delta t_v - 2} \cdot k_1 \right] \right]^{-1}$$

$k_1 = -9,19$; $\Delta t_v = t_{skl} - t_{veg1}$;

Suchá hmotnost v době spadu se vypočte tak, že Y_M se přenásobí příslušným koeficientem suché frakce (viz. koeficient SUS v tab. 5.1).

Listová cesta: Hromadění aktivity nuklidu n v produktu l

Normalizovaná měrná aktivita v produktu l listovou cestou L v okamžiku sklizně t_{skl} je dána:

$${}^L \mathcal{E}_i^n(t_{skl}^l) = R^l \cdot \exp \left[-(\lambda_1 + \lambda^n) \cdot (t_{skl}^l - t_{spd}) \right] / V_c^l \quad (5.5)$$

a v libovolném čase t' ($t' > t_{skl}$) platí vyjádření:

$${}^L \mathcal{E}_i^n(t') = {}^L \mathcal{E}_i^n(t_{skl}) \cdot \exp \left[-\lambda^n \cdot (t' - t_{skl}^l) \right] \quad (5.6)$$

kde:

L index listové cesty

λ_1 konstanta odstranění nuklidu z povrchu rostliny povětrnostními vlivy;
aerosoly $\sim 0.046 \text{ d}^{-1}$; jód (elementární + organický) $\sim 0,069 \text{ d}^{-1}$

λ^n konstanta radioaktivní přeměny nuklidu n $[\text{d}^{-1}]$

t_{skl}^l den sklizně v roce (1 až 365) produktu l

t_{spd} den spadu v roce (1 až 365)

V_c^l čistý výnos produktu l v čerstvém stavu v okamžiku sklizně $[\text{kg}/\text{m}^2]$
- viz tab.č.5.1.

Předchozí dva vztahy se používají pro kukuřici, listovou zeleninu, cukrovou řepu, píceiny a plodovou zeleninu. Pro brambory, kořenovou zeleninu a obilí se zohledňuje závislost transportu listovou cestou do rostliny na pokročilosti vegetačního období v době spadu takovým způsobem, že vztah (5.5) resp. (5.6) se přenásobí faktorem Z , vyjádřeným jako:

$$Z = \left[1 + \exp \left[- \left(0.5 - \frac{(t_{spd} - t_{veg1})}{\Delta t_v} \right) \cdot \frac{\Delta t_v}{\Delta t_v - 2} \cdot k_2 \right] \right]^{-1} \quad (5.7)$$

$$k_2 = 9,19$$

Transport do ovoce listovou cestou není uvažován.

Kořenová cesta

Je použita metoda koncentračních faktorů vycházející z předpokladu rovnovážné koncentrace radionuklidů ve složkách životního prostředí. Normalizovaná měrná aktivita \underline{n} -tého radionuklidu v \underline{l} -tém rostlinném produktu v $[m^2 \cdot kg^{-1}]$ v okamžiku sklizně v důsledku absorpce kořenovým systémem je dána vztahem:

$${}^K \mathcal{E}_l^n(t_{skl}^l) = (1 - R^l) \cdot \exp \left[-(\lambda_2 + \lambda^n) \cdot (t_{skl}^l - t_{spd}) \right] \cdot BV_l^n / PH_l \quad (5.8)$$

a v libovolném dni t' ($t' > t_{skl}^l$) platí opět:

$${}^K \mathcal{E}_l^n(t'; t_{skl}^l, t_{spd}) = {}^K \mathcal{E}_l^n(t_{skl}^l) \cdot \exp \left[-\lambda^n \cdot (t' - t_{skl}^l) \right] \quad (5.9)$$

λ_2rychlostní konstanta transportu radionuklidů do hlubších vrstev půdy $[d^{-1}]$

$\lambda_2 = 4\%/rok$

λ^nkonstanta radioaktivního rozpadu nuklidu \underline{n} $[d^{-1}]$

BV_l^nkoncentrační faktor $[Bq/kg$ rostliny \underline{l} / Bq/kg půdy] - tabelován v tab.č. 5.3

PH_ltzv. efektivní povrchová hustota pro kořenovou zónu $[kg/m^2]$ - závisí na vegetační periodě; použily se hodnoty 65 pro 1. vegetační periodu, 195 (150 pro pícniny) ve 2. vegetační periodě, 325 (240) ve 3. vegetační periodě po spadu

Prvních 7 rostlinných produktů (viz tab.č.5.1) je konzumováno člověkem přímo a následný transport radionuklidů do organismu člověka je aproximován shora popsaným dynamickým modelem.

Příjem aktivity konzumací živočišných produktů

Poněkud složitěji se modeluje příjem radionuklidů jedincem v důsledku konzumace živočišných produktů. Jsou uvažovány 3 typy živočišných produktů - mléko, maso a vejce (tab.č.5.5). Dalším zpracováním se z nich (konkrétně u mléka) vyrábí potraviny, které jsou pak s jistým zdržením v procesu zpracování a transportu ke spotřebiteli (viz t_{zdp} - zdržení ve dnech) konzumovány.

Živočišné produkty označíme indexem \underline{b} , z nich vyráběné potraviny pak indexem \underline{p} . Jednotlivé produkty \underline{b} jsou výsledkem zkrmování produktů \underline{l} . Rostlinná krmiva jsou uvedena na dalších místech v tab.č.5.1.

Denní příjem (ve dni t') normalizované aktivity radionuklidu \underline{n} zkrmováním krmiv \underline{l} zvířetem je vyjádřen obecně podle:

$${}^{SUM} A^n(t') = \sum_{(l)} \left[{}^L \mathcal{E}_l^n(t') + {}^K \mathcal{E}_l^n(t') \right] \cdot PDK_l \quad (5.10)$$

PDK_l denní dávka krmiva \underline{l} [kg/d] - viz následující tab.č.5.6 a 5.7.

Měrná normalizovaná aktivita radionuklidu \underline{n} v 1 kg či litru produktu \underline{b} produkovaného zvířetem ve dni t' se vyjadřuje podle:

$$\mathcal{E}_b^n(t') = {}^{SUM} A^n(t') \cdot F_b^n \quad (5.11)$$

F_b^n frakce denního příjmu radionuklidu \underline{n} zvířetem, která se objeví v každém litru resp. kg živočišného produktu \underline{b} [d/l ; d/kg] - viz tab.č.5.3.

Vztah (5.11) platí pro rovnovážný stav, kdy nejsou uvažovány časové změny krmných dávek a změny váhy vykrmovaných zvířat. Pro přesnější popis dynamiky transportu aktivity v masě jsou vhodnější kompartmentové modely, problémem však dosud zůstává otázka nalezení věrohodných modelových parametrů.

Konečně integrální příjem normalizované aktivity nuklidu \underline{n} z konzumace potraviny \underline{p} (vyrobené z \underline{b}) jedincem ze skupiny \underline{a} za dobu ode dne spadu do dne t je dán vztahem:

$$I\mathcal{E}_{p,b}^{a,n}(t) = \int_{tkp}^t \mathcal{E}_b^n(t') \cdot PD_b^a \cdot f1_{p,b}^a \cdot dt' \quad (5.12)$$

Vzhledem k použitému výpočetnímu algoritmu je poslední integrál převeden substitucí do tvaru:

$$I\mathcal{E}_{p,b}^{a,n}(t) = \int_{t_{ref}}^{t-tkp} \mathcal{E}_b^n(t'+tkp) \cdot PD_b^a \cdot f1_{p,b}^a \cdot dt' \quad (5.13)$$

Zpětně pak platí:

$$I\mathcal{E}_b^{a,n}(t) = \sum_{(p)} I\mathcal{E}_{p,b}^{a,n}(t) \quad (5.14)$$

Zde:

tkp počátek konzumace kontaminované potraviny \underline{p} v sezóně;
 $tkp = t_{skl} + t_{zdp}$; t_{zdp} je doba zdržení podle tab.č.5.5

t_{ref} den zahájení zkrmování kontaminovaného produktu \underline{b} po spadu

PD_b^a denní spotřeba živočišného produktu b (ve všech potravinách p) jedincem z věkové kategorie a , [kg/den]

$f1_{p,b}^a$ frakce spotřeby potravin p v hodnotě výchozího živočišného produktu b k celkové spotřebě tohoto produktu jedincem z věkové skupiny a (viz tab.č.5.5)

Celkový příjem aktivity v důsledku konzumace rostlinných a živočišných produktů

Celkový integrální příjem normalizované aktivity radionuklidu n jedincem z věkové skupiny a v důsledku konzumace všech přímo spotřebovávaných rostlinných produktů l a všech živočišných produktů b je dán sumací:

$$I\mathcal{E}_{TOT}^{a,n}(t) = \sum_{(l)} I\mathcal{E}_l^{a,n}(t) + \sum_{(b)} I\mathcal{E}_b^{a,n}(t) \quad (5.15)$$

kde členy na pravé straně se určují pomocí vztahů (5.3) a (5.14).

Tab. 5.1: Vegetační období a produkce zemědělských plodin (charakteristické hodnoty pro ČR)

Plodina	Začátek vegetačního období t_{veg1} [den]	Střední doba sklizně (konec veg. období) t_{skl} [den]	Doba zdržení ke konzumaci t_{zd} [den]	Konec konzumace produktu t_{konz}^2 [den]	Výnos nadzemní listové části Y_{MS} [kg/m ²]	Obsah sušiny SUS	Čistý výnos produktu V_c [kg/m ²]
zelenina listová jarní	1.5. 121.0	15.6. 166.0	1.0	do 30.8. 242.0	1.46	0.08	1.46
zelenina listová podz.	1.6. 152.0	30.9. 273.0	1.0	do 31.12. 365.0	3.20	0.12	3.20
zelenina kořenová	1.5. 121.0	30.9. 273.0	1.0	do 31.12. 365.0	0.40	0.16	3.40
zelenina plodová	1.5. 121.0	31.7. 212.0	1.0	do 31.12. 365.0	2.71	0.06	2.31
obilí - pšenice	20.4. 110.0	31.7. 212.0	15.11. konzumace nové 105.0	31.12. 365.0	1.15	0.86	0.51
brambory	10.5. 130.0	30.9. 273.0	1.0	31.12. 365.0	0.30	0.21	1.83
ovoce (listová cesta se neuvažuje)	1.5. 121.0	30.9. 273.0	0.0	do 31.12. 365.0	0.90	0.06	0.90
ječmen jarní	20.4. 110.0	31.7. 214.0	105.0	365.0	0.95	0.86	0.46
kukuřice (siláž)	1.6. 152.0	20.9. 263.0	0.0	365.0	3.40	0.31	3.40
cukrová řepa	10.5. 131.0	20.10. 293.0	0.0	365.0	2.00	0.22	3.49
pícniny 1.seč	15.4. 105.0	10.6. 161.0	0.0	365.0	2.19	0.18	2.19
pícniny 2.seč	11.6. 162.0	31.7. 214.0	0.0	365.0	1.09	0.18	1.09
pícniny 3.seč	1.8. 215.0	15.10. 288.0	0.0	365.0	0.37	0.18	0.37

Tab. 5.2: Roční spotřeba hlavních druhů potravin podle modelu ENCONAN

Potravina [kg, l]	Věková kategorie [rok]					
	0 - 1	1 - 2	2 - 7	7 - 12	12 - 17	dospělí
zelenina listová jarní	1.15	2.20	2.20	2.77	3.47	3.75
zelenina listová podzimní	4.37	8.36	8.36	10.53	13.19	14.25
zelenina kořenová	7.82	14.96	14.96	18.84	23.60	25.50
zelenina plodová	9.66	18.48	18.48	23.27	29.15	31.50
obilí - pšenice	14.8	61.1	61.1	101.9	140.9	157.0
brambory	4.4	36.6	36.6	50.7	77.1	80.0
ovoce	9.9	33.6	33.6	45.4	55.9	45.0
mléko	242.7	360.1	360.1	383.4	333.8	248.0
maso hovězí	3.8	14.9	14.9	20.7	23.2	21.5
maso vepřové	1.1	7.6	7.6	16.3	19.7	39.5
drůbež	0.3	7.3	7.3	8.3	14.3	12.0
jiné druhy masa	-	2.4	2.4	3.3	3.4	3.7

Tab. 5.3: Koncentrační faktory BV_iⁿ pro transport radionuklidů do rostlin kořenovou cestou [Bq/kg rostliny/ Bq/kg půdy]

