ENERGOPROJEKT PRAHA a.s. 170 05 Praha 7, Bubenská 1	Řídící útvar 41000	Zpracovatelský útvar 41200	Skartační znak V14
Stavba - akce Úkol technického rozvoje	Objekt-provozní soubor		Pořadové číslo 002
Název zakázky Rozvoj programů NORMAL a HAVAR na ocenění radiační zátěže obyvatelstva v okolí jaderných zařízení			Stupeň ochrany
Název dokumentace **Program NORMAL na ocenění radiační zátěže obyvatelstva v okolí jaderných zařízení za normálního provozu** TECHNICKÁ ZPRÁVA			Číslo výtisku

Vypracoval	Vedoucí zpracovatelského útvaru	Datum	Celkem listů
kolektiv	Ing. V. Talla	31.5.99-rev.:4.10.1999	80
Kontroloval	**HIP**	**Soubor**	
Ing. J. Klumpar	Ing. Č. Raisigl	002.doc	

Zpracovatelé: **Ing. P. Pecha, CSc – ÚTIA, AV ČR**
Ing. E. Pechová - 41200

Zakázkové číslo	Archivní číslo	Index	Strana
99-99999-40-065	EGP 4104-6-990021		1

Obsah

Anotace 3

1. Metodika hodnocení radiační zátěže populace v důsledku běžných rutinních výpustí radionuklidů při normálním provozu jaderného zařízení 5
2. Fyzikální modely transportu příměsí v atmosféře 7
   2.1 Matematický popis atmosférické difúze v přiblížení Gaussovy rovnice šíření .. 7
   2.2 Přímočaré šíření v termínech BOX-modelu 11
   2.3 Stanovení efektivní výšky vlečky výpustí h_{ef} 12
   2.4 Rozptylové parametry σ_y (x) a σ_z (x) 14
   2.5 Vliv blízkostojících objektů 17
   2.6 Vliv zvlnění terénu 18
   2.7 Modelování inverzní povětrnostní situace 19
   2.8 Vícenásobné odrazy na horní hranici přízemní směšovací vrstvy H_{mix} 19
   2.9 Grupa vypouštěných nuklidů a uvažování rozpadových řetězců 20
3. Dlouhodobé difúzní odhady v termínech diskrétní prostorové a meteorologické sítě 23
   3.1 Definice diskrétní prostorové sítě pro numerický výpočet 23
   3.2 Kategorizace meteorologických dat pro danou lokalitu 25
   3.3 Dlouhodobé difúzní odhady objemové aktivity nuklidů a jejich zředění v přízemní vrstvě vzduchu 27
      3.3.1 Transport ovzduším popsán Gaussovou rovnicí šíření 28
      3.3.2 Dlouhodobé odhady na základě BOX-modelu 30
   3.4 Dlouhodobé difúzní odhady aktivity nuklidů usazujících se na zemském povrchu 31
      3.4.1 Dlouhodobé FALLOUT a WASHOUT faktory 31
      3.4.2 Časový vývoj usazování aktivity nuklidů na zemském povrchu 34
4. Hodnocení radiačního zatížení obyvatelstva v důsledku úniků do atmosféry při dlouhodobém běžném provozu jaderného zařízení 36
   4.1 Metodika hodnocení radiační zátěže 36
   4.2 Radiační zátěž v důsledku různých cest ozáření 38
5. Výpočty dávkové zátěže ingesční cestou 49
   5.1 Statický model INTERATOMENERGO podle [1] 49
   5.2 Dynamické modelování transportu radionuklidů potravními řetězci do lidského organismu 50
      5.2.1 Případ krátkodobého úniku radionuklidů ve dni t_{spad} 52
      5.2.2 Dynamické modelování přenosu radionuklidů potravními řetězci pro případ normálního provozu 70
      5.2.3 Zahrnutí izotopů C14 a H3 do dynamického modelu transportu radionuklidů potravními řetězci 72
6. Přílohy 75
   6.1 Význam použitého indexování 75
   6.2 Seznam použité literatury 75

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 upraven 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. Program vznikl na základě spolupráce zainteresovaných pracovníků EGP s externí softwarovou firmou a byl nazván PC-RJ009. Jeho detailní popis je uveden v publikaci [16].

Další spolupráce byla zaměřena na větší využití možností, které poskytovala nová výpočetní technika. Od roku 1996 pokračovala potom třetí etapa prací, kdy program PC-RJ009 byl postupně přepracováván na uživatelsky pohodlný systém s využitím interaktivních možností poskytovaných PC prostředím. 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 izoplet a izodóz. Základní nabídka pro volbu typu disperzního modelu byla rozšířena jednak o BOX-model a dále o modifikace HOSKER či KFK modelů pro případ vícenásobného odrazu škodlivin na horní hranici směšovací vrstvy.

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 dokonce byly v některých případech použity při parciálních srovnávacích výpočtech [26, 27].

V současnosti jsou implementována doporučení vyplývající z Atomového zákona, resp. z jeho prováděcí směrnice (Vyhláška SÚJB č. 184/97 Sb. [30]). Dále byla provedena celá řada

zlepšení a rozšíření kódu inspirovaná nejnovějším přístupem k problematice ve světě. Celkově tedy k hlavním nejnovějším modifikacím patří především:

- použití nových konverzních faktorů pro inhalaci a ingesci specifikovaných novou závaznou vyhláškou SÚJB č. 184/97 Sb. vytvořenou na základě nejnovějších doporučení ICRP
- zabudování modelu resuspenze dříve usazené aktivity
- implementace dynamického modelování ingesce nahrazující dřívější statický model
- možnost vyjádřit očekávané hodnoty dávek s uvažováním faktorů úkrytu resp. stínění
- realističtější modelování disperze ve větších vzdálenostech od zdroje znečistění
- 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.

Takto byl vytvořen nový programový produkt, který byl nazván NORMAL. Je natolik flexibilní, že bylo možno přistoupit ke srovnávání jeho výsledků s jinými ve světě používanými kódy. Pro tento účel byl zvolen produkt PC CREAM popsaný 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. Produkt NORMAL je živý kód rozvíjený, aktualizovaný a udržovaný skupinou autorů s minimální dobou odezvy na požadované úpravy. 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“.

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

- popis metodiky hodnocení (tato práce)
- uživatelský manuál s podrobným popisem vstupů a výstupů
- srovnávací studie - srovnání dílčích výsledků s jinými kódy

Třetí část osahuje v přílohách i výsledky validačních úloh.

Paralelně se systémem NORMAL je v EGP Praha vyvíjen programový systém HAVAR pro hodnocení radiační zátěže obyvatelstva v důsledku havarijních úniků z jaderných zařízení. Snahou je sjednotit metodiku i filosofii vstupů a výstupů tak, aby použité fyzikální modely i datové struktury byly v obou případech konzistentní a odrážely nejnovější znalosti v oboru.

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

Transport radionuklidů od zdroje možného znečistění 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 výpustě ventilačními komíny hlavních výrobních bloků, ventilačními komíny budov pomocných provozů a výpustě 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 vzdušnin 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:

- vnější ozáření z kontaminovaného ovzduší
- vnější 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 tkáně (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 5 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.

Systém 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 implicite 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.

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 výpustě 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 výseči 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.

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:

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

$$+S(x,y,z;t) - \beta\cdot C(x,y,z;t) \qquad (2.1)$$

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:

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

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

Čtvrtý člen na pravé straně schématicky představuje vliv procesů odstraňujících příměsi 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 příměsi se zahrnuje zpětně pomocí t. zv. 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 diferenciace 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 na příklad 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 $\underline{k}$, ve třídě rychlosti větru $\underline{m}$ a při výskytu počasí ve stabilitní třídě $\underline{j}$. Přetransformovaně pak vyjadřuje časový úsek v roce, během něhož se zachovává konstantní povětrnostní situace charakterizovaná indexy $\underline{m}$, $\underline{k}$, $\underline{j}$. 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. Zavádějí se proto 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.

Přijměme 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 příměsi 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:

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

- 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:

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

zde:

C(x,y,z)	střední objemová aktivita radionuklidu <u>n</u> 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]
$\dot{A}$	intenzita kontinuálního zdroje aktivity radionuklidu <u>n</u> 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 *n*; viz dále vztah (3.8) pro konkrétní meteosituaci
f_F	korekční faktor suchého spadu radionuklidu *n*; viz dále vztah (3.9)
f_W	korekční faktor na vymývání radionuklidu *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 σ_y.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 Jűlich/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 Jűlich/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 zřeďování 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 $f_R^n \,.\, f_F^n \,.\, f_W^n$ a jsou někdy interpretovány jako faktory ochuzení zdroje - viz následující vztah (2.4), přičemž:

- Korekční faktor na radioaktivní rozpad nuklidu *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 příměsi 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 příměsi (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 Λ pro odstranění příměsi 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:

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

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 výseč kolem zvoleného směru šíření $\underline{k}$ a provádí se homogenizace vypouštěných příměsí v této výseči 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 diskrétní 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 (na př. 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:

$$h_{ef} = H + \Delta h \tag{2.5}$$

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

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

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:

$$u_H = u_{10} \cdot \frac{H^{\varepsilon} - drs^{\varepsilon}}{10^{\varepsilon} - drs^{\varepsilon}} \tag{2.6a}$$

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 . 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 $< 0, x_{\max} >$ jsou užívány různé mocninné závislosti. Pro stacionární dlouhodobé výpustě 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 standardizační komisí musel být revidován přístup k určování efektivní výšky výpustí. Validační 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 (< 1m/s). Dalším problémem spojeným s malými rychlosti 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 doporučovaných 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 vzdušin. Výsledný vznos je pak dán superpozicí obou efektů.

a) Vznos vlečky v důsledku vertikální kinetické energie vypouštěných vzdušin 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 vzdušin 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:

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

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 vzdušin 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:

$$\Delta h_m = 3 \cdot v_s \cdot d / u_H \qquad (2.6\text{-}2)$$

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

$$\Delta h_m = 4 \cdot \left(F_m / S\right)^{1/4} \qquad (2.6\text{-}3)$$

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

přičemž se bere nejmenší ze tří hodnot.
Zde F_m je tok momentu ve vertikálním směru, $F_m = (v_s)^2 \,.\, (d/2)^2$,
parametr stability S=8.7 E-4 pro třídu E; S=1.75 E-3 pro třídu F .

b) Vznos vlečky v důsledku tepelné energie vypouštěných vzdušin

Výpusti z ventilačních komínů jaderného zařízení lze za normálního provozu považovat za zdroj exhalací s malou tepelnou vydatností. Použijeme dále úvah 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 :

$$\Delta h_b = \Delta h_b^1 / u_H \qquad (2.6\text{-}5)$$

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

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

Platnost tohoto vztahu je uváděna pro interval Q_H < 18 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 blížícími se bezvětří předpokládáme, že převýšení zůstane stejné jako při rychlosti u_H = 1 m/s .