Nuklid	Krmiva	Obilniny	Kořenová zelenina	Listová zelenina 1	Ovoce	Brambory	Listová zelenina 2	Cukrová řepa	Plodová zelenina
H3	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
C14	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
F18	6.0E-02	5.2E-03	9.6E-04	7.2E-03	3.6E-04	1.3E-03	4.8E-03	1.3E-03	3.6E-04
Na22	3.0E-01	4.6E-02	4.8E-02	3.6E-02	1.8E-02	6.3E-02	2.4E-02	6.6E-02	1.8E-02
Na24	3.0E-01	4.6E-02	4.8E-02	3.6E-02	1.8E-02	6.3E-02	2.4E-02	6.6E-02	1.8E-02
Ar41	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
K42	1.0E+00	4.7E-01	8.8E-02	1.2E-01	3.3E-02	1.2E-01	8.0E-02	1.2E-01	3.3E-02
Cr51	3.0E-03	8.0E-04	1.0E-02	2.0E-02	2.0E-02	1.0E-02	2.0E-02	1.0E-02	2.0E-02
Mn54	3.0E-01	5.0E-01	1.8E-01	7.8E-01	1.5E-01	9.6E-02	7.8E-01	1.9E-01	2.0E-02
Mn56	3.0E-01	5.0E-01	1.8E-01	7.8E-01	1.5E-01	9.6E-02	7.8E-01	1.9E-01	2.0E-02
Fe55	3.0E-03	7.0E-04	6.8E-04	2.4E-04	5.0E-04	4.0E-04	2.4E-04	6.8E-04	1.0E-03
Fe59	3.0E-03	7.0E-04	6.8E-04	2.4E-04	5.0E-04	4.0E-04	2.4E-04	6.8E-04	1.0E-03
Co58	4.0E-01	3.0E-02	2.1E-02	8.4E-03	2.0E-02	4.0E-02	2.5E-02	2.3E-02	1.0E-02
Co60	4.0E-01	3.0E-02	2.1E-02	8.4E-03	2.0E-02	4.0E-02	2.5E-02	2.3E-02	1.0E-02
Ni63	5.1E-01	2.6E-02	1.9E-02	8.4E-03	1.9E-03	7.0E-03	5.6E-03	7.0E-03	1.9E-03
Cu64	8.0E-01	6.9E-01	1.3E-01	9.6E-02	4.8E-02	1.7E-01	6.4E-02	1.8E-01	4.8E-02
Zn65	1.5E+00	4.0E-01	4.0E-01	4.0E-01	9.0E-02	9.0E-02	4.0E-01	1.5E-01	9.0E-02
Kr85m	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Kr85	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Kr87	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Kr88	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Kr89	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Kr90	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Rb88	9.0E-01	7.7E-01	1.4E-01	1.1E-01	5.4E-02	1.9E-01	7.2E-02	2.0E-01	5.4E-02
Rb89	9.0E-01	7.7E-01	1.4E-01	1.1E-01	5.4E-02	1.9E-01	7.2E-02	2.0E-01	5.4E-02
Sr89	2.0E+00	3.0E-01	1.4E-01	3.4E-02	2.2E-02	4.7E-02	3.4E-01	1.4E-01	5.0E-02
Sr90	2.0E+00	3.0E-01	1.4E-01	3.4E-02	2.2E-02	4.7E-02	3.4E-01	1.4E-01	5.0E-02
Sr91	2.0E+00	3.0E-01	1.4E-01	3.4E-02	2.2E-02	4.7E-02	3.4E-01	1.4E-01	5.0E-02
Sr92	2.0E+00	3.0E-01	1.4E-01	3.4E-02	2.2E-02	4.7E-02	3.4E-01	1.4E-01	5.0E-02
Y90	1.0E-02	8.6E-03	1.6E-03	1.2E-03	6.0E-04	2.1E-03	8.0E-04	2.2E-03	6.0E-04
Y91m	1.0E-02	8.6E-03	1.6E-03	1.2E-03	6.0E-04	2.1E-03	8.0E-04	2.2E-03	6.0E-04
Y91	1.0E-02	8.6E-03	1.6E-03	1.2E-03	6.0E-04	2.1E-03	8.0E-04	2.2E-03	6.0E-04
Zr95	2.0E-02	5.0E-03	1.8E-03	1.4E-03	1.8E-03	1.8E-03	1.4E-03	1.8E-03	2.0E-05
Zr97	2.0E-02	5.0E-03	1.8E-03	1.4E-03	1.8E-03	1.8E-03	1.4E-03	1.8E-03	2.0E-05
Nb95	4.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	2.0E-02	2.0E-02	1.0E-02	2.0E-02	1.0E-02	2.0E-02
Nb97	4.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	2.0E-02	2.0E-02	1.0E-02	2.0E-02	1.0E-02	2.0E-02
Mo99	8.0E-01	6.9E-01	1.3E-01	9.6E-02	4.8E-02	1.7E-01	6.4E-02	1.8E-01	4.8E-02
Tc99m	8.1E+00	6.3E-01	1.3E+01	1.4E+00	2.6E-01	5.0E-02	1.6E+01	5.0E-02	2.6E-01
Tc99	8.1E+00	6.3E-01	1.3E+01	1.4E+00	2.6E-01	5.0E-02	1.6E+01	5.0E-02	2.6E-01
Ru103	9.0E-02	8.0E-03	4.9E-04	3.5E-03	3.0E-03	1.7E-03	3.5E-03	4.9E-04	2.0E-03
Ru105	9.0E-02	8.0E-03	4.9E-04	3.5E-03	3.0E-03	1.7E-03	3.5E-03	4.9E-04	2.0E-03
Ru106	9.0E-02	8.0E-03	4.9E-04	3.5E-03	3.0E-03	1.7E-03	3.5E-03	4.9E-04	2.0E-03
Rh105	9.0E-01	7.7E-01	1.4E-01	1.1E-01	5.4E-02	1.9E-01	7.2E-02	2.0E-01	5.4E-02
Rh106	9.0E-01	7.7E-01	1.4E-01	1.1E-01	5.4E-02	1.9E-01	7.2E-02	2.0E-01	5.4E-02
Ag110m	1.0E+00	2.0E-01	1.3E-03	2.7E-04	1.3E-03	1.3E-03	2.7E-04	1.3E-03	8.0E-04
Sb124	2.0E-01	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-02	2.0E-02	9.0E-02
Sb125	2.0E-01	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-02	2.0E-02	9.0E-02
Te125m	7.2E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00
Te127m	7.2E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00
Te127	7.2E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00

Tab. 5.3 - pokračování

Nuklid	Krmiva	Obilniny	Kořenová zelenina	Listová zelenina 1	Ovoce	Brambory	Listová zelenina 2	Cukrová řepa	Plodová zelenina
Te129m	7.2E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00
Te129	7.2E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00
Te131m	7.2E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00
Te131	7.2E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00
Te132	7.2E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00
I129O	9.0E-01	2.0E-02	5.9E-03	3.8E-02	6.1E-03	5.3E-03	3.8E-02	5.9E-03	1.0E-02
I129	9.0E-01	2.0E-02	5.9E-03	3.8E-02	6.1E-03	5.3E-03	3.8E-02	5.9E-03	1.0E-02
I131O	9.0E-01	2.0E-02	5.9E-03	3.8E-02	6.1E-03	5.3E-03	3.8E-02	5.9E-03	1.0E-02
I131	9.0E-01	2.0E-02	5.9E-03	3.8E-02	6.1E-03	5.3E-03	3.8E-02	5.9E-03	1.0E-02
I132O	9.0E-01	2.0E-02	5.9E-03	3.8E-02	6.1E-03	5.3E-03	3.8E-02	5.9E-03	1.0E-02
I132	9.0E-01	2.0E-02	5.9E-03	3.8E-02	6.1E-03	5.3E-03	3.8E-02	5.9E-03	1.0E-02
I133O	9.0E-01	2.0E-02	5.9E-03	3.8E-02	6.1E-03	5.3E-03	3.8E-02	5.9E-03	1.0E-02
I133	9.0E-01	2.0E-02	5.9E-03	3.8E-02	6.1E-03	5.3E-03	3.8E-02	5.9E-03	1.0E-02
I134O	9.0E-01	2.0E-02	5.9E-03	3.8E-02	6.1E-03	5.3E-03	3.8E-02	5.9E-03	1.0E-02
I134	9.0E-01	2.0E-02	5.9E-03	3.8E-02	6.1E-03	5.3E-03	3.8E-02	5.9E-03	1.0E-02
I135O	9.0E-01	2.0E-02	5.9E-03	3.8E-02	6.1E-03	5.3E-03	3.8E-02	5.9E-03	1.0E-02
I135	9.0E-01	2.0E-02	5.9E-03	3.8E-02	6.1E-03	5.3E-03	3.8E-02	5.9E-03	1.0E-02
Xe131m	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Xe133m	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Xe133	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Xe135m	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Xe135	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Xe137	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Xe138	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Cs134	1.0E-01	2.0E-02	7.0E-02	9.7E-02	4.0E-01	5.0E-02	9.7E-02	7.0E-02	1.0E-02
Cs136	1.0E-01	2.0E-02	7.0E-02	9.7E-02	4.0E-01	5.0E-02	9.7E-02	7.0E-02	1.0E-02
Cs137	1.0E-01	2.0E-02	7.0E-02	9.7E-02	4.0E-01	5.0E-02	9.7E-02	7.0E-02	1.0E-02
Cs138	1.0E-01	2.0E-02	7.0E-02	9.7E-02	4.0E-01	5.0E-02	9.7E-02	7.0E-02	1.0E-02
Ba140	2.0E-02	5.0E-03	1.0E-02	2.0E-02	2.0E-02	1.0E-02	2.0E-02	1.0E-02	2.0E-02
La140	4.0E-02	9.3E-06	1.6E-04	6.2E-04	2.5E-05	6.1E-05	4.2E-04	6.1E-05	2.5E-05
Ce141	4.0E-02	2.0E-03	1.9E-03	3.0E-03	1.5E-03	9.3E-04	3.0E-03	1.9E-03	5.0E-03
Ce143	4.0E-02	2.0E-03	1.9E-03	3.0E-03	1.5E-03	9.3E-04	3.0E-03	1.9E-03	5.0E-03
Ce144	4.0E-02	2.0E-03	1.9E-03	3.0E-03	1.5E-03	9.3E-04	3.0E-03	1.9E-03	5.0E-03
Pr143	2.0E-02	1.7E-02	3.2E-03	2.4E-03	1.2E-03	4.2E-03	1.6E-03	4.4E-03	1.2E-03
Pr144	2.0E-02	1.7E-02	3.2E-03	2.4E-03	1.2E-03	4.2E-03	1.6E-03	4.4E-03	1.2E-03
Nd147	2.0E-02	1.7E-02	3.2E-03	2.4E-03	1.2E-03	4.2E-03	1.6E-03	4.4E-03	1.2E-03
Pm147	4.0E-02	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03
Sm153	4.0E-02	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03
Eu154	4.0E-02	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03
W187	1.0E-01	8.6E-02	1.6E-02	1.2E-02	6.0E-03	2.1E-02	8.0E-03	2.2E-02	6.0E-03
Np239	8.1E-03	2.3E-03	5.6E-03	4.4E-03	1.5E-03	1.4E-03	3.0E-03	5.7E-03	1.5E-03
U235	2.3E-01	1.1E-03	2.4E-03	1.0E-03	1.1E-03	2.3E-03	6.6E-04	3.1E-03	1.1E-03
U238	2.3E-01	1.1E-03	2.4E-03	1.0E-03	1.1E-03	2.3E-03	6.6E-04	3.1E-03	1.1E-03
Pu238	4.5E-04	1.0E-06	1.0E-03	1.0E-04	4.5E-06	4.5E-05	1.0E-04	4.5E-05	4.5E-06
Pu239	4.5E-04	1.0E-06	1.0E-03	1.0E-04	4.5E-06	4.5E-05	1.0E-04	4.5E-05	4.5E-06
I129A	9.0E-01	2.0E-02	5.9E-03	3.8E-02	6.1E-03	5.3E-03	3.8E-02	5.9E-03	1.0E-02
I131A	9.0E-01	2.0E-02	5.9E-03	3.8E-02	6.1E-03	5.3E-03	3.8E-02	5.9E-03	1.0E-02
I132A	9.0E-01	2.0E-02	5.9E-03	3.8E-02	6.1E-03	5.3E-03	3.8E-02	5.9E-03	1.0E-02
I133A	9.0E-01	2.0E-02	5.9E-03	3.8E-02	6.1E-03	5.3E-03	3.8E-02	5.9E-03	1.0E-02
I134A	9.0E-01	2.0E-02	5.9E-03	3.8E-02	6.1E-03	5.3E-03	3.8E-02	5.9E-03	1.0E-02
I135A	9.0E-01	2.0E-02	5.9E-03	3.8E-02	6.1E-03	5.3E-03	3.8E-02	5.9E-03	1.0E-02
Be7	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00

Nuklid	Krmiva	Obilniny	Kořenová zelenina	Listová zelenina 1	Ovoce	Brambory	Listová zelenina 2	Cukrová řepa	Plodová zelenina
Cl38	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
As76	2.0E-01	8.0E-02	8.0E-02	8.0E-02	8.0E-02	8.0E-02	8.0E-02	8.0E-02	8.0E-02
Y88	1.0E-02	8.6E-03	1.6E-03	1.2E-03	6.0E-04	2.1E-03	8.0E-04	2.2E-03	6.0E-04
Sb122	2.0E-01	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-02	2.0E-02	9.0E-02
Ba139	2.0E-02	5.0E-03	1.0E-02	2.0E-02	2.0E-02	1.0E-02	2.0E-02	1.0E-02	2.0E-02
Ce139	4.0E-02	2.0E-03	1.9E-03	3.0E-03	1.5E-03	9.3E-04	3.0E-03	1.9E-03	5.0E-03
Am241	5.5E-03	1.0E-05	1.0E-03	1.0E-03	2.5E-05	2.5E-05	1.0E-03	5.5E-04	2.5E-05

Tab. 5.4: Přenosové koeficienty pro transport nuklidů do produktů *b* živočišné výroby F_b^n
[d/kg, d/l]

Nuklid	Mléko	Hovězí maso	Vepřové maso	Drůbež	Vejce
H3	1.4E-02	1.2E-02	1.2E-02	1.2E-02	1.2E-02
C14	1.5E-02	3.1E-02	3.1E-02	3.1E-02	3.1E-02
F18	1.1E-03	1.5E-01	1.5E-01	1.5E-01	1.5E-01
Na22	1.6E-02	8.0E-02	8.0E-02	8.0E-02	6.0E+00
Na24	1.6E-02	8.0E-02	8.0E-02	8.0E-02	6.0E+00
Ar41	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
K42	7.2E-03	2.0E-02	2.0E-02	2.0E-02	1.0E+00
Cr51	2.0E-03	3.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-03
Mn54	3.0E-04	1.0E-03	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-03
Mn56	3.0E-04	1.0E-03	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-03
Fe55	3.0E-04	3.0E-02	3.0E-02	3.0E-02	3.0E-03
Fe59	3.0E-04	3.0E-02	3.0E-02	3.0E-02	3.0E-03
Co58	2.0E-03	3.0E-02	2.5E-01	1.0E-03	5.0E-02
Co60	2.0E-03	3.0E-02	2.5E-01	1.0E-03	5.0E-02
Ni63	1.6E-02	5.0E-03	5.0E-03	5.0E-03	5.0E-03
Cu64	1.7E-03	9.0E-03	2.2E-02	5.0E-01	5.0E-01
Zn65	1.0E-02	1.0E-01	1.5E-01	1.0E-01	1.0E-01
Kr85m	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Kr85	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Kr87	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Kr88	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Kr89	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Kr90	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Rb88	1.2E-02	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02
Rb89	1.2E-02	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02
Sr89	1.0E-03	6.0E-04	8.0E-03	9.0E-04	2.0E-02
Sr90	1.0E-03	6.0E-04	8.0E-03	9.0E-04	2.0E-02
Sr91	1.0E-03	6.0E-04	8.0E-03	9.0E-04	2.0E-02
Sr92	1.0E-03	6.0E-04	8.0E-03	9.0E-04	2.0E-02
Y90	2.0E-05	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-02	2.0E-03
Y91m	2.0E-05	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-02	2.0E-03
Y91	2.0E-05	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-02	2.0E-03

Nuklid	Mléko	Hovězí maso	Vepřové maso	Drůbež	Vejce
Zr95	3.0E-05	2.0E-02	1.0E-03	1.0E-04	6.0E-03
Zr97	3.0E-05	2.0E-02	1.0E-03	1.0E-04	6.0E-03
Nb95	2.0E-02	3.0E-01	1.0E-03	1.0E-04	6.0E-03
Nb97	2.0E-02	3.0E-01	1.0E-03	1.0E-04	6.0E-03
Mo99	1.7E-03	1.0E-03	1.0E-03	1.0E+00	9.0E-01
Tc99m	2.3E-05	1.0E-06	1.5E-04	3.0E-02	3.0E+00
Tc99	2.3E-05	1.0E-06	1.5E-04	3.0E-02	3.0E+00
Ru103	6.0E-07	2.0E-03	5.0E-03	3.0E-04	2.0E-04
Ru105	6.0E-07	2.0E-03	5.0E-03	3.0E-04	2.0E-04
Ru106	6.0E-07	2.0E-03	5.0E-03	3.0E-04	2.0E-04
Rh105	1.0E-02	1.5E-03	1.5E-03	1.5E-03	1.5E-03
Rh106	1.0E-02	1.5E-03	1.5E-03	1.5E-03	1.5E-03
Ag110m	3.0E-02	5.0E-03	5.0E-02	5.0E-02	5.0E-03
Sb124	2.5E-05	4.0E-05	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-03
Sb125	2.5E-05	4.0E-05	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-03
Te125m	2.0E-04	2.0E-02	4.0E-01	4.0E-01	3.0E-02
Te127m	2.0E-04	2.0E-02	4.0E-01	4.0E-01	3.0E-02
Te127	2.0E-04	2.0E-02	4.0E-01	4.0E-01	3.0E-02
Te129m	2.0E-04	2.0E-02	4.0E-01	4.0E-01	3.0E-02
Te129	2.0E-04	2.0E-02	4.0E-01	4.0E-01	3.0E-02
Te131m	2.0E-04	2.0E-02	4.0E-01	4.0E-01	3.0E-02
Te131	2.0E-04	2.0E-02	4.0E-01	4.0E-01	3.0E-02
Te132	2.0E-04	2.0E-02	4.0E-01	4.0E-01	3.0E-02
I129O	1.0E-02	1.0E-02	9.0E-02	4.0E-03	8.0E-02
I129	1.0E-02	1.0E-02	9.0E-02	4.0E-03	8.0E-02
I131O	1.0E-02	1.0E-02	9.0E-02	4.0E-03	8.0E-02
I131	1.0E-02	1.0E-02	9.0E-02	4.0E-03	8.0E-02
I132O	1.0E-02	1.0E-02	9.0E-02	4.0E-03	8.0E-02
I132	1.0E-02	1.0E-02	9.0E-02	4.0E-03	8.0E-02
I133O	1.0E-02	1.0E-02	9.0E-02	4.0E-03	8.0E-02
I133	1.0E-02	1.0E-02	9.0E-02	4.0E-03	8.0E-02
I134O	1.0E-02	1.0E-02	9.0E-02	4.0E-03	8.0E-02
I134	1.0E-02	1.0E-02	9.0E-02	4.0E-03	8.0E-02
I135O	1.0E-02	1.0E-02	9.0E-02	4.0E-03	8.0E-02
I135	1.0E-02	1.0E-02	9.0E-02	4.0E-03	8.0E-02
Xe131m	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Xe133m	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Xe133	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Xe135m	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Xe135	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Xe137	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Xe138	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Cs134	3.0E-03	2.0E-02	4.5E-01	4.0E-01	3.0E-02
Cs136	3.0E-03	2.0E-02	4.5E-01	4.0E-01	3.0E-02

Nuklid	Mléko	Hovězí maso	Vepřové maso	Drůbež	Vejce
Cs137	3.0E-03	2.0E-02	4.5E-01	4.0E-01	3.0E-02
Cs138	3.0E-03	2.0E-02	4.5E-01	4.0E-01	3.0E-02
Ba140	2.0E-05	2.0E-03	5.0E-03	6.0E-04	1.0E-04
La140	2.0E-05	2.0E-03	2.0E-03	1.0E-01	9.0E-03
Ce141	2.0E-05	2.0E-03	5.0E-03	6.0E-04	1.0E-04
Ce143	2.0E-05	2.0E-03	5.0E-03	6.0E-04	1.0E-04
Ce144	2.0E-05	2.0E-03	5.0E-03	6.0E-04	1.0E-04
Pr143	5.0E-06	4.7E-03	4.7E-03	3.0E-02	5.0E-03
Pr144	5.0E-06	4.7E-03	4.7E-03	3.0E-02	5.0E-03
Nd147	5.0E-06	3.3E-03	3.3E-03	9.0E-02	3.0E-04
Pm147	2.0E-05	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03
Sm153	2.0E-05	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03
Eu154	2.0E-05	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03
W187	2.9E-04	4.0E-02	4.0E-02	4.0E-02	4.0E-02
Np239	5.0E-06	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-03
U235	4.0E-04	3.0E-04	6.2E-02	1.0E+00	1.0E+00
U238	4.0E-04	3.0E-04	6.2E-02	1.0E+00	1.0E+00
Pu238	1.1E-06	1.0E-05	8.0E-05	3.0E-04	5.0E-04
Pu239	1.1E-06	1.0E-05	8.0E-05	3.0E-04	5.0E-04
I129A	1.0E-02	1.0E-02	9.0E-02	4.0E-03	8.0E-02
I131A	1.0E-02	1.0E-02	9.0E-02	4.0E-03	8.0E-02
I132A	1.0E-02	1.0E-02	9.0E-02	4.0E-03	8.0E-02
I133A	1.0E-02	1.0E-02	9.0E-02	4.0E-03	8.0E-02
I134A	1.0E-02	1.0E-02	9.0E-02	4.0E-03	8.0E-02
I135A	1.0E-02	1.0E-02	9.0E-02	4.0E-03	8.0E-02
Be7	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Cl38	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
As76	6.2E-05	2.0E-02	2.0E-02	2.0E-02	2.0E-02
Y88	2.0E-05	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-02	2.0E-03
Sb122	2.5E-05	4.0E-05	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-03
Ba139	2.0E-05	2.0E-03	5.0E-03	6.0E-04	1.0E-04
Ce139	2.0E-05	2.0E-03	5.0E-03	6.0E-04	1.0E-04
Am241	1.5E-06	4.0E-05	1.7E-04	6.0E-04	4.0E-03

Tab. 5.5: Doba zdržení ke konzumaci a frakce spotřeby potraviny p v hodnotě výchozího živočišného produktu b k celkové spotřebě tohoto produktu jedincem z věkové skupiny a

živočišný produkt	potravina	t_{zdp}	f_1 dospělí/ kojenci
mléko	čerstvé mléko + smetana	4	0,46 / 0,059
	sýry + mražené	30 - 4 x 30	0,22 / 0,028
	mléko sušené + kondenzované	30 - 9 x 30	0,14 / 0,89
	tvaroh + ostatní	15	0,18 / 0,023
maso	hovězí	30	
	vepřové	30	
	drůbeží	30	
vejce	vejce	14	

Krmné dávky hospodářských zvířat

Zde jsou převzaty hodnoty krmných dávek z liter.[33]. Předpokládejme, že zimní období trvá od konce sklizně zelené píce ve 3. egetačním období (t.j. 15.10) do 30.4. následujícího roku. Pro ustájený skot jsou příslušné hodnoty v tab.č.5.6.

Tab. 5.6: Krmné dávky skotu

krmivo [kg/d]	d o j n i c e		j a l o v i c e	
	léto	Zima	léto	zima
zelená píce	35	-	18	-
siláž	5	25	5	15
senáž	2	8	2	3
seno	-	2	-	2
sláma	2	2	2	2
obilniny	2,5	2,5	2	2

Obilninami se zde míní směs krmné pšenice a ječmene (1:1), přičemž zkrmování z nové sklizně začíná v polovině listopadu téhož roku. Seno a senáž pocházejí ze 2/3 z 1. seče pícnin a z 1/3 ze 2. seče. Siláž je směsí kukuřice na zeleno a cukrové řepy (chrást, skrojky, řízky) v poměru 1:1.

Pro krmné dávky prasat byly přijaty hodnoty poskytnuté pracovníky zemědělského zásobování. Jejich časově proměnné hodnoty během výkrmu jsou v následující tab.č.5.7.

Tab. 5.7: Krmné dávky prasat

měsíc výkrmu	1	2	3	4	5	6
krmivo[kg,l/den]						
Pšenice	0,4	0,4	1,1	1,1	1,3	1,3
Ječmen	0,3	0,3	0,75	0,78	1,3	1,3
sušené mléko	< 0,1	0,08	-	-	-	-
syrovátka	-	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5

Krmné dávky nosnic a brojlerů sestávají ze směsi obilnin (pšenice a ječmen v poměru 1:1) a šrotu. Pro redistribuci radionuklidu ze zrn do šrotu se bere koeficient 2. Denní krmná dávka nosnic je 110 g/d směsi, brojlerů pak 115 g/d.

Dnes jsou pro podmínky ČR k dispozici některá zpřesněná data založená na pracech [34, 39].

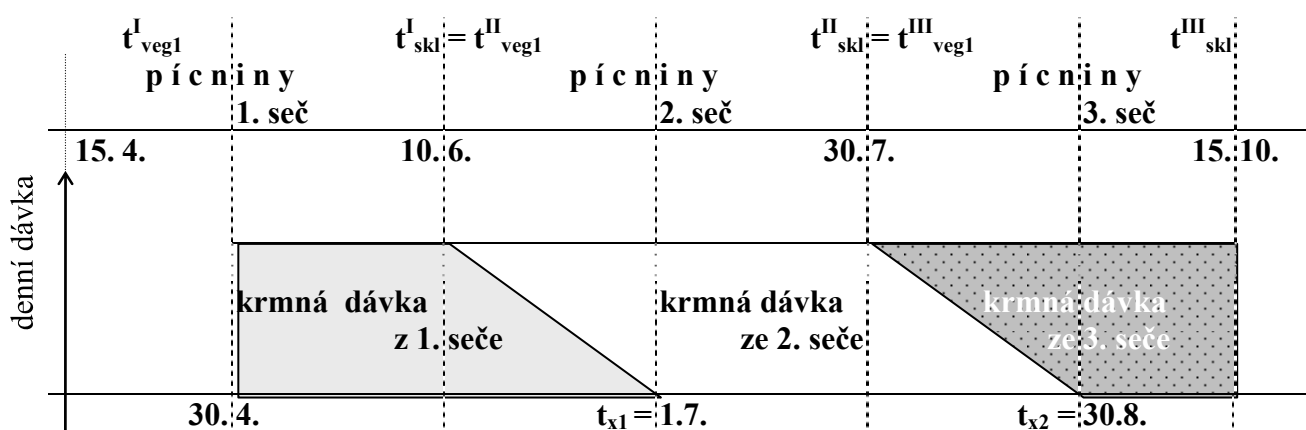
Poznámka k dynamice výkrmu hospodářských zvířat

Dynamické modelování transportu radionuklidů v potravních řetězcích představuje určitě značný pokrok ve srovnání s dříve používanými statickými přiblíženími. Nicméně i zde jsou používána různá zjednodušení vynucená jak nedostatečným stupněm znalostí složitých transportních mechanismů tak nedostupností vstupních dat. Snaha po detailnějším zahrnutí dynamiky včetně růstových faktorů zvířete vede k přesnějším kompartmentovým modelům, avšak jejich širšímu uplatnění dosud brání nedostatek věrohodných vstupních dat. Současnou situaci v ČR v této oblasti shrnují práce [34, 39,40].

Je třeba si uvědomit, že model ENCONAN, který je zde převzat a modifikován, se snaží o zahrnutí časových faktorů, nicméně pro účely praktických výpočtů je svázán některými zjednodušeními. Konkrétně pro dynamiku výkrmu hospodářských zvířat je platnost vztahu (5.11) omezena na rovnovážný stav (stálá doживost, konstantní krmné dávky, kromě prasat se neuvažují změny hmotnosti vykrmovaných zvířat).