2. Převýšení Δh_m v důsledku vertikální kinetické energie vypouštěných vzdušin 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 vzdušin 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 patrno 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:

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

$$\sigma_z(x) = F(drs, x) \cdot g(x)\ ; \qquad (2.7)$$

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

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

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

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 Jůlichu 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 Jůlich / KFK byly odvozeny ve tvaru:

$$\sigma_y = p_y \cdot x^{qy} \qquad (2.8)$$
$$\sigma_z = p_z \cdot x^{qz}$$

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:

$$q_{ef,j} = \frac{(h_{ef} - H_u)\cdot q_{j,o} + (H_o - h_{ef})\cdot q_{j,u}}{H_o - H_u} \qquad (2.9)$$

$$p_{ef,j} = p_{j,o}^{\left[\frac{hef - H_u}{H_o - H_u}\right]} \; p_{j,u}^{\left[\frac{H_o - h_{ef}}{H_o - H_u}\right]}$$

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 σ_y (x) a σ_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 σ_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 výseče.

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

$$0{,}8 \; . \; H_{mix}$$

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

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

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 příměsi při postupu vlečky v kruhové výseči o úhlu φ_{box} a tloušťce rovné horní hranici směšovací vrstvy. Hodnota $\varphi_{box} = \varphi_\vartheta + \varphi_d$, kde φ_ϑ 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 $\varphi_d = 5^o$). Pro hodnotu φ_ϑ je použito hodnoty z modelu UFOMOD, který doporučuje např. pro kategorii F a výšku výpustí 50 m desetiminutovou fluktuaci směru větru $\varphi_\vartheta \sim 10^o$ (odhadnuto na základě experimentů měření fluktuace směru větru v desetiminutových intervalech). Znamená to, že celková výseč boxového modelu je cca 15^o. 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 chladící 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:

HZ, BZ … výška a šířka blízkostojícího objektu;
HZ1= 2*HZ;
AG = BZ * HZ ..... pro BZ < HZ;
= HZ * HZ ..... pro BZ > HZ;

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

$$\Sigma_y = (\sigma_y^2 + AG/\pi)^{1/2}$$
$$\Sigma_z = (\sigma_z^2 + AG/\pi)^{1/2} \qquad (2.10)$$

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} , $h_{ef}^{'}$ …..původní a nově korigovanou efektivní výšku vlečky;
BZ, HZ ….. výška a šířka blízkostojícího objektu;
RM = min { HZ; BZ };

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

α) Efektivní výšky výpustí:

$$h_{ef}^{'} = 0.5 \cdot \left[3 \cdot h_{ef} - (HZ + RM)\right] \quad ..... \; pro \quad h_{ef} \rangle HZ \qquad (2.11)$$
$$h_{ef}^{'} = \max\left\{(h_{ef} - 0.5 \cdot RM) \; ; \; RM/2\right\} ..... \; pro \quad h_{ef} \leq HZ$$

β) Disperzních koeficientů:

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

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 zpětně byť alespoň přibližně zahrnout skutečné 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:

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

kde z^K je korekce v metrech daná podmínkami:

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

$\delta(x,y)$ 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 ($< 5^o$) 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 :

$z^K = \delta(x,y)$ pro $\delta(x,y) \le h_{ef}/2$ (spolu s předpokladem zachování horizontálního průběhu osy vlečky)

$z^K = h_{ef}/2$ pro $\delta(x,y) > h_{ef}/2$ (osa vlečky modeluje terén ve výšce $h_{ef}/2$)

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

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

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:

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

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. Na př. 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:

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

Výška H_{mix} pak představuje okrajovou podmínku úplného odrazu znečistění. 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:

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

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:

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

Je třeba poznamenat, že určení odpovídající hodnoty H_{mix} a její deklarovaný efekt na rozptyl škodlivin v atmosféře je ve shora použitém 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 výpustě musejí korespondovat s příslušnou grupou ANUK(n) z databáze DATABANK.DAT (zahrnuje 101 nejdůležitějších izotopů včetně jejich různých fyzikálně-chemických forem - popis databanky uveden v uživatelském manuálu systému NORMAL). V první fázi výpočtu jsou zadávané výpustě 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) popsanými

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 výpustě 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 zřetězením 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 výpustě 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 EGP je v současné době 101 prvků a je tedy zřejmé, že se nemůže jednat o obecně formulovanou úlohu uvažující reálné rozpadové řady, kdy se vychází ze soustavy simultánních diferenciálních rovnic:

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

N je koncentrace jader v jednotce objemu vzdušniny, λ jsou příslušné konstanty radioaktivního rozpadu,

$\beta_{j\to i}$ jsou pravděpodobnosti izomerních přechodů.

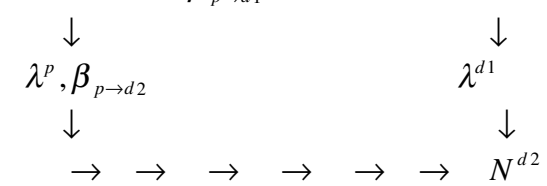
V práci [16] je použit tento časově náročný postup, přičemž se vychází z databanky o 584 štěpných produktech a uvažují se rozpadové řetězce až do maximálního počtu 10 členů.

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:

$$N^p \xrightarrow{\lambda^p} N^d$$

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:

$$C^d_{k,j}(x,y,z=0) = \dot{A}^p \cdot \hat{\chi}_{k,j}(x,y) \cdot f_F \cdot \frac{\lambda^d}{(\lambda^p + \Lambda^p) - (\lambda^d + \Lambda^d)} \cdot$$

$$\cdot\left[\exp(-\frac{(\lambda^d+\Lambda^d)\cdot x}{\bar{u}_{k,j}})-\exp(-\frac{(\lambda^p+\Lambda^p)\cdot x}{\bar{u}_{k,j}})\right] \qquad (2.18)$$

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 $\beta_{p\to d1}$. Pro dceřinný produkt *d2* je příspěvek od původního mateřského prvku *p* určen analogicky záměnou *d2* za *d* a přenásobením výtěžkem $\beta_{p\to d2}$. 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 diskrétní 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 diskrétních hodnot se provádí podle doporučení z [19]. Okolní prostředí se pro potřeby výpočtu pokryje diskrétní 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 výpustě jednotlivých radionuklidů a jejich fyzikálně-chemickou formu.

3.1 Definice diskrétní prostorové sítě pro numerický výpočet

Celý prostor kolem bodového zdroje emisí je pro potřeby numerického výpočtu rozdělen na IPS1 úhlových sektorů $\underline{k}$ a dále na IX radiálních pásem $\underline{i}$. Dílčí úhlový sektor má velikost 2π/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 a pod.) a zadávaných výpočetních vstupů (orografická a demografická data, předpoklad stálé povětrnostní situace ve všech segmentech $\underline{i}$ daného sektoru $\underline{k}$ atd.). Radiační situace v konkrétním segmentu (i,k) je reprezentovaná střední hodnotou přízemní objemové aktivity, střední hodnotou depozice a pod.).

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). Dále do předkládané PC verze systému NORMAL je zabudována možnost 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 $\underline{k}$ přes všechny segmenty $\underline{i}$.

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 $\underline{k}$, jimž se přiřadí odpovídající referenční drsnost v [m] jako jedna ze 6 možných diskrétních hodnot (viz popis pole ZO(6) v databance). V nové verzi systému

NORMAL se zadávají lokální drsnosti pro každý segment (k,i) 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 $\underline{k}$ a pro dané rozdělení v radiálním směru x_i (i=1 až IX1) se napočítávají do pole ZDR(16) podle vztahu:

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

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

Místo jedné diskrétní hodnoty se tedy při výpočtu uvažuje skutečná střední drsnost ZDR(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 $\underline{z}$ (viz dále vztah (3.2a)), průměrné rychlosti větru $\bar{u}$ užité v korekčních faktorech na radioaktivní rozpad, suchý spad 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) <ZO(JDRS);ZO(JDRS+1) > , JDRS=1, ... , 6.

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

Z mapy okolí jaderné elektrárny byly odečteny nadmořské výšky pro jednotlivé mezikruhové výseče (i,k). Reprezentativní hodnotou pro daný segment (i,k) je odečtená maximální nadmořská výška v tomto segmentu a je použita při výpočtu kromě jiného též ke korekci převýšení vlečky nad daným segmentem. Údaje o nadmořských výškách pro Temelín jsou uvedeny v uživatelském manuálu. Pramenem pro zpřesnění údajů o nadmořských výškách budou databáze DMR1 resp. DMR2 z VTOPÚ v Dobrušce nebo údaje z měření ze satelitu, která jsou k dispozici na Internetu. Transformace na polární síť se provede pomocí programů, jejichž vývoj je plánován v rámci dalších prací v rámci technického rozvoje.

b) Střední drsnosti terénu

Drsnost terénu je v PC verzi systému NORMAL zohledněna zmíněným přesnějším způsobem vyjádřeným vztahem (3.1). 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)).