Z hlediska charakteru vegetačního cyklu krmiv se u většiny z nich předpokládá sklizeň v určitém dni v roce s následujícím zahájením zkrmování (s určitým zdržením t_{zd} - viz tab.č.5.1).

Tento scénář je však nepoužitelný na zelené pícniny, hrající rozhodující roli v řetězci přenosu radioaktivního jódu přes mléčné produkty k člověku. V této práci je naprogramován následující modifikovaný scénář zkrmování píce, který se snaží respektovat fakt určité kontinuity sklizně a pozvolného neskokového přechodu složení krmiva mezi jednotlivými vegetačními obdobími. Předpokládejme, že konstantní denní krmné dávky pícnin se v průběhu vegetačních období realizují následovně:



Obr. 5.2: Denní krmné dávky pícnin 1., 2. a 3. seče v průběhu vegetačních období

Další předpoklady:

- zkrmování zelené píce začíná 30.4. (konzervativní předpoklad)
- v čase t_{skl}^I je ukončena 1. seč, denní krmné dávky v období 10.6. až 1.7. se skládají ze senáže z 1. seče (klesá lineárně až do dne t_{x1} , kdy jsou nulové) a nové zelené píce ze 2. seče (doplňkově lineárně roste).
- v čase t_{skl}^{II} je ukončena 2. seč a denní krmné dávky v období 30.7. až 30.8. se realizují lineárně, analogicky předchozím

Algoritmus výpočtu umožňuje analyzovat následky spadu nuklidů ve všech možných kombinacích:

1. $t_{spd} < t_{veg1}^I$... jen kořenový transport
2. $t_{spd} \in \langle t_{veg1}^I; t_{skl}^I \rangle$
3. $t_{spd} \in \langle t_{veg1}^{II}; t_{skl}^{II} \rangle$
4. $t_{spd} \in \langle t_{veg1}^{III}; t_{skl}^{III} \rangle$
5. $t_{spd} > t_{skl}^{III}$... nulová kontaminace

Dále budou uvedeny vztahy použité pro případ 2), kdy ke spadu dojde ve vegetačním období 1. seče (ostatní intervaly jsou popisovány analogicky).

Definujeme $t_{ref} = \max\{t_{spd}; t_{krm}\}$, kde t_{krm} je zahájení zkrmování pícnin z 1. seče (podle obrázku je to 30.4.)

a) Pro čas $t^* \in \langle t_{ref}; t_{skl}^I \rangle$ zavedeme analogicky se vztahem (5.5):

$${}^L \mathcal{E}_l^n(t^*) = R^l \cdot \exp\left[-(\lambda_1 + \lambda^n) \cdot (t^* - t_{spd})\right] / V_c^l(t^*) \quad (5.16)$$

Zde: l je index pro pícniny 1. seče,

$V_c^l(t^*)$ je výnos (předčasně) sklizených pícnin z 1. seče (zde předpokládáme lineární změnu v $\langle t_{veg1}^I; t_{skl}^I \rangle$):

$$V_c^l(t^*) = V_c^l(t_{skl}^I) \cdot (t^* - t_{veg1}^I) / (t_{skl}^I - t_{veg1}^I)$$

Pro kořenovou cestu platí obdobně se (5.8):

$${}^K \mathcal{E}_l^n(t^*) = (1 - R^l) \cdot \exp\left[-(\lambda_2 + \lambda^n) \cdot (t^* - t_{spd})\right] \cdot BV_l^n / PH_l \quad (5.17)$$

Ve dni t^* tedy zvíře přijme normalizovanou aktivitu (analogicky s (5.10)):

$$A_l^n(t^*) = \left[{}^L \mathcal{E}_l^n(t^*) + {}^K \mathcal{E}_l^n(t^*) \right] \cdot PDK_l \quad (5.18)$$

PDK_l je denní krmná dávka krmiva l [kg,l/d]

b) Pro čas $t' \in \langle t_{skl}^I; t_{x1} \rangle$ - dokrmuje se (lineární snižování) senáž z 1. seče, lineárně narůstá zkrmování narůstající zelené píče ze 2. seče.

- Příjem aktivity ve dni t' konzumací senáže z 1. seče:

$$A_l^n(t') = A_l^n(t^* = t_{skl}^I) \cdot \exp\left[-\lambda^n \cdot (t' - t_{skl}^I)\right] \cdot \frac{t_{x1} - t'}{t_{x1} - t_{skl}^I} \quad (5.19)$$

zde $A_l^n(t^*)$ je dáno rovnicí (5.18).

- Příjem od konzumace pícnin 2. seče (index $l+1$) – lineární nárůst :

$$A_{l+1}^n(t') = {}^K \mathcal{E}_{l+1}^n(t') \cdot PDK_{l+1} \cdot \frac{t' - t_{skl}^I}{t_{x1} - t_{skl}^I}$$

Kořenový transport ${}^K \mathcal{E}_{l+1}^n(t')$ je vyjádřen s využitím vztahu (5.17) jako:

$${}^K \mathcal{E}_{l+1}^n(t') = {}^K \mathcal{E}_l^n(t_{skl}^I) \cdot \exp\left[-(\lambda_2 + \lambda^n) \cdot (t' - t_{skl}^I)\right] \quad (5.20)$$

Výsledný denní příjem normalizované aktivity zvířetem v čase t' z uvažovaného časového intervalu je dán součtem:

$$A_{l,l+1}^n(t') = A_l^n(t') + A_{l+1}^n(t') \quad (5.21)$$

c) Pro čas $t' \in \langle t_{x1}^{II}; t_{skl}^{II} \rangle$ - konzumuje se pouze kontinuálně sklizená píče ze 2. seče, která je pro uvažovaný případ spadu v 1. vegetačním období kontaminovaná pouze kořenovou cestou, tedy:

$$A_{l+1}^n(t') = {}^K \mathcal{E}_{l+1}^n(t') \cdot PDK_{l+1} \quad (5.22)$$

${}^K \mathcal{E}_{l+1}^n(t')$ je dáno opět vztahem (5.20).

d) Pro čas $t' \in \langle t_{skl}^{II}; t_{skl}^{III} \rangle$ - jen kořenový transport, předpokládá se stejná povrchová hustota půdy PH_l pro všechny tři seče:

$$A_{l+2}^n(t') = {}^K \mathcal{E}_{l+2}^n(t') \cdot PDK_{l+2} \quad (5.23)$$

Nyní opět podle přijatého mechanismu kontinuálního dokrmování rozlišíme dva případy:

d1) $t' \in \langle t_{skl}^{II}; t_{x2} \rangle$ - předpokládá se dokrmování senáže ze 2.seče s lineárně klesající závislostí,
přičemž příjem aktivity zvířetem ve dni t' se vyjádří podle:

$$A_{l+1}^n(t') = {}^K \mathcal{E}_{l+1}^n(t') \cdot PDK_{l+1} \cdot \frac{t_{x2} - t'}{t_{x2} - t_{skl}^{II}} \quad (5.24)$$

přičemž:

$${}^K \mathcal{E}_{l+1}^n(t') = {}^K \mathcal{E}_{l+1}^n(t_{skl}^{II}) \cdot \exp[-\lambda^n \cdot (t' - t_{skl}^{II})] \quad (5.25)$$

${}^K \mathcal{E}_{l+1}^n(t_{skl}^{II})$ je dáno vztahem (5.20)

Dále na tomto intervalu předpokládáme komplementární nárůst zkrmování dorůstající píce ze 3. seče podle:

$$A_{l+2}^n(t') = {}^K \mathcal{E}_{l+2}^n(t') \cdot PDK_{l+2} \cdot \left(1 - \frac{t_{x2} - t'}{t_{x2} - t_{skl}^{II}}\right) \quad (5.26)$$

$${}^K \mathcal{E}_{l+2}^n(t') = {}^K \mathcal{E}_{l+1}^n(t_{skl}^{II}) \cdot \exp[-(\lambda_2 + \lambda^n) \cdot (t' - t_{skl}^{II})]$$

V analogii s (5.21) dostaneme:

$$A_{l+1,l+2}^n(t') = A_{l+1}^n(t') + A_{l+2}^n(t') \quad (5.27)$$

d2) $t' \in \langle t_{x2}; t_{skl}^{III} \rangle$ - konzumuje se dorůstající píce z 3. období

Příjem aktivity zvířetem ve dni t' je dán podle:

$$A_{l+2}^n(t') = {}^K \mathcal{E}_{l+2}^n(t') \cdot PDK_{l+2} \quad (5.28)$$

$${}^K \mathcal{E}_{l+2}^n(t') = (1 - R^l) \cdot \exp[-(\lambda_2 + \lambda^n) \cdot (t' - t_{spd})] \cdot BV_{l+2}^n / PH_{l+2}$$

Takto jsme určili pro kterýkoliv čas $t' \in \langle t_{ref}; t_{skl}^{III} \rangle$ příspěvek od konzumace pícnin k celkové měrné normalizované aktivitě v 1 kg či litru živočišného produktu, který je třeba přičíst k pravé straně výrazu (5.10).

Měrná normalizovaná aktivita nuklidu \underline{n} v 1 litru či kg živočišného produktu \underline{b} je pak dána vztahem (5.11).

Konkretizujme další postup pro \underline{b} = mléko. Podle tab.č.5.5 se z mléka vyrábí celkem 4 skupiny mléčných potravin \underline{p} charakterizovaných frakcí f_l a dobou zdržení ke konzumaci t_{zdp} .

K výpočtu integrálního příjmu normalizované aktivity nuklidu \underline{n} v důsledku potravin vyrobených z produktu \underline{b} (mléko) jsou dány vztahy (5.13) a (5.14), kde vzhledem specifičnosti zkrmování pícnin je třeba uvažovat integraci ode dne:

$$t_{kp} = \max \{t_{spd}; t_{krm}\} + t_{zdp}$$

t_{zdp} - viz tab.č.5.5
 t_{krm} - počátek zkrmování

Kontaminace sena a senáže:

2/3 sena a senáže se vyrobí z pícnin 1. seče, 1/3 z pícnin 2. seče. Zkrmování sena začíná v zimním období (15.10.).

Příslušné vzorce pro měrnou normalizovanou aktivitu radionuklidu \underline{n} pro uvažovaný případ spadu uvnitř vegetačního období pícnin 1. seče pro měrnou normalizovanou aktivitu prvku \underline{n} v seně z 1. seče v čase $t' > 288$ (t.zn. 15.10.) dostaneme ze vzorců (5.16) a (5.17):

$${}^1\mathcal{E}_{seno}^n(t') = \left[{}^L\mathcal{E}_l^n(t_{skl}^I) + {}^K\mathcal{E}_l^n(t_{skl}^I) \right] \cdot \exp\left[-\lambda^n \cdot (t' - t_{skl}^I)\right] \cdot S_{seno} \quad (5.29)$$

l index pícnin 1. seče

S_{seno} faktor, udávající kolik kg zelené píce připadá na 1 kg sena.
 Bere se z údajů z [11.3-24], kde frakce suché hmoty v zelené píci je 0,18, v senáži 0,45 a v senu 0,72.
 Pak platí : $S_{seno} = 0,72 / 0,18 = 4$

Pro seno ze 2. seče se použije vztah (5.17) (zde za t^* dosadíme t') a pak platí:

$${}^2\mathcal{E}_{seno}^n = {}^K\mathcal{E}_{l+1}^n(t') \cdot S_{seno} \quad (5.30)$$

Celkový příjem aktivity nuklidu \underline{n} při zkrmování sena v zimním období je:

$$A_{seno}^n(t') = \left[2 / 3 \cdot {}^1\mathcal{E}_{seno}^n(t') + 1 / 3 \cdot {}^2\mathcal{E}_{seno}^n \right] \cdot PDK_{seno} \quad (5.31)$$

Tolik ke konkrétním tvarům rovnic příslušným době spadu v 1. vegetačním období pícnin. Algoritmus samozřejmě zahrnuje všechny možnosti doby spadu vzhledem ke všem vegetačním obdobím pícnin.

5.2.2 Dynamické modelování přenosu radionuklidů potravními řetězci pro případ normálního provozu

Předchozí popis přenosu radionuklidů představuje obecný algoritmus pro konkrétní dobu spadu (libovolný den v roce). Tento algoritmus je přímo použitelný pro analýzu následků různých typů krátkodobých úniků mimořádného charakteru a byl zabudován do systému HAVAR [17]. V [27] byla pomocí systému HAVAR prováděna srovnání dílčích výsledků pro různé doby spadu v roce, odkud vyplynula značná závislost na relaci doby spadu k vegetačním periodám jednotlivých plodin a dobám jejich sklizně. Významnou úlohu zde hraje fakt dominantní role transportu radionuklidů listovou cestou ve srovnání s kořenovým transportem.

Při posuzování důsledků normálního provozu na okolí je třeba vzít v úvahu další specifické rysy. V okolí zdroje dlouhodobých byt' nepatrných výpustí radionuklidů musíme vycházet z faktu, že celý okolní ekosystém je jakoby ponořen do prostředí modifikovaného kontinuálními výpustěmi, přičemž produkce potravinových produktů probíhá obvyklým způsobem.

Prvním základním problémem je nalézt způsob, jak modelovat kontinuální dlouhodobé výpusti v případě normálního provozu jaderného zařízení pro účely realistického popisu následného transportu radionuklidů potravními řetězci. Jednou z možností je diskretizace kontinuálních výpustí do určitého počtu jednorázových výpustí (na příklad jednorázový únik v každém měsíci, tedy 12 úniků v součtu představující celkový roční kontinuální únik).

Do systému NORMAL je zabudován realističtější způsob umožňující modelovat již zmíněné kontinuální dlouhodobé ponoření v kontaminovaném prostředí. Vývoj modelu proběhl ve dvou paralelních směrech. V prvním případě byla sledována cesta analogická s případem havarijního spadu, kdy počítané integrální aktivity přijímané organismem jsou normalizovány na jednotkové depozice radionuklidů. Logičtější a jednoznačnějším je potom druhý způsob, kdy integrální aktivity jsou normalizovány na jednotkovou rychlost depozice, přičemž je prováděno podrobné časové modelování depozice na listech i na půdě. Oba způsoby dále ve stručnosti zmíníme, přičemž úvahy platí pro všechny nuklidy s výjimkou H3 a C14 (jejich specifické chování je popsáno v závěrečné části této kapitoly).

A. Výpočet integrálních aktivit normalizovaných na jednotku depozice

Vychází se z faktu, že atmosférický model systému NORMAL umožňuje získat na základě dlouhodobé povětrnostní statistiky detailní prostorový i časový odhad přízemní objemové aktivity a depozice všech uvažovaných radionuklidů. Podle použitého dynamického modelu je celkový příjem aktivity $A_l^{a,n}(x,y;t)$ v [Bq] radionuklidu \underline{n} jedincem z věkové kategorie \underline{a} konzumujícím produkt \underline{l} vypěstovaný v místě spadu (x,y) ke dni t vyjádřen vztahem (5.2). Zde $\Omega_0^n(x,y;t_{spad})$ značí depozici v místě (x,y) v důsledku suchého vypadávání a vymývání radionuklidu \underline{n} v [Bq/m²] a je vztaženo ke dni spadu t_{spad} . Druhou veličinou na pravé straně výrazu (5.2) je $I\mathcal{E}_l^{a,n}(t)$, což je integrální normalizovaný příjem aktivity v [m²] nuklidu \underline{n} v důsledku konzumace produktu \underline{l} jedincem z věkové kategorie \underline{a} za dobu od spadu ke dni t .

Adaptace dynamického modelu transportu radionuklidů ingesční cestou na případ dlouhodobého normálního provozu jaderného zařízení spočívá v následujících modifikacích:

- Ponoření ekosystému do prostředí ovlivňovaného kontinuálními výpustěmi znamená, že usazenou aktivitu Ω v době sklizně produktu l lze určit analogicky vztahu (3.24) podle

$$\bar{\Omega}_k^n(t, x) = \bar{S}_k^n(x) \cdot \left[1 - \exp\left(-\lambda_{ef}^n \cdot \delta T_l^{skl}\right) \right] / \lambda_{ef}^n \quad (5.32)$$

kde δT_l^{skl} je doba od úplného počátku provozu jaderného zařízení do doby sklizně produktu l (v 1. resp. dalších vegetačních periodách po zahájení provozu)

- Zůstává v platnosti vztah (5.3) pro výpočet druhé veličiny $I\mathcal{E}_l^{a,n}(t)$. Také pro normalizované měrné aktivity v produktu l pro listovou resp. kořenovou cestu platí beze změny vztahy (5.6) resp. (5.9). V nich se však ${}^L\mathcal{E}_l^n(t_{skl})$ resp. ${}^K\mathcal{E}_l^n(t_{skl})$ počítá podle rovnic (5.5) resp. (5.8), ve kterých se doba spadu ztotožní vždy s dobou sklizně konkrétního produktu l . V programu se pro každý produkt dosazuje s půldenní diferencí :

$$t_{spd} \Rightarrow t_{spd}^l = t_{skl}^l - 0.5 \quad (5.33)$$

Poznamenejme, že pro konkrétní konzervativní výpočty lze použít předpokladu, že ve všech vegetačních periodách je dosaženo stejné rovnovážné depozice nuklidu na povrchu podle:

$$\bar{\Omega}_k^n(t, x) = \bar{S}_k^n(x) / \lambda_{ef}^n \quad (5.34)$$

Pro nuklidy s dlouhým poločasem rozpadu je možno použít hodnoty podle:

$$\bar{\Omega}_k^n(t, x) = \bar{S}_k^n(x) \cdot \left[1 - \exp\left(-\lambda_{ef}^n \cdot TP\right) \right] / \lambda_{ef}^n \quad (5.35)$$

kde TP je celková předpokládaná životnost jaderného zdroje.

Zmíníme se ještě o jedné modifikaci algoritmu, která umožňuje vzít v úvahu odlišný mechanismus usazování radionuklidů na rostlinách v případě krátkodobého (z hlediska délky vegetační periody) havarijního spadu na jedné straně a dlouhodobého kontinuálního usazování při normálním provozu na straně druhé. Důležitost takové analýzy vyplývá z faktu o dominantní úloze listové cesty v době rozvinutého vegetačního období ve srovnání s kořenovým transportem. Frakce radionuklidu usazená na listech je pro případ havarijního spadu dána vztahem (5.4). V případě dlouhodobého normálního provozu však dochází k usazování na listech během celé vegetační periody, nicméně vzhledem k celkové době provozu zařízení se jedná zjevně o malou část. Usazování radionuklidu na rostoucích listech během vegetační periody konkrétního produktu lze popsat analogicky s (3.22) rovnicí:

$$\frac{d}{dt} \left({}^L\bar{\Omega}_k^n(t, x) \right) = \bar{R}^l \cdot \bar{S}_k^n(x) - \lambda_{ef}^n \cdot {}^L\bar{\Omega}_k^n(t, x) \quad (5.36)$$

Zde střední hodnota listové frakce \bar{R}^l se počítá podle vztahu (5.4) při určitém zjednodušujícím předpokladu (na příklad střední R nebo R odpovídající době sklizně a pod.). Řešením (5.36) je pak nalezen váhový faktor :

$$f_{list}^l = 1 - \exp \left[-\lambda_{ef}^n \cdot \Delta t_{veg}^l \right] \quad (5.37)$$

kterým se pak přenásobuje původně vypočtená listová frakce podle (5.4) (vztažena k době sklizně produktu). Δt_{veg}^l je délka vegetační periody produktu l . Tento postup snižuje míru konzervatismu pro nuklidy s delším poločasem rozpadu.

B. Výpočet integrálních aktivit normalizovaných na jednotkový depoziční příkon

Detailnější modelování časového průběhu depozice na rostlinách v průběhu vegetačního období dovolí snížit některé předchozí konzervativní předpoklady a dále umožní realisticky zahrnout jak běžné režimy výkrmu hospodářských zvířat tak kontinuální zkrmování.

Celkový příjem aktivity $A_l^{a,n}(x,y;t)$ v [Bq] radionuklidu n jedincem z věkové kategorie a konzumujícím produkt l vypěstovaný v místě spadu (x,y) ke dni t je nyní na rozdíl od původního výrazu (5.2) vyjádřen vztahem:

$$A_l^{a,n}(x,y;t) = \bar{S}^n(x,y) \cdot I\mathcal{E}_l^{a,n}(t) \quad (5.38)$$

$\bar{S}^n(x,y)$ střední rychlost depozice v místě (x,y) v důsledku suchého vypadávání a vymývání radionuklidu [Bq.m⁻².s⁻¹] - viz vztah (3.21)
 $I\mathcal{E}_l^{a,n}(t)$ integrální normalizovaný (na jednotkovou depoziční rychlost) příjem aktivity nuklidu n v důsledku konzumace produktu l jedincem z věkové kategorie a za dobu od spadu ke dni t [m².s]; způsob výpočtu této veličiny pro listovou a kořenovou cestu je naznačen dále

a) Listová cesta

Dynamika zachycování radionuklidů na listové části rostliny musí zohledňovat následný listový transport do rostliny v závislosti na pokročilosti vegetačního období - viz faktor Z vyjádřený vztahem (5.7). Měrná aktivita ε_l^n nuklidu n v [m².s.kg⁻¹] (normalizovaná na jednotkovou rychlost depozice) kumulovaná v rostlině l v důsledku depozice na listové části rostliny od počátku vegetačního období t_{veg1}^l do dne t_{skl}^l se vyjádří vztahem:

$$\varepsilon_l^n(t_{skl}^l) = \frac{1}{V_c^l} \cdot \sum_{ti=tveg}^{ti=tskl} SP_i^n \cdot R^l(ti) \cdot Z(ti) \cdot \exp \left[-(\lambda_l + \lambda^n) \cdot (t_{skl}^l - ti) \right] \quad (5.39a)$$

V_c^l čistý výnos produktu l v čerstvém stavu v okamžiku sklizně v kg/m² –

- viz. tab. č. 5.1
- SP_i^n převodní koeficient [s] pro denní depozici ve dni t_i ;
pro jednotkovou vteřinovou rychlost depozice platí: $SP = 86\,400 \cdot 1.0$ s
- $R^l(t_i)$ frakce spadu ve dni t_i usazená na listové části rostliny l viz vztah (5.4)
- $Z(t_i)$ faktor zohledňující závislost transportu listovou cestou do rostliny
na pokročilosti vegetačního období – viz vztah (5.7)
- λ_l konstanta odstranění nuklidu z povrchu rostliny povětrnostními vlivy (d^{-1}) –
podrobněji komentář ke vztahu (5.6)
- λ^n konstanta radioaktivního rozpadu (d^{-1})

Poznámka k přenosu aktivity do rostliny z depozice na listové části:

Pro rostliny, u nichž jsou konzumovány nebo zkrmovány pouze některé jejich části, musí být zohledněn transport aktivity usazené na listech do těchto jedlých částí. Pro tento účel jsou určovány t. zv. přenosové (translokační) faktory, které silně závisejí na mobilitě radionuklidu v rostlině, typu rostliny a časové diferenci mezi depozicí a sklizní. Tyto koeficienty reprezentují frakci aktivity deponované na listech, která přejde do jedlých částí rostliny. Pro prvky s nízkou mobilitou (na př. stroncium, bariem, plutonium) jsou přenosové koeficienty velmi nízké, a proto se uvažuje pouze přímá depozice na jedlé části. Pro mobilní radionuklidy (typickými představiteli jsou na př. Cs, I, Mg, Te) jsou prováděna rozsáhlá měření a jsou k dispozici hrubé časové průběhy přenosových koeficientů pro nejdůležitější typy rostlin. V projektu RODOS je příslušná úloha ještě dále zobecněna pro bližší rozlišení podle typů radioekologických zón. Z tohoto hlediska je zřejmé, že shora použitý koeficient $Z(t_i)$ je pouze přibližné konzervativní vyjádření efektu translokace z listové části. Nová a podrobnější experimentální data naznačují též další směr vývoje dynamického modelování potravních řetězců v systému NORMAL ve směru zpřesněného zahrnutí translokačních mechanismů s respektováním typu mobility radionuklidů a dalších specifických rysů (na příklad zřetřování původně kumulované aktivity v rostlině při dalším nárůstu biomasy – growth dilution rates).

Měrná normalizovaná aktivita v rostlině v čase t^* po sklizni se vypočte podle:

$$\varepsilon_l^n(t^*) = \varepsilon_l^n(t_{skl}^l) \cdot \exp(-\lambda^n \cdot (t^* - t_{skl}^l)) \quad (5.39b)$$

Integrální příjem normalizované aktivity v [$m^2 \cdot s$] za dobu od počátku konzumace t_{zd}^l (zdržení ke konzumaci od konce sklizně – viz tab. 5.1) do dne t_{konz}^l je dán buď integrací podle vztahu (5.3) pro přímou konzumaci člověkem nebo sumací po dnech podle (5.10) pro zkrmování. V prvním případě dostaneme analytický výraz:

$$I\varepsilon_l^{a,n}(t_{konz}^l) = \varepsilon_l^n(t_{skl}^l) \cdot PD_l^a \cdot \frac{1}{\lambda^n} \cdot [\exp(-\lambda^n \cdot t_{zd}^l) + \exp(-\lambda^n \cdot (t_{konz}^l - t_{skl}^l))] \quad (5.39c)$$

Zde PD_l^a je denní spotřeba produktu l pro jedince z věkové kategorie a (výpočet na základě hodnot z tab. 5.2).

b) Kořenová cesta

Depozici radionuklidu n (normalizovanou k jednotkové rychlosti depozice) na půdě v [s] v okamžiku sklizně vyjádříme vztahem:

$$\Omega_l^n(t_{skl}^l) = \Omega_l^n(t_{veg}^l) + \sum_{ti=tveg}^{ti=tskl} SP_i^n \cdot (1-R^l(ti)) \cdot \exp[-(\lambda_2 + \lambda^n) \cdot (t_{skl}^l - ti)] \quad (5.40a)$$

přičemž normalizovanou depozici na půdě pro začátek vegetační periody produktu t_{veg}^l vyjádříme zjednodušeně na základě depozice v minulé době jako:

$$\Omega_l^n(t_{veg}^l) = \frac{86400}{\lambda_2 + \lambda^n} \cdot [1 - \exp(-(\lambda_2 + \lambda^n) \cdot (t_{veg}^l + M \cdot 365))] \quad (5.40b)$$

Předchozí výraz aproximuje depozici v [s] (normalizovanou na jednotkovou vteřinovou rychlost usazování) za předchozích M roků plus příspěvek od počátku běžného roku do dne t_{veg}^l (počátku vegetační periody produktu l). Přitom je uvažován radioaktivní rozpad i odstraňování nuklidu z kořenové zóny vyjádřené konstantami λ^n resp. λ_2 vyjádřenými v d^{-1} .