Zadávané vstupní hodnoty pro lokalitu Temelín jsou uvedeny v uživatelském manuálu.
Počítá se opět s upřesněním hodnot drsnosti v rámci automatického generování hodnot drsnosti s užitím databáze LAND USE, která obsahuje údaje o typech zemského povrchu (lesy, zástavba, otevřená krajina nezemědělská, obhodpodařované plochy, vodní plochy, ...) na poměrně jemné plošné mříži.

c) Blízkostojící objekty v areálu jaderné elektrárny

Velká koncentrace nejrůznějších objektů v samotném areálu elektrárny (budovy, chladící 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.

3.2 Kategorizace meteorologických dat pro danou lokalitu

Výchozím 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.

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 (intenzívní 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 intenzívní vertikální turbulencí (na př. 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 homogennosti 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), která udává pravděpodobnosti výskytu velikosti větru z kategorie *m* vanoucího směrem do úhlového sektoru *k* a při výskytu kategorie stability počasí *j*. 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 8 srážkových kategorií s. Pravděpodobnosti výskytu srážek v roce PS(s) a velikosti srážek TH(s) v jednotlivých kategoriích s je třeba určit na základě dlouhodobých meteorologických pozorování v každé lokalitě. Pro lokalitu JE Temelín jsou hodnoty zakoupené od ČHMÚ uvedeny v uživatelském manuálu.

d) Kategorie 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 spojité spektrum rychlostí větru se rozdělí na konečný počet intervalů *m* s jedinou charakteristickou (střední) rychlostí u_{10}(m). Pro vyjádření vertikálního rychlostního profilu po *z* je užit empirický vztah z [1]:

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

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:

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

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.

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.

g) Hustota osídlení v okolí lokality Temelín

Za účelem detailnějšího hodnocení dopadu radiačního zatížení na populaci je obyvatelstvo rozděleno do 5 věkových skupin *a* podle schématu:

Věková kategorie	*Charakteristika*
a = 1	děti do 1 roku
a = 2	děti 1 až 8 let
a = 3	děti 8 až 12 let
a = 4	děti 12 až 18 let
a = 5	dospělí

Do programu vstupují data o obyvatelstvu ve formě třírozměrného pole OBYV(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). Data byla dodána organizací TERPLAN a jsou vypracována na základě sčítání obyvatelstva z roku 1991. V procesu zajištění kvality systému NORMAL je řešena otázka aktualizace vstupních dat. Pro případ aktualizace údajů počtu obyvatel na polární mříži jsou rozpracovány konverzní programy, které na základě pravidelných ročních bilancí počtu obyvatel v obcích ČR vydávaných Českým statistickým úřadem provedu přepočet na polární mříž s použitím vektorové mapy sídel ČR.

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

3.3.1 Transport ovzduším popsán Gaussovou rovnicí šíření

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

$$\bar{C}^{n}_{k,j,m,s}(x, z=0) = \frac{\dot{A}^{n}}{2\pi \cdot \sigma_{y,j}(x) \cdot \sigma_{z,j}(x) \cdot u_{k,j,m}} \left\{ \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2_{y,j}(x)}\right) \right\}_{str} . \qquad (3.3)$$

$$. \left[2 \cdot \exp\left(-\frac{h^2_{ef}(k,j,m)}{2\sigma^2_{z,j}(x)}\right) + \eta_{JV}(z=0;k,j,m) \right] . f^{n}_{R}(x;k,j,m) \, . \, f^{n}_{F}(x;k,j,m) . \, f^{n}_{W}(x;k,j,m,s)$$

přičemž pro vyjádření střední hodnoty po *y* je použit konzervativní odhad:

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

IPS1 je celkový počet úhlových sektorů *k*, na něž je rozdělena větrná růžice.
$u_{k,j,m}$ je referenční rychlost větru v efektivní výšce v sektoru *k* při kategorii větru *m* a při počasí z kategorie *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 *n* se definuje obecně jako:

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

Je třeba si znovu uvědomit, že vztah (3.3) představuje řešení pro jednu konkrétní povětrnostní situaci danou konkrétní kategorií počasí *j* a konkrétní kategorií intenzity srážek *s*, přičemž vítr stabilně fouká ve směru sektoru *k* a má rychlost z kategorie *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 *n* podle:

$$\bar{C}_k^n(x) = \dot{A}^n \cdot \frac{IPS1}{\sqrt{2\pi}\cdot x}\sum_j \sigma_{y,j}(x)\sum_m \sum_s \sum_{g=0}^{INV} \left\{ \frac{\Psi_{k,j,m}^g(x)}{u_{k,j,m}} \cdot QIGM(k,j,m) \cdot \right.$$

(3.6a)

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

Zde IPS1 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 je popsána dále vztahem (3.7).

Příslušný dlouhodobý faktor zředění se vyjadřuje jako:

$$\bar{\chi}_k^n(x) = \frac{IPS1}{\sqrt{2\pi}\cdot x}\sum_j \sigma_{y,j}(x)\sum_m \sum_s \sum_{g=0}^{INV} \left\{ \frac{\Psi_{k,j,m}^g(x)}{u_{k,j,m}} \cdot \right. \qquad (3.6b)$$

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

Stěžejní práce v oboru (na př. lit. [2], [4]) kvantitativně popisují transport mas vypouštěných vzdušnin 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 zřeďování těchto vzdušnin. V této fázi není zohledněno zřeďování současně vypouštěných radioaktivních příměsí v důsledku suchého a mokrého vypadávání a radioaktivního rozpadu. Jde o vyjádření základního vlivu prostorového efektu zřeďování s přihlédnutím k dlouhodobé povětrnostní statistice. Takto definovaný dlouhodobý faktor zředění vzdušných mas [$s.m^{-3}$] se vyjádří analogicky s (3.6b) jako:

$$\hat{\chi}_k(x) = \frac{IPS1}{\sqrt{2\pi}\cdot x}\sum_j \sigma_{y,j}(x)\sum_m \sum_g \left\{ \frac{\Psi_{k,j,m}^g(x)}{u_{k,j,m}} \cdot QIGM(k,j,m) \right\}$$

(3.6c)

Ve všech třech předchozích vztazích se dosazuje:

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

Přitom i samotné disperzní koeficienty mohou být závislé na inverzní výšce. 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 2π / IPS1 radiánů s osou v uvažovaném směru $\underline{k}$.

Korekční faktor na radioaktivní rozpad se bere podle:

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

λ^n je rozpadová konstanta nuklidu *n*

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

Korekční faktor na suchý spad:

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

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:

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

Λ_s^n ..... konstanta vymývání nuklidu *n* srážkami z kategorie *s* ; je vyjádřena dále podle (3.17)

$\bar{u}$ ..... střední rychlost po *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 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 *k* a homogenně se rozptylují v mezikruhové výseči s osou ve směru 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 *k* má pro každý směr konstantní hodnotu 2π / IPS1 radiánů.

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

$$ {}^{BOX}C^{n}_{k,j,m,s}(x,y,z=0) \;=\; \frac{\dot{A}^{n}}{\bar{u}_{k,j,m}\cdot H_{box,j}\cdot x\cdot \varphi_{k}}\cdot \qquad (3.11) $$

$$ \cdot\; {}^{BOX}f^{n}_{R}(x;k,j,m)\cdot {}^{BOX}f^{n}_{F}(x;k,j,m)\cdot {}^{BOX}f^{n}_{W}(x;k,j,m,s) $$

Zde $\varphi_k = 2\pi$ / IPS1. Rozměr koncentrace aktivity je v $[Bq/m^3]$ a jde o únik ve směru k s rychlostí m při kategorii počasí j srážkách 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 :

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

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:

$$ \frac{d\dot{A}^{n}(x)}{dx} \;=\; -\int_{-Y_{mez}}^{+Y_{mez}} v^{n}_{g}\cdot {}^{BOX}C^{n}_{k,j,m}(x,y)\cdot dy \qquad (3.13) $$

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

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

$$ {}^{BOX}f^{n}_{F}(x,k,j) = \exp\left(-\frac{v^{n}_{g}}{\bar{u}_{k,jm}\cdot H_{box,j}}\cdot x\right) \qquad (3.14) $$

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 diskusi 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:

$$\bar{F}^{n}_{k}(x) = v^{n}_{g} \,.\, \bar{\chi}^{n}_{k}(x) \qquad (3.15a)$$

resp. pro BOX-model:

$$\overset{BOX}{\bar{F}^{n}_{k}}(x) = v^{n}_{g} \cdot \overset{BOX}{\bar{\chi}^{n}_{k}}(x) \qquad (3.15b)$$

Efektivní rychlosti usazování v^{n}_{g} v [$m.s^{-1}$] 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 příměsmi ve vlečce. Obecné vyjádření rychlosti depozice aktivity v [$Bq.m^{-2}.s^{-1}$] má tvar:

$$W^{n}_{k,j,m,s}(x,y) = \int_{0}^{\infty} \Lambda^{n}_{s} . C^{n}_{k,j,m,s}(x,y,z).dz \qquad (3.16)$$

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 *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^{n}_{s} vymývání prvku *n* při intenzitě srážek z kategorie *s* má rozměr [s^{-1}] a uvažuje se ve tvaru:

$$\Lambda^{n}_{s} = \gamma^{n} . \vartheta_{s} \qquad (3.17)$$

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

υ_{s} ..... intenzita srážek kategorie *s* [$mm.hod^{-1}$]

Integrací (3.16) po *z* se dostane pro případ homogenní vertikální stratifikace :

$$W^n_{k,j,m,s}(x,y) = \frac{\Lambda^n_s . \dot{A}^n}{\sqrt{2\pi}.\sigma_y(x).u_{k,j,m}} . \exp(-\frac{y^2}{2.\sigma^2_y(x)}) \cdot \tag{3.18}$$

$$. \; f^n_R(x;k,j,m) \cdot f^n_F(x;k,j,m) \cdot f^n_W(x;k,j,m,s)$$

$\sigma_y(x)$	horizontální disperzní parametr v místě x ve směru šíření vlečky [m]
$\dot{A}$	intenzita kontinuálního zdroje radionuklidu <u>n</u> v $[Bq/s]$
u	rychlost větru v efektivní výšce vlečky z kategorie <u>m</u> v [m/s]
f_R	korekční faktor na radioaktivní rozpad nuklidu <u>n</u>;
f_F	korekční faktor suchého spadu radionuklidu <u>n</u>;
f_W	korekční faktor na vymývání radionuklidu <u>n</u> atmosférickými srážkami;

Po vystředování předchozího vztahu po <u>y</u> dostaneme:

$$W^n_{k,j,m,s}(x) = \frac{IPS1}{2\pi.x} . \frac{\Lambda^n_s . \dot{A}^n}{u_{k,j,m}} \cdot f^n_R(x;k,j,m) \cdot f^n_F(x;k,j,m) \cdot f^n_W(x;k,j,m,s) \tag{3.19}$$

Obě strany tohoto výrazu nyní dělíme $\dot{A}^n$ a pro konkrétní <u>k</u> provedeme vážení přes všechny uvažované kategorie počasí <u>j</u>, rychlosti větru <u>m</u> a kategorie srážek <u>s</u> 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 <u>k</u>:

$$\bar{W}^n_k(x) = \frac{IPS1}{2\pi.x} . \sum_j \sum_m \sum_s \sum_{g=0}^{INV} [\frac{\Lambda^n_s}{u_{k,j,m}} . QIGM(k,j,m) \cdot PS(s) \cdot PIN(g) \cdot \tag{3.20a}$$

$$\cdot f^n_R(x;k,j,m) \cdot f^n_F(x;k,j,m) \cdot f^n_W(x;k,j,m,s) \;]$$

Zde IPS1 je celkový počet směrů větru, na které je rozdělena větrná růžice, PIN(g) značí pravděpodobnost výskytu inverzní vrstvy z kategorie <u>g</u> charakterizovanou výskytem spodní základny inverze s výškou HS(g). První krok pro g=0 se opět týká homogenní stratifikace, kdy PINV(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 < 0; $H_{mix,j}$ >. Je zřejmé, že dostaneme:

$$^{BOX}\bar{W}^n_k(x) = \frac{IPS1}{2\pi.x} . \sum_j \sum_m \sum_s [\frac{\Lambda^n_s}{\bar{u}_{k,j,m}} . QIGM(k,j,m) . PS(s) \cdot \tag{3.20b}$$

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

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

Pomocí předchozích vztahů definujme veličinu:

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

Tato veličina má rozměr [Bq.m^{-2}.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 výpustí při normálním provozu. Střední (z dlouhodobého hlediska) usazenou plošnou aktivitu nuklidu $\underline{n}$ v místě $\underline{x}$ daného sektoru $\underline{k}$ a v čase t od počátku provozu označíme $\bar{\Omega}_k^n(t,x)$. Má rozměr [Bq.m^{-2}] a její bilanční rovnice má tvar:

$$\frac{d}{dt}\left(\bar{\Omega}_k^n(t,x) \right) = \bar{S}_k^n(x) - \lambda^n \cdot \bar{\Omega}_k^n(t,x) - \lambda_{pov}^n \cdot \bar{\Omega}_k^n(t,x) \tag{3.22}$$

Zdrojový člen S je dán vztahem (3.21);

λ^n ..... rozpadová konstanta radionuklidu $\underline{n}$ [1/s]

λ_{pov}^n ..... konstanta odstraňování nuklidu z povrchu jinými mechanismy než rad. rozpadem [1/s] ; Platí:

$$\lambda_{pov}^n = \ln 2 / TCEZ(n) \tag{3.23}$$

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

Hledaný časový průběh usazené aktivity pak má tvar:

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

Efektivní rozpadová konstanta je zavedena podle $\lambda_{ef}^n = \lambda^n + \lambda_{pov}^n$;

V [1] se doporučuje, aby se při následném výpočtu dávky od depozitu uvažovala koncentrace usazené aktivity v čase $t = t_B$, kde t_B je konzervativní odhad doby setrvání radionuklidu na povrchu (při výpočtu se bere hodnota t_B =50 (resp. 70) roků).

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 dvouřádové snížení hodnot dávky od tohoto izotopu usazeného na povrchu.

V souvislosti s prováděním srovnávacích výpočtů s produktem PC CREAM byla v nové verzi produktu NORMAL provedena revize určování a zadávání konstanty λ^n_{pov}. 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 t. zv. **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 jednak již zmíněným TCEZ(n) (representuje „run-off“ mechanismy) ve vstupním souboru NORMALIN.DAT (viz. popis v uživatelském manuálu) a současně dalším způsobem, kdy interaktivně z panelu lze 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. Hodnoty převzaté z [22] jsou následující:

$$k_{11} = 6.94 \,.\, 10^{-3} \quad [rok^{-1}]$$
$$k_{44} = 1.39 \,.\, 10^{-2} \quad [rok^{-1}]$$

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.

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 o (o=1 až 7) s významem:

o = 1 ..... celé tělo (k efektivní dávce)
o = 2 ..... gonády
o = 3 ..... červená kostní dřeň
o = 4 ..... plíce
o = 5 ..... štítná žláza
o = 6 ..... vrchní část tlustého střeva
o = 7 ..... kůže

Za účelem detailnějšího hodnocení dopadu radiačního zatížení na populaci je obyvatelstvo rozděleno na 5 věkových skupin charakterizovaných indexem a podle schématu:

Věková kategorie	*Charakteristika*
a = 1	děti do 1 roku
a = 2	děti 1 až 7 let
a = 3	děti 7 až 12 let
a = 4	děti 12 až 17 let
a = 5	dospělí

Uvedené rozdělení vzešlo z doporučení metodiky Interatomenergo v lit. [1]. Probíhají práce na rozdělení 2. věkové kategorie do dvou separátních kategorií od 1 do 2 let a od 2 do 7 let podle Vyhl.č.184 [30]. Doposud je prováděn výpočet se sloučenou kategorií s použitím konzervativnějších hodnot konverzních faktorů. Již je hotová 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). Podrobnější údaje jsou uvedeny v manuálu systému HAVAR, kde byla pro účely nového algoritmu ATSTEP generována příslušná data o populaci na zhuštěné polární síti s 35 radiálními pásmy od zdroje do 100 km (původně 20 pásem).

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 $\Re^{r,o}$ v orgánu nebo tkáni o vyjádřené v [Gy] a radiačního váhového faktoru W^r. Je-li pole záření tvořeno více druhy záření r, výsledná ekvivalentní dávka na orgán či tkáň o se vyjádří podle vztahu:

$$H^o = \sum_{(r)} W^r \cdot \Re^{r,o} \qquad (4.1)$$

Index *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:

Druh záření:	*Radiační váhový faktor W^r :*
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 součinů ekvivalentní dávky v ozářených tkáních či orgánech a tkáňových váhových faktorů podle vztahu:

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

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

Orgán (tkáň):	*Tkáňový váhový faktor W^o :*
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 τ=50 roků pro příjem radionuklidu u dospělých a τ=70 roků pro děti.

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 schematu reflektujícího zvolenou diskrétní síť:

$$KDE^{o,a} = \sum_{i} \sum_{k} H_{i,k}^{o,a} \cdot N_{i,k}^{a} \qquad (4.3)$$

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

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

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

$$H^{o}(T) = \int_{t0}^{t0+T} \dot{H}^{o}(t) \cdot dt \qquad (4.4)$$

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

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

t0 ... počátek expozice [s]

T ... uvažovaná doba trvání expozice [s]

4.2 Radiační 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:

$$H^{o,a}(T;x,y) = \sum_{p} \sum_{n} H_{p}^{a,n,o}(T;x,y) \qquad (4.5)$$

Kolektivní dávky se pak následně určují podle:

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

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).

Nová 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 na př. 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. Jejich bližší rozlišení pro město a venkov, jakož i pro jednotlivé věkové skupiny, se předpokládá v další verzi v souvislosti s automatickou aktualizací údajů o populaci na polární síti.

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

- Vnější ozáření z radioaktivního oblaku (fotony a β-záření)
- Vnější 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) Vnější ozáření z oblaku: Dávkový příkon v [Sv.s^{-1}] v segmentu sektoru $\underline{k}$ ve vzdálenosti $\underline{x}$ (přesněji jeho střední hodnota po $\underline{y}$) se určuje podle:

$$\dot{H}^{a,n,o,k}_{oblak}(x) = \dot{A}^{n} . \bar{\chi}^{n}_{k}(x) . R^{n,o}_{oblak} \qquad (4.7a)$$

$\dot{H}^{a,n,o,k}_{oblak}(x)$ ..... dávkový příkon [Sv/s]

$\dot{A}^{n}$ ..... intenzita kontinuálního zdroje radionuklidu $\underline{n}$ [Bq/s]

$\bar{\chi}^{n}_{k}(x)$ ..... dlouhodobý faktor zředění přízemní objemové aktivity nuklidu $\underline{n}$ v sektoru $\underline{k}$ a ve vzdálenosti x [$s.m^{-3}$] - viz vztah (3.6b), resp. ekviv. vztah pro BOX model

$R^{n,o}_{oblak}$ .....dávkový faktor pro ozáření z oblaku od nuklidu $\underline{n}$ na orgán $\underline{o}$ [$Sv.m^{3}.Bq^{-1}.s^{-1}$] (tabelován v [1])

Je zřejmé, že v případě idealizovaných dlouhodobých stacionárních výpustí veličina (4.7a) představuje časově konstantní hodnotu a pak tedy hodnota příslušné dávky za dobu T je dána (s využitím (4.4)) výrazem:

$$H_{oblak}^{a,n,o,k}(T;x) = \dot{A}^{n} . \bar{\chi}_{k}^{n}(x) \; . \; R_{oblak}^{n,o} \cdot T \qquad (4.7b)$$

$H_{oblak}^{a,n,o,k}(T;x)$ ..... celková dávka za dobu T na 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]

Pozn. k ozáření fotony: Výpočet dávky od externího ozáření fotony z radioaktivního oblaku postupuje 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 tkáně podle ICRP doporučení. Absorbovaná dávka ve vzduchu se ve větších vzdálenostech určuje na základě polonekonečného modelu radioaktivního mraku, kdy se předpokládá homogenní rozdělení koncentrace radionuklidů. Pro blízké vzdálenosti od zdroje je přesnější použít konečný model mraku, kdy se uvažuje i komponenta rozptýleného záření aproximovaná koeficientem nakupení. Poznamenejme, že dávkové faktory $R_{oblak}^{n,o}$ ze vztahů (4.7) jsou určovány na základě polonekonečného modelu mraku. Vzhledem k velkému objemu výpočtu se předpokládá použití filosofie ze systému RODOS, kdy dávkové faktory se napočítávají interpolací z tabelovaných hodnot (jsou k dispozici pro 4 výšky osy vlečky mraku, 8 radiálních vzdáleností a 10 úhlových směrů).