Poznámka ke konstantám odstranění nuklidů:

- Konstanta odstraňování nuklidů z listové části povětrnostními vlivy λ_1^n se bere ekvivalentní poločas setrvání $T_B = 25$ dní na listové části rostliny. Odpovídající λ_1^n má tedy hodnotu $\ln 2/T_B$ (den^{-1}) = $2.77E-2$.
- Konstanta λ_2 vyjadřuje 2 efekty odstraňování nuklidu z kořenové zóny, a to v důsledku migrace ven a fixace nuklidu v půdě. Zde je uvažován zjednodušený model migrace radionuklidů v obdělávané půdě (30 cm orné vrstvy) podle kódu PC CREAM: $k_{11} = \lambda_s^n = 6.97E-3$ (rok^{-1}) = $1.91E-5$ (d^{-1}) ($T_{1/2} \approx 99$ roků). Jiné prameny doporučují hodnotu migrace 4% za rok ($T_{1/2} \approx 16.8$ roků). Fixace v kořenové zóně je podrobněji popsána pro nuklidy Cs a Sr. Jsou doporučeny hodnoty $\lambda_f^n = 2.2E-4$ (den^{-1}) pro Cs a $\lambda_f^n = 9.0E-5$ (den^{-1}) pro Sr.

Na základě metody rovnovážných koncentračních faktorů použité ve vztahu (5.8) je měrná normalizovaná aktivita v [$m^2 \cdot s \cdot kg^{-1}$] nuklidu n v produktu l (v důsledku absorpce kořenovým systémem) v době sklizně brána podle:

$${}^K \varepsilon_l^n(t_{skl}^l) = \Omega_l^n(t_{skl}^l) \cdot BV_l^n / PH_l \quad (5.41a)$$

BV_l^n koncentrační faktor [Bq/kg rostliny l / Bq/kg půdy] - tabelován v tab.č. 5.3

PH_l tzv. efektivní povrchová hustota pro kořenovou zónu [kg/m^2] - závisí na vegetační periodě; použily se hodnoty 65 pro 1. vegetační periodu, 195 (150 pro pícniny) ve 2. vegetační periodě, 325 (240) ve 3. vegetační periodě

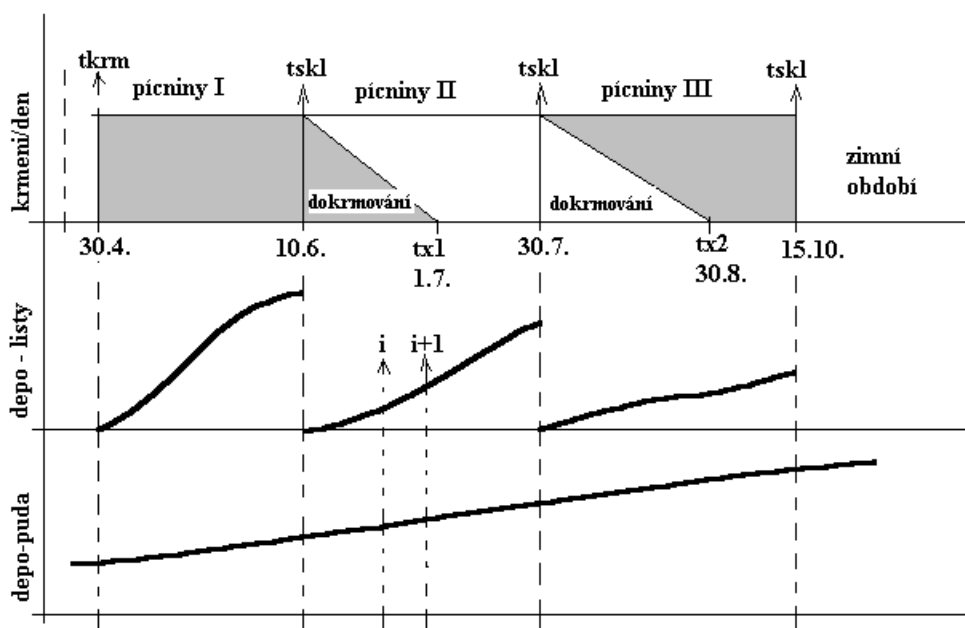
Měrná aktivita v důsledku kořenového transportu v rostlině v čase t^* po sklizni se vypočte podle:

$${}^K \varepsilon_i^n(t^*) = {}^K \varepsilon_i^n(t_{skl}^l) \cdot \exp(-\lambda^n \cdot (t^* - t_{skl}^l)) \quad (5.41b)$$

Analogicky s listovou cestou se počítá integrální příjem aktivity normalizovaný k jednotkovému vteřinovému spadu i pro cestu kořenovou.

Shora popsáný algoritmus lze rozšířit i na časově proměnné rychlosti depozice. V tomto případě je třeba adekvátně zadat hodnoty SP_i pro jednotlivé dny (tento postup byl použit pro modifikaci systému NORMAL pro případ zavlažování kontaminovanou vodou).

Algoritmus popsáný shora v této kapitole je použit na plodiny jednorázově sklizené (plodiny 1 až 10 z tabulky 5.1. Lze jej použít i pro pícniny, pokud se užije scénář výkrmu jednorázově sklizenou píčí z každé seče. Neplatí však pro druhý extrémní případ kontinuálního spásání píce. Tento problém je řešen pro případ jednorázového spadu v předchozí kapitole (viz obrázek 5.2) a je vyjádřen vztahy (5.16) až (5.31). Zde dále naznačíme modifikaci tohoto přístupu pro případ kontinuálního usazování radionuklidů během všech tří vegetačních period pícnin. Scénář výkrmu nyní definujeme podle obrázku 5.3



Obr. 5.3: Kontinuální výkrm skotu a modelování vývoje depozice pro případ pícnin I, II, III

Kontinuální spad s jednotkovou rychlostí depozice během celého roku budeme modelovat jako spad po dnech, přičemž uvažujeme rozsah dnů rozdělený na následující 4 fáze:

FÁZE 1: první vegetační období pícnin I pro $t \in < t_{krm} ; t_{skl}^I >$

Předpoklad: Zkrmování zelené píce začíná 30.4. ve dni t_{krm} (konzervativní předpoklad), denní krmná dávka necht' se realizuje spásáním čerstvé kontaminované píce v příslušném dni

Deponovaná normalizovaná aktivita v [s] na listech ve dni t_{i+1} :

$${}^L\Omega_n^I(t_{i+1}) = {}^L\Omega_n^I(t_i) \cdot \exp\left[-(\lambda_1 + \lambda^n) \cdot (t_{i+1} - t_i)\right] + SP_i^n \cdot R^I(t_{i+1}) \quad (5.42a)$$

přičemž ${}^L\Omega_n^I(t_{krm}) = 0$

Deponovaná normalizovaná aktivita v [s] na půdě ve dni t_{i+1} :

$${}^K\Omega_n^I(t_{i+1}) = {}^K\Omega_n^I(t_i) \cdot \exp\left[-(\lambda_2 + \lambda^n) \cdot (t_{i+1} - t_i)\right] + SP_i^n \cdot [1 - R^I(t_{i+1})] \quad (5.42b)$$

přičemž pro 1. krok $t_1 = t_{krm}$ je ${}^K\Omega_n^I(t_{krm})$ je vyjádřeno vztahem (5.40.b) a vyjadřuje depozici v půdě za minulá období.

Měrná aktivita v [$m^2 \cdot s \cdot kg^{-1}$] v píci seče I (normalizovaná na jednotkovou rychlost depozice nuklidu n) ve dni t_{i+1} je dána součtem od listové a kořenové cesty jako:

$$\varepsilon_I^n(t_{i+1}) = \frac{1}{V_c^I(t_{i+1})} \cdot {}^L\Omega_n^I(t_{i+1}) + {}^K\Omega_n^I(t_{i+1}) \cdot BV_I^n / PH_I \quad (5.43)$$

kde pro výnos plodiny ve dni t_{i+1} použijeme lineární průběh $V_c^I(t_{i+1}) = V_c^I(t_{skl}^I) \cdot (t_{i+1} - t_{veg}) / \Delta t_{veg}^I$. Význam všech použitých symbolů je definován u předchozích výrazů s tím, že index rostliny I je zaměněn indexem sklizně píce I.

FÁZE 2: druhé vegetační období pícnin II pro $t \in < t_{skl}^I ; t_{skl}^{II} >$

Předpoklad: pro $t \in < t_{skl}^I ; t_{x1} >$ se zvíře dokrmuje podle obr. 5.3 senáží ze seče I (lineární pokles až do t_{x1}); zbytek do konstantní denní dávky se realizuje denním spásáním narůstající kontaminované seče II; pro $t \in < t_{x1} ; t_{skl}^{II} >$ se celá denní krmná dávka realizuje spásáním čerstvé kontaminované píce druhé seče v příslušném dni; je zřejmé, že volbou $t_{x1} = t_{skl}^I$ se scénář převádí na předchozí popis pro fázi 1

Deponovaná normalizovaná aktivita v [s] na listech ve dni t_{i+1} :

$${}^L\Omega_n^{II}(t_{i+1}) = {}^L\Omega_n^{II}(t_i) \cdot \exp\left[-(\lambda_1 + \lambda^n) \cdot (t_{i+1} - t_i)\right] + SP_i^n \cdot R^{II}(t_{i+1}) \quad (5.44a)$$

přičemž ${}^L\Omega_n^{\text{II}}(t_1) = 0$

Deponovaná normalizovaná aktivita v [s] na půdě ve dni t_{i+1} :

$${}^K\Omega_n^{\text{II}}(t_{i+1}) = {}^K\Omega_n^{\text{II}}(t_i) \cdot \exp[-(\lambda_2 + \lambda^n) \cdot (t_{i+1} - t_i)] + SP_i^n \cdot [1 - R^{\text{II}}(t_{i+1})] \quad (5.44b)$$

přičemž pro 1. krok t_1 platí ${}^K\Omega_n^{\text{II}}(t_1) = {}^K\Omega_n^{\text{I}}(t_{\text{skl}}^{\text{I}})$ (viz vztah 5.42b)

Měrná aktivita v $[\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}]$ v pící seče II (normalizovaná na jednotkovou rychlost depozice nuklidu \underline{n}) ve dni t_{i+1} je dána součtem od listové a kořenové cesty jako

a) pro $t_{i+1} \in (tx_1; t_{\text{skl}}^{\text{II}} > :$

$$\varepsilon_{\text{II}}^n(t_{i+1}) = \frac{1}{V_c^{\text{II}}(t_{i+1})} \cdot {}^L\Omega_n^{\text{II}}(t_{i+1}) + {}^K\Omega_n^{\text{II}}(t_{i+1}) \cdot BV_{\text{II}}^n / PH_{\text{II}} \quad (5.45a)$$

kde pro výnos plodiny píče II ve dni t_{i+1} použijeme opět lineární průběh $V_c^{\text{II}}(t_{i+1}) = V_c^{\text{II}}(t_{\text{skl}}^{\text{II}}) \cdot (t_{i+1} - t_{\text{veg}}^{\text{II}}) / \Delta t_{\text{veg}}^{\text{II}}$.

b) pro $t_{i+1} \in (t_{\text{skl}}^{\text{I}}; tx_1 > :$

$${}^{\text{mix}}\varepsilon_{\text{II}}^n(t_{i+1}) = \varepsilon_{\text{II}}^n(t_{i+1}) \cdot f_{\text{mod}}(t_{i+1}) + \varepsilon_{\text{I}}^n(t_{\text{skl}}^{\text{I}}) \cdot \exp(-\lambda^n \cdot (t_{i+1} - t_{\text{skl}}^{\text{I}})) \cdot (1 - f_{\text{mod}}(t_{i+1})) \quad (5.45b)$$

$$\text{zde} \quad f_{\text{mod}}(t_{i+1}) = \frac{t_{i+1} - t_{\text{skl}}^{\text{I}}}{tx_1 - t_{\text{skl}}^{\text{I}}} \quad (5.46c)$$

FÁZE 3: třetí vegetační období pícnin III pro $t \in < t_{\text{skl}}^{\text{II}}; t_{\text{skl}}^{\text{III}} >$

Předpoklad: pro $t \in < t_{\text{skl}}^{\text{II}}; tx_2 >$ se zvíře dokrmuje podle obr. 5.3 senáží z seče II (lineární pokles až do tx_2); zbytek do konstantní denní dávky se realizuje denním spásáním narůstající kontaminované seče III; pro $t \in < tx_1; t_{\text{skl}}^{\text{III}} >$ se celá denní krmná dávka realizuje spásáním čerstvé kontaminované píče třetí seče v příslušném dni; je zřejmé, že volbou $tx_2 = t_{\text{skl}}^{\text{II}}$ se scénář převádí na předchozí popis pro fázi 1

Deponovaná normalizovaná aktivita v [s] na listech ve dni t_{i+1} :

$${}^L\Omega_n^{\text{III}}(t_{i+1}) = {}^L\Omega_n^{\text{III}}(t_i) \cdot \exp[-(\lambda_1 + \lambda^n) \cdot (t_{i+1} - t_i)] + SP_i^n \cdot R^{\text{III}}(t_{i+1}) \quad (5.47a)$$

přičemž ${}^L\Omega_n^{\text{III}}(t_1) = 0$

Deponovaná normalizovaná aktivita v [s] na půdě ve dni t_{i+1} :

$${}^K\Omega_n^{\text{III}}(t_{i+1}) = {}^K\Omega_n^{\text{III}}(t_i) \cdot \exp[-(\lambda_2 + \lambda^n) \cdot (t_{i+1} - t_i)] + SP_i^n \cdot [1 - R^{\text{III}}(t_{i+1})] \quad (5.47b)$$

přičemž pro 1. krok t_1 platí ${}^K\Omega_n^{III}(t_1) = {}^K\Omega_n^{II}(t_{skl}^{II})$ (viz vztah 5.44b)

Měrná aktivita v $[m^2 \cdot s \cdot kg^{-1}]$ v pící seče III (normalizovaná na jednotkovou rychlost depozice nuklidu n) ve dni t_{i+1} je dána součtem od listové a kořenové cesty jako

a) pro $t_{i+1} \in (tx_2; t_{skl}^{III} > :$

$$\varepsilon_{III}^n(t_{i+1}) = \frac{1}{V_c^{III}(t_{i+1})} \cdot {}^L\Omega_n^{III}(t_{i+1}) + {}^K\Omega_n^{III}(t_{i+1}) \cdot BV_{III}^n / PH_{III} \quad (5.48a)$$

kde pro výnos plodiny píce III ve dni t_{i+1} použijeme opět lineární průběh $V_c^{III}(t_{i+1}) = V_c^{III}(t_{skl}^{III}) \cdot (t_{i+1} - t_{veg}^{III}) / \Delta t_{veg}^{III}$.

b) pro $t_{i+1} \in (t_{skl}^{II}; tx_2 > :$

$${}^{mix}\varepsilon_{III}^n(t_{i+1}) = \varepsilon_{III}^n(t_{i+1}) \cdot f_{mod}(t_{i+1}) + \varepsilon_{II}^n(t_{skl}^{II}) \cdot \exp(-\lambda^n \cdot (t_{i+1} - t_{skl}^{II})) \cdot (1 - f_{mod}(t_{i+1})) \quad (5.48b)$$

$$\text{zde} \quad f_{mod}(t_{i+1}) = \frac{t_{i+1} - t_{skl}^{II}}{tx_2 - t_{skl}^{II}} \quad (5.48c)$$

FÁZE 4: období zimního výkrmu pro $t > t_{skl}^{III}$

Předpoklad: V zimním období se zkrmuje seno a senáž (viz. tabulku 5.6 pro krmné dávky skotu); 2/3 pocházejí přitom z píce ze seče I a 1/3 ze seče II.