Pozn. k β-ozáření: Vzhledem k silné absorbci 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 (t. zn. 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 řídící veličina použita přízemní objemová aktivita nuklidu ve sledovaném místě. Z literatury [22] byla převzata tabulka konverzních faktorů pro nejdůležitější radionuklidy, která umožňuje vypočíst 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:

$$H_{oblak}^{\beta,n}(T = rok;x) = \dot{A}^{n} . \bar{\chi}_{k}^{n}(x) \; . \; R_{oblak}^{\beta,n} \qquad (4.7c)$$

Tabulka hodnot nových koeficientů $R_{oblak}^{\beta,n}$ [Sv.rok^{-1}.Bq^{-1}.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

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

b) Vnější ozáření od zemského povrchu kontaminovaného suchým a mokrým spadem:

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

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

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

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

$R^{n,o}_{povrch}$ ..... tabelovaný dávkový faktor ozáření od kontaminovaného povrchu pro nuklid *n* a orgán *o* [$Sv.m^{2}.Bq^{-1}.s^{-1}$]

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

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

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

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

$$= \dot{A}^{n} \cdot \left[\bar{F}^{n}_{k}(x) + \bar{W}^{n}_{k}(x) \right] R^{n,o}_{povrch} \cdot \frac{1}{\lambda^{n}_{ef}} \cdot \left[T + \frac{1}{\lambda^{n}_{ef}} \cdot \left(\exp(-\lambda^{n}_{ef} \cdot T) - 1 \right) \right]$$

$H^{a,n,o,k}_{povrch}(T;x)$ ..... 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:

$\lambda_{m1} = 1{,}01.\ 10^{-3}$ [den^{-1}]; $\lambda_{m1} = 0{,}0$ [den^{-1}];
$a_1 = 0{,}6$; $a_2 = 0.5$;

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 popsán v nové verzi manuálu systému HAVAR.

Pozn. 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 $R_{depo}^{\beta,n}$ [$Sv.rok^{-1}.Bq^{-1}.m^2$] pro 9 význačných nuklidů je uvedena v uživatelském manuálu systému NORMAL. Potom kontrola přijaté dávky od β-ozáření [$Sv.rok^{-1}$] od deponovaného radionuklidu *n* se provádí podle vztahu:

$$H_{depo}^{\beta,n}(t2,x) = \bar{\Omega}^{n}(t2,x) \cdot R_{depo}^{\beta,n} \qquad (4.8c)$$

$\bar{\Omega}^{n}(t2,x)$ je modifikací vztahu (3.24) a představuje hodnotu usazené aktivity radionuklidu n [$Bq.m^{-2}$] na zemském povrchu ve vzdálenosti x od zdroje, a sice střední hodnotu v roce t2 po zahájení provozu jaderného zařízení. Vzhledem ke kontinuálním výpustím představuje vztah (3.24) monotonní neklesající funkci, a tudíž aproximace hodnotou t2 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 mokrém 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 [$Sv.s^{-1}$] na orgán *o* pro jedince z věkové kategorie *a* vyvolaný radionuklidem *n* ovlivňující orgán skrze mechanismus dýchání tohoto jedince dlouhodobě pobývajícího v místě *x* sektoru *k* se určuje podle:

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

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

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

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

Ke dříve definovaným významům zopakujeme:

$\dot{A}^{n}$ ..... intenzita kontinuálního zdroje radionuklidu n [Bq/s]

$\bar{\chi}_{k}^{n}(x)$ ..... dlouhodobý faktor zředění přízemní objemové aktivity ovzduší ve směru sektoru k a ve vzdál. x od zdroje výpustí (pro nuklid n) - viz vztah (3.6b)

u_{inh}^{a} ..... tabelovaná rychlost dýchání jedince věkové kategorie a [$m^3.s^{-1}$]

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 [Sv] od příjmu radionuklidu n po dobu T (obvykle se bere 1 rok) je dána (s využitím (4.4)) výrazem:

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

Je zřejmé, že se jedná o konzervativní odhad, který předpokládá, že jedinec žije v místě 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 (zvířování 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:

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

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

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

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 složitého 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:

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

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 $T \to \infty$.
Obdobně je tomu v práci [24] s exponenciálním poklesem k(T) pro časnou a střední fázi až ke konstantní ustálené hodnotě ve fázi pozdní. Postupy z [24] a [25] budou použity při rozšíření programového systému HAVAR.

Pro kontinuální usazování 1 $Bq.m^{-2}.s^{-1}$, které se děje po dobu jednoho roku, lze integrální resuspendovanou aktivitu ve vzduchu za čas t2 vyjádřit vztahem :

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

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

$$I_{RES}(t2) = 3.15 \cdot 10^{7} \cdot \int_{1}^{t2} k(t) \cdot dt \qquad (4.15)$$

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

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

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:

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

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

e) Vnitřní ozáření z ingesce potravinových produktů kontaminovaných atmosférickým spadem

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

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

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

$A_{ing}^{a,n,k}(x)$ značí příjem radionuklidu n v [Bq] od ingesce kontaminovaných potravinových produktů vypěstovaných v místě x sektoru 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 a trvale žijící ve vzdálenosti x od zdroje výpustí ve směru sektoru k konzumuje pouze produkty vypěstované v tomto místě, tedy :

$$A_{ing}^{a,n,k}(x) = \sum_{l} E_l^{n,k}(x).P_l^a \qquad (4.19)$$

kde P_l^a je roční spotřeba produktu l jedincem z a a $E_l^{n,k}(x)$ je měrná aktivita radionuklidu n v produktu l vypěstovaném v místě x sektoru k [$Bq.kg^{-1}$]. Jiným modelem spotřeby (realističtějším pro některé lokality) je vyjádřen předpokladem **lokální produkce - globální**

distribuce potravin. Jednou z jeho variant je předpoklad, že jedinec z věkové skupiny *a* trvale žijící ve vzdálenosti *x* od zdroje výpustí ve směru sektoru *k* konzumuje část Z_l^k produktu *l* ze svojí zóny *k* a zbytek pochází z čistých nekontaminovaných zdrojů. Roční příjem radionuklidu je pak dán vztahem:

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

(4.20)

Model globální spotřeby může mít řadu dalších modifikací, na příklad že jedinec z věkové skupiny *a* trvale žijící ve vzdálenosti *x* od zdroje výpustí ve směru sektoru *k* konzumuje část produktu *l* ze svojí zóny *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 z důvodu nedostatku relevantních podkladů pro aplikaci některého z modelů globální spotřeby 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.

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 s určitými modifikacemi zabudován do systému NORMAL. 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 ENCONAN podle [32]

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 dávkových faktorů pro inhalaci a ingesci. Alternativně k hodnotám pro dávkové faktory $R_{inh}^{a,n,o}$ ze vztahu (4.11) pro inhalaci resp. $R_{ing}^{a,n,o}$ ze vztahu (4.18) pro ingesci tabelovaných v [1] bylo nutno do programu NORMAL zahrnout i tato nová doporučení z [30] pro zahrnutí vlivu radionuklidů vstupujících do organismu při inhalaci a ingesci. Obdobné zpřesněné faktory převzaté z [3] již byly do předchozí verze implementovány, nyní jsou tedy nahrazeny závaznými hodnotami z [30].

Nové dávkové faktory jsou zatím dány jen pro efektivní dávku. Dvě věkové kategorie 1-2 roky a 2-7 roků byly pro výpočty v NORMAL spojeny v jedinou kategorii 1-7 roků s konzervativními hodnotami pro původní kategorii 1-2 roky. V [30] jsou dále rozlišovány hodnoty podle doby zdržení nuklidu (dny, týdny, roky). Do databáze systému NORMAL jsou přeneseny pouze nejrestriktivnější hodnoty. Na základě jednání se Státním úřadem pro jadernou bezpečnost bylo doporučeno, aby bylo přijato prozatímní doporučení pro určení dávkových faktorů na jednotlivé orgány či tkáně, které spočívá v tom, že faktor pro efektivní dávku se vydělí příslušným tkáňovým váhovým faktorem W^o - viz. vztah (4.2).

1. Proces inhalace

Úvazek efektivní dávky v [Sv] v důsledku inhalace příměsí radionuklidu *n* po dobu T pro jedince z věkové kategorie *a* trvale žijícího ve vzdálenosti *x* sektoru *k* se na základě doporučení z [30] určuje ve shodě s (4.11) podle:

$$H_{inh}^{a,n,k}(T,x) = B_{inh}^{a,n,k}(T,x).G_{inh}^{a,n} \qquad (4.21a)$$

Zde B značí celkový příjem aktivity radionuklidu v [Bq] za dobu T inhalační cestou, $G_{inh}^{a,n}$ je dávkový faktor [Sv/Bq] podle doporučení z [30].

Pokud nedojde k dalšímu upřesnění, úvazek efektivní dávky v [Sv] na orgán (tkáň) *o* v důsledku inhalace příměsí radionuklidu *n* pro jedince z věkové kategorie *a* trvale žijícího ve vzdálenosti *x* sektoru *k* se bude na základě doporučení z [30] určovat podle:

$$H_{inh}^{a,n,o,k}(x) = B_{inh}^{a,n,k}(x) \cdot G_{inh}^{a,n} / W^{o} \qquad (4.21b)$$

Jedná se o analogii se vztahem (4.9) resp. (4.11). Roční příjem nuklidu n se počítá stejně jako (4.11). Určitý rozdíl je však v zadávání dávkových faktorů. Faktor R z (4.9) je dále podle doporučení z [1] vyjádřen podle:

$$R_{inh}^{a,n,o} = K^{a}.RIN(o,n) \qquad (4.22)$$

Opravný koeficient K^{a} pro jednotlivé věkové skupiny je tabelován v [1] a teprve dvourozměrné pole RIN(o,n) se zadává v databance programu (viz popis DATABANK.DAT v uživatelském manuálu systému NORMAL). Nový koeficient G_{inh} z výrazů (4.21) má rozměr [Sv/Bq] a je tabelován přímo (viz tabulka v uživatelském manuálu) a jako pole GIN(a,n) je připojen na konec databanky DATABANK.DAT.

2. Proces ingesce

Úvazek efektivní dávky v [Sv] v důsledku ročního ingesčního příjmu kontaminovaných potravinových produktů pro jedince věkové skupiny *a* žijícího v místě *x* sektoru *k* se podle nového doporučení z [30] určuje v analogii s (4.18) podle:

$$H_{ing}^{a,n,k}(x) = A_{ing}^{a,n,k}(x).G_{ing}^{a,n} \qquad (4.23a)$$

Pro úvazek ekvivalentní dávky v důsledku ročního příjmu radionuklidu se užije prozatímní přibližné vyjádření:

$$H_{ing}^{a,n,o,k}(x) = A_{ing}^{a,n,k}(x).G_{ing}^{a,n} / W^{o} \qquad (4.23b)$$

Zde $G_{ing}^{a,n}$ je dávkový faktor [Sv/Bq] podle doporučení z [30].

Je zřejmé, že jde o analogii vztahu (4.18). Roční příjem radionuklidu *n* se bere opět podle (4.19). Rozdíl je zase v zadávání dávkových faktorů. V původním přístupu se v databance programu zadává pole RIG(o,n). Nové koeficienty G_{ing} v [Sv/Bq] (převzaty z [30], u vedeny

v tabulce v uživatelském manuálu) se zadávají jako pole GIG(a,n) a rozšiřují databanku systému NORMAL (přidány na konec souboru DATABANK.DAT).

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, ... ,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 $\underline{k}$ [$Bq.kg^{-1}$], se určuje pro všechny radionuklidy s výjimkou H3 a C14 pomocí depozice na povrchu v místě $\underline{x}$, přičemž je doporučena formule:

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

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 $\underline{l}$ [$m^2 . kg^{-1}$ resp. $m^2 . l^{-1}$]

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

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]). Zahrnutí 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. V poslední době nabývají na významu 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).

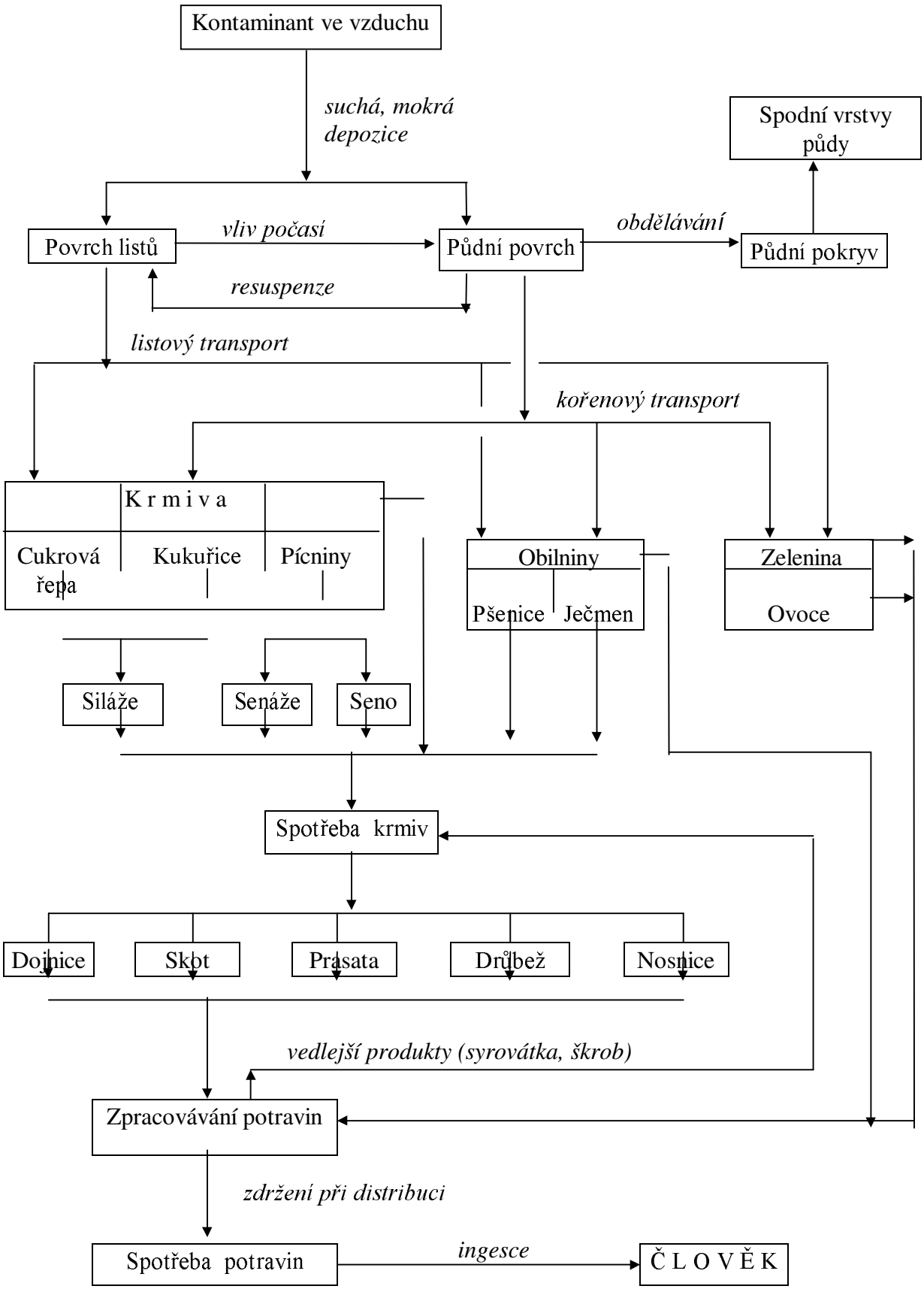
Dynamické modely jsou mimořádně náročné na vstupní data příslušná danému rozdělení na různé radioekologické zóny. Implementace těchto velkých systémů je proto velmi náročné a může se stát, že některá data nejsou v nové lokalitě ještě vůbec k dispozici. Jedná se o časově náročné výpočty prováděné většinou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

Do systému HAVAR byl zabudován zjednodušený dynamický model ENCONAN vyvinutý v ČR a popsaný v [32], do systému NORMAL je včleněna jeho modifikace pro případ dlouhodobých stacionárních výpustí. 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 jeho autorem 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 ránci RODOS projektu probíhala i revize existujících lokálních dat a jejich aktualizace pro ČR ([34,39] , která zpětně ovlinví i zpřesnění vstupních podkladů pro systém NORMAL.

Obr. 5.1: Transport radionuklidů potravními řetězci podle modelu ENCONAN



5.2.1 Případ 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:

$$A_l^{a,n}(x,y;t) = \Omega_0^n(x,y\,;t_{spd}) \cdot I\varepsilon_l^{a,n}(t) \tag{5.2}$$

Zde:

Ω_0^n (x,y; t_{spd}) .....depozice v místě (x,y) v důsledku suchého vypadávání a vymývání radionuklidu v [Bq/m^2], vztaženo ke dni spadu t_{spd} (juliánský den)

$I\varepsilon_l^{a,n}(t)$..... integrální normalizovaný příjem aktivity nuklidu *n* v důsledku konzumace produktu *l* jedincem z věkové kategorie *a* za dobu od spadu ke dni *t* [m^2]
Platí:

$$I\varepsilon_l^{a,n}(t) = \int_{t_{skl}+t_{zd}}^{t} \varepsilon_l^n(t') \cdot PD_l^a \cdot dt' \tag{5.3}$$

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

$\varepsilon_l^n(t')$ ..... normalizovaná (na jednotku depozice) měrná aktivita nuklidu *n* v produktu *l* (na jednotku hmotnosti produktu *l*) ke dni t' [m^2 . 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

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

V_{such}^l ..... suchá hmotnost rostliny na jednotku plochy v době spadu [kg/m^2]

μ ..... míra depozice aerosolů i elementárního jódu na porostu [m^2/kg]

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

pšenice:

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

pícniny (1. seč):

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

kukuřice:

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

Zde Y_M je hmotnost listové části rostliny v čerstvém stavu na jednotku plochy v době spadu v [kg/m^2] ;
Y_{MS} je hmotnost listové části rostliny v čerstvém stavu v době sklizně [kg/m^2] (viz tab.č.5.1);
t^l_{veg1} značí počátek vegetačního období produktu *l* [d] ;

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

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

kde faktor *Y* zohledňuje pokročilost vegetačního období:

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

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

$$^L\varepsilon^n_l\left(t^l_{skl}\right) = R^l \cdot \exp\left[-\left(\lambda_1 + \lambda^n \right) \cdot \left(t^l_{skl} - t_{spd} \right) \right] / V^l_c \qquad (5.5)$$

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

$$^L\varepsilon^n_l\left(t'\right) = {}^L\varepsilon^n_l\left(t_{skl}\right) \cdot \exp\left[-\lambda^n \cdot \left(t' - t^l_{skl} \right) \right] \qquad (5.6)$$

kde:
L ..... index listové cesty
λ_1 ..... konstanta odstranění nuklidu z povrchu rostliny povětrnostními vlivy; aerosoly ~ 0.046 d^{-1}; jód (elementární + organický) ~ 0,069 d^{-1}
λ^n ..... konstanta radioaktivní přeměny nuklidu *n* [d^{-1}]
t^l_{skl} ..... 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 [kg/m^2] - viz tab.č.5.1.