Řešení pro tento případ je zcela analogické vztahům (5.29) až (5.31), do nichž se dosazují příslušné nově stanovené měrné normalizované aktivity ze vzorců (5.42) a (5.45a).

5.2.3 Zahrnutí izotopů C-14 a H-3 do dynamického modelu transportu radionuklidů potravními řetězci

Příjem aktivity ingesční cestou pro radionuklidy usazující se na zemském povrchu se obecně počítá podle vztahu (5.2). Výjimku tvoří nuklidy C-14 a H-3, které se do rostlin dostávají jako důsledek procesu fotosyntézy.

Celkový příjem aktivity $A_l^{a,C14}(x, y; t)$ v [Bq] radionuklidu C-14 jedincem z věkové kategorie a konzumujícím produkt l vypěstovaný v místě spadu (x, y) ke dni t vyjádřen vztahem:

$$A_l^{a,C14}(x, y; t) = C^{C14}(x, y; z = 0) \cdot I\mathcal{E}_l^{a,C14}(t) \quad (5.49)$$

Zde:

$C^{C14}(x, y; z = 0)$ dlouhodobá přízemní koncentrace radionuklidu C-14 v $[Bq/m^3]$

$I\mathcal{E}_l^{a,C14}(t)$ integrální normalizovaný příjem aktivity nuklidu C-14 v důsledku konzumace

produktu l jedincem z věkové kategorie a za dobu od spadu ke dni t [m^3]
Platí:

$$I\mathcal{E}_l^{a,C14}(t) = \int_{t_{skl}+t_{zd}}^t \mathcal{E}_l^{C14}(t') \cdot PD_l^a \cdot dt' \quad (5.50)$$

PD_l^a je průměrná denní spotřeba produktu l jedincem z věkové kategorie a
[kg/d resp. l/d]

$\mathcal{E}_l^{C14}(t')$ normalizovaná (na jednotku přízemní objemové aktivity) měrná aktivita
nuklidu C-14 v produktu l (na jednotku hmotnosti produktu l)
ke dni t' [$m^3 \cdot kg^{-1}$]

t_{skl} den sklizně [d]- juliánské datum

t_{zd} zdržení od sklizně ke konzumaci produktu l [d]

Izotop C-14 se uvolňuje jako kysličník (CO , CO_2) a do rostlin se dostává na základě fotosyntézy. V U.S. Nuclear Regulatory Guide 1.109 je navržen zjednodušený postup výpočtu spočívající v předpokladu, že v rostlinném produktu se ustaví stejný poměr rovnovážných koncentrací C-14 a přírodního C-12 jako v přízemní vrstvě vzduchu, tedy:

$$\frac{N_{prod}^{C14}}{N_{prod}^C} = \frac{N_{air}^{C14}}{N_{air}^C} \quad (5.51)$$

N_{prod}^{C14} , N_{prod}^C ... počet jader izotopů uhlíku v 1 kg produktu

N_{air}^{C14} , N_{air}^C počet jader izotopů uhlíku v 1 m^3 vzduchu (přízemní vrstva)

Vyjádříme hodnoty N_{prod}^C a N_{air}^C pomocí počtu jader v 1 kg uhlíku N^{av} jako:

$$N_{prod}^C = N^{av} \cdot FR^C, \quad N_{air}^C = N^{av} \cdot G^C$$

FR^C frakce uhlíku v rostlinných produktech (použita doporučená hodnota $FR^C = 0.11$)

G^C přirozená koncentrace uhlíku v atmosféře ($G^C = 0.00016 \text{ kg} \cdot m^{-3}$).

Dosazením do předchozích zlomků a jejich vynásobením rozpadovou konstantou pro C-14 se dostane hledaný přibližný vztah pro měrnou normalizovanou koncentraci aktivity izotopu C-14 v 1 kg produktu l [$m^3 \cdot kg^{-1}$]:

$$\mathcal{E}_l^{C14} = 1 \cdot \frac{FR^C}{G^C} \quad (5.52)$$

Pro radionuklid H-3 je uvažován analogický postup s tím rozdílem, že pro rovnovážnou koncentraci H-3 vzhledem k celkovému obsahu H v rostlinách se bere polovina rovnovážné koncentrace H-3 v atmosférické vodě. Analogicky ke vztahu (5.51) se tedy definuje:

$$\frac{N_{prod}^{H3}}{N_{prod}^H} = 0.5 \cdot \frac{N_{air}^{H3}}{N_{air}^H} \quad (5.53)$$

Předpokládejme dále, že u všech rostlinných produktů se podílí voda frakcí p_{H2O} na celkové hmotnosti rostlinného produktu (doporučena hodnota $p_{H2O} = 0.75$). Průměrnou vlhkost vzduchu za vegetační období označíme h_{H2O} (je doporučována hodnota $0.00018 \text{ kg H}_2\text{O}$ v 1 m^3 vzduchu). Podobnou úvahou jako u izotopu C-14 dostaneme přibližné vyjádření pro měrnou normalizovanou aktivitu izotopu H-3 v 1 kg produktu l [$m^3 \cdot kg^{-1}$]:

$$\mathcal{E}_l^{H3} = 0.5 \cdot \frac{P_{H2O}}{h_{H2O}} \quad (5.54)$$

Pro měrnou normalizovanou aktivitu izotopu \underline{l} (C-14 nebo H-3) v 1 kg rostlinného produktu v čase $t' > t_{skl}^l$ je vyjádřen jako:

$$\mathcal{E}_l^i(t') = \mathcal{E}_l^i(t_{skl}^l) \cdot \exp[-\lambda^i \cdot (t' - t_{skl}^l)] \quad (5.55)$$

$\mathcal{E}_l^i(t_{skl}^l)$ je měrná normalizovaná aktivita v okamžiku sklizně produktu \underline{l} a podle přijatých předpokladů se vyjadřuje vztahy (5.52) resp. (5.54).

Roční příjem aktivity rostlinného produktu \underline{l} v důsledku jeho přímé konzumace člověkem (od počátku konzumace do doby $TING$ – značí konec konzumace a v programu se bere $TING=365$) je dán integrací podle (5.50), přičemž v tomto případě konkrétně platí:

$$I\mathcal{E}_l^{a,i}(t) = \mathcal{E}_l^i(t_{skl}^l) \cdot PD_l^a \cdot \frac{1}{\lambda^i} \cdot [\exp(-\lambda^i \cdot t_{zd}^l) - \exp(-\lambda^i \cdot (TING - t_{skl}^l))] \quad (5.56)$$

Při příjmu aktivity C-14 nebo H-3 konzumací živočišných produktů se vychází ze vztahu (5.10), v němž se dosadí místo součtu listové a kořenové cesty jediná hodnota měrné normalizované aktivity vyjádřená vztahem (5.55). Jedná se o denní příjem (ve dni t) normalizované aktivity nuklidu \underline{l} zvířetem v důsledku zkrmování produktu \underline{l} . Měrná normalizovaná aktivita nuklidu v 1 kg či litru produktu \underline{b} produkovaného zvířetem ve dni t se pak vyjadřuje podle (5.11). Výsledný integrální příjem normalizované aktivity nuklidu \underline{l} v důsledku konzumace všech potravinových produktů \underline{p} vyrobených z živočišného produktu \underline{b} se počítá podle (5.14).

Zvláštní pozornost byla věnována kontinuálnímu zkrmování pícnin, kdy jsou uvažována tři vegetační období (viz diagram uvedený v předchozí kapitole). Uvažují se příspěvky transportu obou radionuklidů C-14 a H-3 ze všech tří vegetačních fází se dalším rozlišením podle zavedeného schématu výkrmu. V každém vegetačním období se dále rozlišují další dílčí fáze:

Pro píci z vegetačního období I $< t_{veg1}^I ; t_{skl}^I >$ se rozlišují dále příspěvky od :

1. $< t_{krm} ; t_{skl}^I >$ krmení píci I s konstantní (rovnovážnou) aktivitou
2. $< t_{skl}^I ; t_{x1} >$ dokrmování píci sklizenou v I (s lineárním poklesem až do t_{x1})
v počátku veg. období II (uvažován radioaktivní rozpad nuklidu \underline{l} po sklizni)
3. $t > t_{skl}^{III}$ v zimním období se realizují 2/3 denní krmné dávky senem z úsušků z veg. období I (uvažován radioaktivní rozpad nuklidu \underline{l})

Pro píci z vegetačního období II $< t_{veg1}^{II} ; t_{skl}^{II} >$ se rozlišují dále příspěvky od :

1. $< t_{skl}^I ; t_{x1} >$ dokrmování čerstvou píci sklizenou průběžně ve období II (s lineárním nárůstem až do t_{x1})
2. $< t_{x1} ; t_{skl}^I >$ plné krmení čerstvou píci sklizenou průběžně ve období II s konstantní rovnovážnou aktivitou nuklidu \underline{l}
3. $< t_{skl}^{II} ; t_{x2} >$ dokrmování v počátku období III píci sklizenou v II (s lineárním poklesem až do t_{x2}), uvažován radioaktivní rozpad nuklidu \underline{l}

4. $t > t_{\text{skl}}^{\text{III}}$ po sklizni v období II)
 v zimním období se realizuje 1/3 denní krmné dávky senem z úsušků
 z veg. období II (uvažován radioaktivní rozpad nuklidu i po $t_{\text{skl}}^{\text{II}}$)

Pro píci z vegetačního období III $< t_{\text{veg1}}^{\text{III}} ; t_{\text{skl}}^{\text{III}} >$ se rozlišují dále příspěvky od :

1. $< t_{\text{skl}}^{\text{II}} ; t_{x2} >$ dokrmování čerstvou píci sklizenou průběžně ve období III (s lineárním nárůstem až do t_{x2}) ; konst. rovnovážná aktivita nukl. i
2. $< t_{x2} ; t_{\text{skl}}^{\text{III}} >$ plné krmení čerstvou píci sklizenou průběžně ve období III s konstantní rovnovážnou aktivitou nuklidu i

6. Závěrečné poznámky k modulární struktuře systému NORMAL

Předkládaná metodika podává přehled o použitých modelech a jejich omezeních, při čemž v některých případech jsou zmiňovány i možné další používané alternativní přístupy. Tyto alternativy se někdy mohou jevit jako důležitý nástroj pro analýzu citlivosti nebo ocenění a ilustrování vlivu zpřesnění metodiky. Jindy zase nelze jednoznačně specifikovat volbu modelu a je tedy umožněna subjektivní volba uživatele na základě online specifikace ve vstupních panelech. Tyto posledně jmenované volitelné možnosti jsou popsány v uživatelském manuálu produktu NORMAL a konkrétně se týkají hlavně:

- způsobu výpočtu disperzních parametrů
- statického nebo dynamického modelu transportu radionuklidů v potravních řetězcích
- volby typu souboru pro konverzní faktory při vnitřním ozáření
- snížení konzervativnosti výpočtů odhadem očekávaných dávek
- specifikace konečných hodnot faktorů setrvání radionuklidů na zemském povrchu resp. rostlinách

Je však zřejmé, že pro konkrétní bezpečnostní výpočty je nutné respektovat charakteristiky dané lokality a volit příslušný model nejlépe korespondující s těmito charakteristikami.

Tyto otázky nejvíce vystupují do popředí pro výpočet hodnot disperzních parametrů, jejichž poloempirické formule jsou určovány na základě měření prováděných různými laboratořemi. Výsledky měření lze v podstatě rozdělit do dvou skupin podle členitosti terénu:

- málo členitý rovinný terén
- členitý terén

V prvním případě jsou k dispozici vztahy pro rovinný terén s drsností povrchu do 1 m. Je to například zde používané Hoskerovo schéma dané výrazy (2.7). Dalším používaným přiblížením jsou poloempirické formule odvozené na základě experimentů v SCK/CEN, Mol, Belgie) s deklarovanou platností pro poměrně hladký terén západoevropského typu (opět s drsností do 1 m, měření se prováděla v jediné výšce výpustí 69 m, jednohodinové průměry).