Předchozí dva vztahy se používají pro kukuřici, listovou zeleninu, cukrovou řepu, pícniny 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:

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

$k_2 = 9{,}19$

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 *n*-tého radionuklidu v *l*-tém rostlinném produktu v [$m^2.kg^{-1}$] v okamžiku sklizně v důsledku absorpce kořenovým systémem je dána vztahem:

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

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

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

λ_2 ..... rychlostní konstanta transportu radionuklidů do hlubších vrstev půdy [d^{-1}]
$\lambda_2 = 4\%$/rok

λ^n ..... konstanta radioaktivního rozpadu nuklidu *n* [d^{-1}]

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 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 *b*, z nich vyráběné potraviny pak indexem *p*. Jednotlivé produkty *b* jsou výsledkem zkrmování produktů *l*. Rostlinná krmiva jsou uvedena na dalších místech v tab.č.5.1.

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

$$^{SUM}A^{n}(t') = \sum_{(l)} \left[{}^{L}\varepsilon_{l}^{n}(t') + {}^{K}\varepsilon_{l}^{n}(t') \right] \cdot PDK_{l} \qquad (5.10)$$

PDK_l ..... denní dávka krmiva *l* [kg/d] - viz následující tab.č.5.6 a 5.7.

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

$$\varepsilon_{b}^{n}(t') = {}^{SUM}A^{n}(t') \cdot F_{b}^{n} \qquad (5.11)$$

F_b^n ..... frakce denního příjmu radionuklidu *n* zvířetem, která se objeví v každém litru resp. kg živočišného produktu *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 mase jsou vhodnější kompartmentové modely, problémem však dosud zůstává otázka nalezení věrohodných modelových parametrů.

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

$$I\varepsilon_{p,b}^{a,n}(t) = \int_{tkp}^{t} \varepsilon_{b}^{n}(t') \cdot PD_{b}^{a} \cdot f1_{p,b}^{a} \cdot dt' \qquad (5.12)$$

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

$$I\varepsilon_{p,b}^{a,n}(t) = \int_{t_{ref}}^{t-tkp} \varepsilon_{b}^{n}(t'+tkp) \cdot PD_{b}^{a} \cdot f1_{p,b}^{a} \cdot dt' \qquad (5.13)$$

Zpětně pak platí:

$$I\varepsilon_{b}^{a,n}(t) = \sum_{(p)} I\varepsilon_{p,b}^{a,n}(t) \qquad (5.14)$$

Zde:

tkp..... počátek konzumace kontaminované potraviny *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 *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 potraviny *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:

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

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^2_{konz} [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

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

Tab. 5.3: Koncentrační faktory BV_l^n 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
K47	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

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
K47	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
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

Tab. 5.4. - pokračování

Nuklid	Mléko	Hovězí maso	Vepřové maso	Drůbež	Vejce
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
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

Tab. 5.4 - pokračování

Nuklid	Mléko	Hovězí maso	Vepřové maso	Drůbež	Vejce
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

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	$\mathbf{t_{zdp}}$	$\mathbf{f_1}$ 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. vegetačním 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 krmivo[kg,l/den]	1	2	3	4	5	6
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

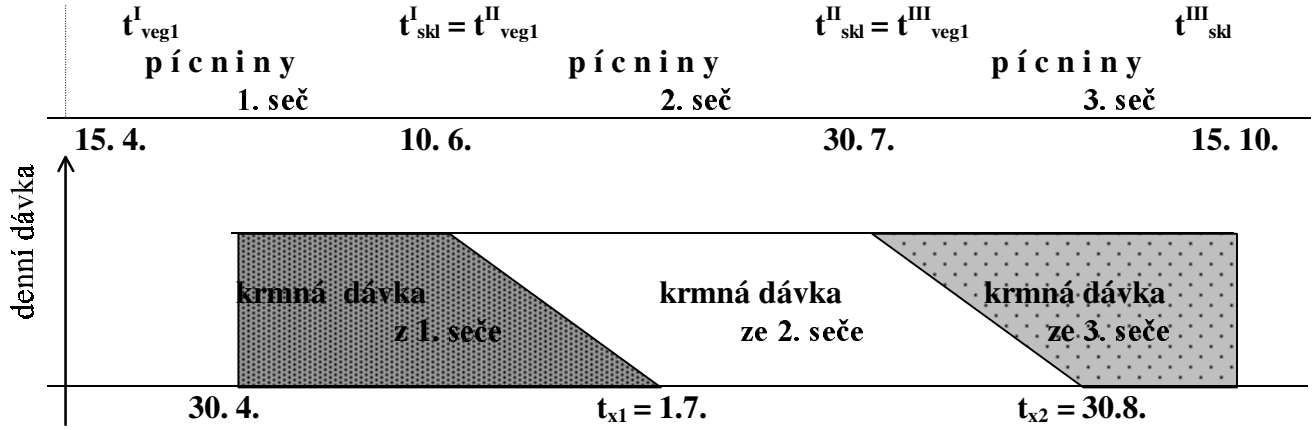
Dynamické modelování transportu radionuklidů v potravních řetězcích představuje určitě značný pokrok ve srovnání s dříve používanými statickými přiblíženími. Nicméně i zde jsou používána různá zjednodušení vynucená jak nedostatečným stupněm znalostí složitých transportních mechanismů tak nedostupností 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 dojivost, 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 kontinuálnosti 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:



Další předpoklady:

- zkrmování zelené píce začíná 30.4. (konzervativní předpoklad)

- v čase t^{I}_{skl} 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^{II}_{skl} 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. $t_{spd} < t^{I}_{veg1}$ ... jen kořenový transport

2. $t_{spd} \in \left\langle t^{I}_{veg1}; t^{I}_{skl} \right\rangle$

3. $t_{spd} \in \left\langle t^{II}_{veg1}; t^{II}_{skl} \right\rangle$

4. $t_{spd} \in \left\langle t_{veg1}^{III}; t_{skl}^{III} \right\rangle$

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

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

Zde: l je index pro pícniny 1. seče,
$V_c^l(t^*)$ je výnos (předčasně) sklízených pícnin z 1. seče (zde předpokládáme lineární změnu v $\left\langle t_{veg1}^{I}; t_{skl}^{I} \right\rangle$) :

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

Pro kořenovou cestu platí obdobně se (5.8):

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

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

$$ A_l^n(t^*) = \left[{}^{L}\varepsilon_l^n(t^*) + {}^{K}\varepsilon_l^n(t^*)\right]\cdot PDK_l \qquad (5.18) $$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$A_{l+1}^{n}(t') = {}^{K}\varepsilon_{l+1}^{n}(t') \cdot PDK_{l+1} \qquad (5.22)$$

${}^{K}\varepsilon_{l+1}^{n}(t')$ 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:

$$A_{l+2}^{n}(t') = {}^{K}\varepsilon_{l+2}^{n}(t') \cdot PDK_{l+2} \qquad (5.23)$$

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:

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

přičemž:

$${}^{K}\varepsilon_{l+1}^{n}(t') = {}^{K}\varepsilon_{l+1}^{n}(t_{skl}^{II}) \cdot \exp\left[-\lambda^n \cdot (t' - t_{skl}^{II})\right] \qquad (5.25)$$

${}^{K}\varepsilon_{l+1}^{n}\left(t_{skl}^{II}\right)$ je dáno vztahem (5.20)

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

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

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

V analogii s (5.21) dostaneme:

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

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

Příjem aktivity zvířetem ve dni t' je dán podle:

$$A_{l+2}^{n}\left(t'\right)={}^{K}\varepsilon_{l+2}^{n}\left(t'\right)\cdot PDK_{l+2} \tag{5.28}$$

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

Takto jsme určili pro kterýkoliv čas $t'\in\left\langle t_{ref};t_{skl}^{III}\right\rangle$ 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 *n* v 1 litru či kg živočišného produktu *b* je pak dána vztahem (5.11).

Konkretizujme další postup pro *b* = mléko. Podle tab.č.5.5 se z mléka vyrábí celkem 4 skupiny mléčných potravin *p* charakterizovaných frakcí $f1$ a dobou zdržení ke konzumaci t_{zdp}.

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

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

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 *n* pro uvažovaný případ spadu uvnitř vegetačního období pícnin 1. seče pro měrnou normalizovanou aktivitu prvku *n* v seně z 1. seče v čase $t' > 288$ (t.zn. 15.10.) dostaneme ze vzorců (5.16) a (5.17)

$$ {}^{1}\varepsilon^{n}_{seno}(t') = \left[{}^{L}\varepsilon^{n}_{l}(t^{I}_{skl}) + {}^{K}\varepsilon^{n}_{l}(t^{I}_{skl}) \right] \cdot \exp\left[-\lambda^{n} \cdot (t' - t^{I}_{skl}) \right] \cdot S_{seno} \qquad (5.29) $$

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:

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

Celkový příjem aktivity nuklidu *n* při zkrmování sena v zimním období je:

$$ A^{n}_{seno}(t') = \left[2/3 \cdot {}^{1}\varepsilon^{n}_{seno}(t') + 1/3 \cdot {}^{2}\varepsilon^{n}_{seno} \right] \cdot PDK_{seno} \qquad (5.31) $$

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 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 byť 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 výpustě 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.