Pro členitý terén (zástavba, lesy – drsnost nad 1m) se obecně používají vztahy (2.8), označované zde jako formule KFK. Platnost vztahů je do 10 km od zdroje exhalací, nicméně pro větší vzdálenosti se používají modifikace základního schématu (viz popis v kapitole 2.4). Jejich předností je, že byly zkonstruovány na základě detailnějších měření ve třech různých výškách výpustí.

Srovnávací analýzy ukázaly, že model KFK obecně vede k intenzivnějšímu rozptylu a vlečka škodlivin dříve dosáhne úrovně zemského povrchu. Konkrétním projevem je například fakt, že pro zadanou povětrnostní statistiku hodnoty přízemní objemové koncentrace vykazují již od první radiální vzdálenosti (660 m) od zdroje monotónní klesající průběh, zatímco u Hoskerova schématu dochází z počátku k růstu hodnot s maximem někde mezi 2. a 5. kilometrem. V blízkých vzdálenostech je tedy model KFK konzervativní, zatímco ve větších vzdálenostech vyšší hodnoty přízemních koncentrací aktivity dává model Hosker. Kvantitativní srovnání je detailně provedeno u porovnávací úlohy č. 2.

Pokud autoři předávali výsledky pro účely bezpečnostních zpráv, byl pro konkrétní lokality JE v ČR vesměs použit model KFK. Obvykle se však prováděly alternativní výpočty i s modelem HOSKER, když se prověřovaly získané výsledky srovnáním s jiným evropským programovým balíkem (podrobně viz [6], kap. 8, část III: Rámcové prověření výpočtů pro PpBZ na základě srovnání s produktem PC CREAM). Výpočty podle ostatních disperzních modelů nabízených ve vstupním panelu mají význam při analýzách neurčitostí a citlivostních studiích. Celkově lze však konstatovat, že myšlenka alternativní volby disperzního modelu pro konkrétní lokalitu na základě typu zemského povrchu, která je nabízena pro subjektivní volbu uživatele, je u jiných zahraničních kódů obvyklá (na příklad rozlišení „urban“ kontra „rural“ u produktů PC CREAM, COSYMA a RODOS).

Kromě alternativních modelů s možností jejich online volby ze vstupních panelů jsou pro některé fenomény v metodice zmiňovány možné další používané přístupy. Pro ně však zatím nebyla vypracována interaktivní podpora pro jejich online volbu a v systému NORMAL jsou pro ně použity implicitní hodnoty. Jedná se v první řadě o:

- Rychlost pohybu vlečky v základním řešení Gaussovy rovnice šíření dané vztahem (2.3). U všech alternativně nabízených disperzních modelů je použita střední rychlost pohybu vlečky po výšce na intervalu $< 10 \text{ m} ; h_{ef} >$.
- Stanovení efektivní výšky vlečky výpustí. Místo dřívějšího vztahu (2.6) se používají pro vzhos v důsledku tepelné a kinetické energie vztahy uvedené v paragrafech a) a b) kapitoly 2.3.
- Vliv blízkostojících objektů na pohyb vlečky. Používá se doporučení z [2], které je v kapitole 2.5 označeno jako model KFK.
- Hodnoty efektivní rychlosti suchého usazování a koeficienty vymývání atmosférickými srážkami, které jsou závislé na fyzikálně-chemické formě unikajících izotopů, jsou fixně zadány v databázi DBRES.DAT. Byly sice prováděny studie citlivosti, ale šlo o běhy v dávkovém módu, kdy příslušná data byla přechodně měněna manuálně.
- Vyjádření vertikálního rychlostního profilu. Je užit vztah (3.2a) s pevně zvoleným exponentem ε (tabelován v závislosti na kategoriích počasí v [1]).

7. Význam použitého indexování

- k číslo úhlového sektoru
- i číslo úseku rozdělení radiální vzdálenosti (vzdálenosti od zdroje)
- j číslo kategorie počasí
- n pořadové číslo zadávaného nuklidu
- o index orgánu či tkáně
- a věková kategorie jedince
- l index potravin, produktů uvaž. při ingesci
- m kategorie rychlosti větru
- s kategorie atmosférických srážek
- g kategorie inverzní situace
- p index cesty ozáření

8. Seznam použité literatury

- [1] Metody výpočtu šíření radioaktivních látek z JEZ a ozáření okolního obyvatelstva. ČSKAE, 5/1984. Slovenské znění normy MHS Interatomenergo.
- [2] 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.
- [3] International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. IAEA, GOV/2715, April 1994.
- [4] Methods for Estimating Atmospheric Transport and Dispersion of Gaseous Effluents in Routine Releases from Light-Water-Cooled Reactors. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.111, July 1977.
- [5] Základní část metodiky výpočtu znečištění ovzduší ze stacionárních zdrojů. EKOAIR - ČHMÚ. Listopad 1993.
- [6] Pecha P., Pechová E.: Program NORMAL na ocenění radiační zátěže obyvatelstva v okolí jaderných zařízení za normálního provozu
Část I: Metodika, arch.č. EGP 4104-6-990021, rev.1, Praha, 10/1999
Část II: Uživatelský manuál, arch.č. EGP 4104-6-980031, Praha, 1998
Část III: Srovnávací studie programových systémů NORMAL a PC CREAM, arch.č. EGP 4104-6-990022, rev. 3, 1999.
- [7] Pecha P., Pechová E.: Uživatelský manuál interaktivního systému NORMAL verze 2010 na ocenění radiační zátěže populace při normálním provozu jaderných zařízení, Arch.č.EGP 5010-F-100149, Praha, únor 2010
- [8] Pecha P., Pechová E.: Aplikace a vývoj systému NORMAL v oblasti ocenění radiační zátěže populace při normálním provozu jaderných zařízení, Arch.č.EGP 5010-F-100150, Praha, únor 2010

- [9] Pecha P.: Preprocesor geografických dat systému HAVAR, Program výzkumu a vývoje SÚJB č.6/2003, Vývoj programového vybavení pro hodnocení radiologických důsledků vážných havárií, Úkol E 01 h) a E 01 k), Arch.č. EGP 5014-F-050514, Praha, prosinec 2003
- [10] Pecha P.: Preprocesor demografických dat systému HAVAR, Program výzkumu a vývoje SÚJB č.6/2003, Vývoj programového vybavení pro hodnocení radiologických důsledků vážných havárií, Úkol E 01 l), Arch.č. EGP 5014-F-050514, Praha, duben 2004
- [11] Etapa E 01 projektu č. 6/2003 SÚJB, Průběžná zpráva o výsledcích prací, Arch.č. EGP 5014-F-030375, Příloha B4: Konverzní faktory pro příjem radionuklidů inhalací a ingescí u jednotlivců z obyvatelstva, Praha, září 2003
- [12] Pecha P. a kol.: Programový systém HAVAR-RP: Interaktivní nástroj pro analýzu radiologických důsledků mimořádných úniků radioaktivity do životního prostředí. Část I: Rozšíření metodiky systému HAVAR-RP, úkol E03 f1-II projektu VaV č.6/2003, Praha, revize březen 2008.
Část II: Uživatelský manuál systému HAVAR-RP, úkol E03 f1-I projektu VaV č.6/2003, Praha, revize březen 2008.
Část III: Aplikace systému HAVAR-RP v oblasti radiační ochrany. Srovnávací analýza, úkol E03 e, Praha, revize březen 2008.
- [13] Metodika výpočtu šíření aktivit v okolí jaderné elektrárny. Část 1 a 2. ŠKODA, K.P. PLZEŇ, Ae 5281/Dok., únor 1984.
- [14] Pecha Petr, Pechová E.: Preparation of radiological inputs for environmental impact assessment of routine normal operation of nuclear facilities , Proceedings of the International Congress ECORAD 2001, p. 1-6, IPSN France, International Congress on the Radioecology-Ecotoxicology ECORAD 2001, Aix-en Provence, FR, 2001.
- [15] Podklady pro zpracování kap. D.I.1, Obyvatelstvo a veřejné zdraví. ÚJV-EGP, arch. č. EGP 5050-F-090275, Praha, 2009.
- [16] Eckerman K.F., Ryman J.C.: External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil, Federal Guidance Report No. 12, EPA-402-93-081, ORNL, Sept.1993
- [17] The ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public, An Extension of ICRP Publications 68 and 72, Prepared by the Task Group on Dose Calculations of Committee 2 of the International Commission on Radiological Protection, Version 2.01, 2001
- [18] ISOLA V - A FORTRAN 77 Code for the Calculation of the Long-Term Concentration Distribution KfK 4604.
- [19] SMERNICE - ČASŤ I. : Meteorologické zabezpečenie. ČHÚ, SHÚ, ČEZ, SEP - Praha, 1986
- [20] A Long-Distance Air Pollution Transportation Model Incorporating Washout and Dry Deposition Components (By T. A. McMahon). Atmospheric Environment No. 9, Vol. 10, 1976.
- [21] UFOMOD: Atmospheric Dispersion and Deposition. KfK 4332, Oct. 1989.

- [22] Simmonds J.R., Lawson G., Mayall A.: Methodology for Assessing the Radiological Consequences of Routine Releases of Radionuclides to the Environment
EUR 15760 EN, 1995
- [23] PC CREAM 97: Installing and Using the PC System for Assessing the Radiological Impact of Routine Releases.
EUR 17791 EN, NRPB-SR296 (June 1997)
- [24] Muller H., Gering F., Hubner S. : Documentation on the Terrestrial Foodchain and Dose Module FDMT in RODOS P V3.01. RODOS Report WG3-TN(98)- xx, GSF, Feb. 1998
- [25] Hasemann I., Ehrhardt J. : COSYMA: Dose Models and Countermeasures for External Exposure and Inhalation.
KfK 4333, Jan. 1994
- [26] Klumpar J., Pechová E., Pecha P., Nedoma P.: Interaktivní programové prostředky hodnocení radiační zátěže populace používané při projektování jaderných zařízení. Bezpečnost jaderné energie, 6 (44), 1998
- [27] Pechová E., Pecha P., Nedoma P. : Application of PC-COSYMA code such a verification tool used in stage of NPP design.
Proceedings of the 4-th COSYMA Users Group Meeting, Prague, Sept. 22-24, 1997
- [28] RODOS: Decision Support for Nuclear Emergencies
RODOS Report R-3-1998, FZKA 6069
- [29] Crick M.J., Brown J.: EXPURT - A Model for Evaluating Exposure from Radioactive Deposit in the Urban Environment.
NRPB - R235 (1990)
- [30] Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 307/2002 Sb. zák. o radiační ochraně (ve znění platných předpisů).
- [31] Gering F. : Location Factors in RODOS .
RODOS (WG3) - TN(98), 1998
- [32] Kliment V.: Modelling of Radiocesium Foodchain Transport after the Chernobyl Accident. Jaderná energie 38, 1992, č.5 (str. 177 - 183)
- [33] Kusovská Z. a kol.: Metodika na ocenenie radiologických následkov normálnej prevádzky JEZ v ČR. Zpráva VÚJE č. 5326, 6/96
- [34] Pecha P., Nedoma P., Kárný M.: Terrestrial Food Chain and Dose Modul of RODOS: Customization for its Use in the Czech Republic.
RODOS (WG3) - TN(98) - 14, Final version July.1999
- [35] Panitz H.-J.: Accident Consequence Assessments with Different Atmospheric Dispersion Models. KfK 4445, Nov.1989
- [36] Atmospheric Dispersion Models for Application in Relation to Radionuclide Releases. IAEA-TECDOC-379, Vienna 1996
- [37] Maňák J.: Základní část metodiky výpočtu znečištění ovzduší ze stacionárních zdrojů. EKOAIR, listopad 1993
- [38] MELCOR Accident Consequence Code System (MACCS). Model Description, NUREG/CR-4691, SAND86-1562 (1990)

- [39] Raskob W., Slavik O., Fesenko S., Pecha P.,: Documentation on the two INCO working programs: "Review of the adequacy of the present foodchain and dose calculations" and "Collection of the data required for each radioecological region and their integration into RODOS". RODOS(WG3) - TN(99)-40, 2000.
- [40] Pecha P., Nedoma P., Karny M., Kuca P : Status report on RODOS accreditation for its use in Czech Republic – Local Quality Assurance Process. RODOS(WG1)-TN(98)-29, Dec. 1998, draft (final version in July,99).
- [41] Pecha P., Pechová E: Application of multi-pathway transport model for regulation of normal atmospheric radioactive discharges from nuclear facility. Proceedings of the 8th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, p. 444-450, 8th Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes /8./, (Sofia, BG, 2002).
- [42] Pecha P., Pechová E.: A dynamic food-chain algorithm for estimation of migration of radionuclides through the living environment continuously influenced by the routine atmospheric discharges from nuclear power plant. Proceedings of the 4th International Conference on Environmental Impact Assessment , *CTU, EIA /4./, Prague 2000.*
- [43] IAEA-BIOMASS-4 : Testing of environmental transfer models using Chernobyl fallout data, WG of BIOMASS Theme 2, IAEA, April 2003
- [44] Müller H., Pröhl G.: ECOSYS'87: A Dynamic Model for Assessing Radiological Consequences of Nuclear Accidents. Health Physics, Vol. 64, No. 3, 1993.
- [45] Brown J., Simmonds J. R. : FARMLAND: A Dynamic Model for the Transfer of Radionuclides through Terrestrial Foodchains. NRPB, NRPB-R273, 1995.