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 modelu ENCONAN 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/m^2] a je vztaženo ke dni spadu t_{spd} . Druhou veličinou na pravé straně výrazu (5.2) je $I\mathcal{E}_l^{a,n}(t)$, což je integrální normalizovaný příjem aktivity nuklidu $\underline{n}$ v důsledku konzumace produktu $\underline{l}$ jedincem z věkové kategorie $\underline{a}$ za dobu od spadu ke dni $\underline{t}$.

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

1. Ponoření ekosystému do prostředí ovlivňovaného kontinuálními výpustěmi znamená, že usazenou aktivitu Ω v době sklizně produktu $\underline{l}$ lze určit analogicky vztahu (3.24) podle

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

   kde δT_l^{skl} je doba od úplného počátku provozu jaderného zařízení do doby sklizně produktu $\underline{l}$ (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 $\underline{l}$ pro listovou resp. kořenovou cestu platí beze změny vztahy (5.6) resp. (5.9).

V nich se však ${}^{L}\varepsilon_{l}^{n}(t_{skl})$ resp. ${}^{K}\varepsilon_{l}^{n}(t_{skl})$ 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 :

$$t_{spd} \Rightarrow t_{spd}^{l} = t_{skl}^{l} - 0.5 \tag{5.33}$$

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

$$\bar{\Omega}_{k}^{n}(t,x) = \bar{S}_{k}^{n}(x) / \lambda_{ef}^{n} \tag{5.34}$$

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

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

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:

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

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 :

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

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.

5.2.3 Zahrnutí izotopů C14 a H3 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). Vyjímku tvoří nuklidy C14 a H3, které se do rostlin dostávají jako důsledek procesu fotosyntézy.

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

$$A_l^{a,C14}(x,y;t) = C^{C14}(x,y;z=0)\cdot I\varepsilon_l^{a,C14}(t) \qquad (5.38)$$

Zde:

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

$I\varepsilon_l^{a,C14}(t)$.....integrální normalizovaný příjem aktivity nuklidu C14 v důsledku konzumace produktu *l* jedincem z věkové kategorie *a* za dobu od spadu ke dni *t* [m^3]
Platí:

$$I\varepsilon_l^{a,C14}(t) = \int_{t_{skl}+t_{zd}}^{t} \varepsilon_l^{C14}(t')\cdot PD_l^a \cdot dt' \qquad (5.39)$$

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

$\varepsilon_l^{C14}(t')$.....normalizovaná (na jednotku přízemní objemové aktivity) měrná aktivita nuklidu C14 v produktu *l* (na jednotku hmotnosti produktu *l*) ke dni t' [m^3 . kg^{-1}]

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

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

Izotop C14 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 C14 a přírodního C12 jako v přízemní vrstvě vzduchu, tedy:

$$\frac{N_{prod}^{C14}}{N_{prod}^{C}} \stackrel{!}{=} \frac{N_{air}^{C14}}{N_{air}^{C}} \qquad (5.40)$$

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

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

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

$$N^{C}_{prod} = N^{av} . FR^{C} \quad , N^{C}_{air} = N^{av} . G^{C}$$

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

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

Dosazením do předchozích zlomků a jejich vynásobením rozpadovou konstantou pro C14 se dostane hledaný přibližný vztah pro měrnou normalizovanou koncentraci aktivity izotopu C14 v 1 kg produktu *l* [$m^3 .kg^{-1}$]:

$$\varepsilon_l^{C14} = 1 \cdot \frac{FR^C}{G^C} \qquad (5.41)$$

Pro radionuklid H3 je uvažován analogický postup s tím rozdílem, že pro rovnovážnou koncentraci H3 vzhledem k celkovému obsahu H v rostlinách se bere polovina rovnovážné koncentrace H3 v atmosférické vodě. Analogicky ke vztahu (5.40) se tedy definuje:

$$\frac{N_{prod}^{H3}}{N_{prod}^{H}} \stackrel{!}{=} 0.5 \cdot \frac{N_{air}^{H3}}{N_{air}^{H}} \qquad (5.42)$$

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 vzduch za vegetační období označíme h_{H2O} (je doporučována hodnota 0.00018 kg H_2O v 1 m^3 vzduchu). Podobnou úvahou jako u izotpu C14 dostaneme přibližné vyjádření pro měrnou normalizovanou aktivitu izotopu H3 v 1 kg produktu *l* [$m^3 .kg^{-1}$]:

$$\varepsilon_l^{H3} = 0.5 \cdot \frac{p_{H2O}}{h_{H2O}} \qquad (5.43)$$

Pro měrnou normalizovanou aktivitu izotopu *i* (C14 nebo H3) v 1 kg rostlinného produktu v čase t' > t_{skl} je vyjádřen jako:

$$\varepsilon_l^i(t') = \varepsilon_l^i(t_{skl}) \cdot \exp\left[-\lambda^i \cdot (t' - t_{skl}^l)\right] \qquad (5.44)$$

ε_l^i (t_{skl}) je měrná normalizovaná aktivita v okamžiku sklizně produktu *l* a podle přijatých předpokladů se vyjadřuje vztahy (5.41) resp. (5.43).

Roční příjem aktivity rostlinného produktu *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 (5.39), přičemž v tomto případě konkrétně platí:

$$I\varepsilon_l^{a,i}(t) = \varepsilon_l^i(t_{skl}) \cdot PD_l^a \cdot \frac{1}{\lambda^i} \cdot \left[\exp(-\lambda^i \cdot t_{zd}^l) - \exp(-\lambda^i \cdot (TING - t_{skl}^l))\right] \qquad (5.45)$$

Při příjmu aktivity C14 nebo H3 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 (5.44). Jedná se o denní příjem (ve dni t') normalizované aktivity nuklidu *i* zvířetem v důsledku zkrmování produktu *l*. Měrná normalizovaná aktivita nuklidu v 1 kg či litru produktu *b* produkovaného zvířetem ve dni t' se pak vyjadřuje podle (5.11). Výsledný integrální příjem normalizované aktivity nuklidu *i* v důsledku konzumace všech potravinových produktů *p* vyrobených z živočišného produktu *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 C14 a H3 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 $< t^{I}_{veg1} ; t^{I}_{skl} >$ se rozlišují dále příspěvky od :

1. $< t_{krm} ; t^{I}_{skl} >$ ..... krmení pící I s konstantní (rovnovážnou) aktivitou
2. $< t^{I}_{skl} ; t_{x1} >$ .... dokrmování pící sklizenou v I (s lineárním poklesem až do t_{x1}) v počátku veg. období II (uvažován radioaktivní rozpad nuklidu *i* po sklizni)
3. $t' > t^{III}_{skl}$ ..... v zimním období se realizují 2/3 denní krmné dávky senem z úsušků z veg. období I (uvažován radioaktivní rozpad nuklidu *i*)

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

1. $< t^{I}_{skl} ; t_{x1} >$ .... dokrmování čerstvou pící sklízenou průběžně ve období II (s lineárním nárůstem až do t_{x1})
2. $< t_{x1} ; t^{I}_{skl} >$ .... plné krmení čerstvou pící sklízenou průběžně ve období II s konstantní rovnovážnou aktivitou nuklidu *i*
3. $< t^{II}_{skl} ; t_{x2} >$ .... dokrmování v počátku období III pící sklizenou v II (s lineárním poklesem až do t_{x2}) , uvažován radioaktivní rozpad nuklidu *i* po sklizni v období II)
4. $t' > t^{III}_{skl}$ ..... v zimním období se realizuje 1/3 denní krmné dávky senem z úsušků z veg. období II (uvažován radioaktivní rozpad nuklidu *i* po t^{II}_{skl})

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

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

6. Přílohy

6.1 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

6.2 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] Program pro výpočet radiobiologických důsledků maximální projektové nehody a normálního provozu.
Zpráva za rok 1984. Práce EGP 221-6-023581.

[7] Hodnocení interakce vleček ventilačních komínů a vleček chladících věží jaderně energetických zařízení.
Společná práce týmu EGP, ČEZ, ČSKAE, ČHMÚ, SKVTRI, SHMÚ, září 1986

[8] Metodiky radiační bezpečnosti JE VVER 1000: Úpravy programů pro výpočty radiačních důsledků projektových nehod a normálního provozu JE.
Práce EGP, 414-6-010557, listopad 1986.

[9] Metodiky radiační bezpečnosti JE VVER 1000: Úpravy programů pro výpočty radiačních důsledků projektových nehod.
Práce EGP, 411-6-026053, prosinec 1987.

[10] JE Temelín. Projektový úkol V. Stavba. Kapitola A.2.1.19: Vliv stavby na životní prostředí. Práce EGP, duben 1987.

[11] Úpravy programů pro hodnocení radiačních důsledků normálního provozu a nehod JE na okolí (I). Práce EGP 419-6-880242, prosinec 1988.

[12] Program HERALD - vyhodnocení radiační situace v okolí JE po havárii.
ŠKODA, K.P. PLZEŇ, Ae 5585/Dok., květen 1985

[13] Metodika výpočtu šíření aktivit v okolí jaderné elektrárny. Část 1 a 2.
ŠKODA, K.P. PLZEŇ, Ae 5281/Dok., únor 1984.

[14] RDOJE - program na výpočet dávek v okolí JE. I. část a II. část.
VÚJE Jaslovské Bohunice, 19/85, 1985.

[15] Obecné problémy bezpečnosti JE. DÚ 05- Řešení technologických a radiačních problémů bezpečnosti VVER.
Práce EGP, 22-6-10272, květen 1980.

[16] Program PC-RJ009: PC verze programu pro výpočty exhalací a radiačního zatížení okolí při normálním provozu jaderného zařízení.
Spolupráce EGP / PECHA . Duben 1995.

[17] Program PC-RJ006-V2 : Interaktivní PC verze programu pro hodnocení radiační zátěže obyvatelstva při havarijních únicích z jaderného zařízení do atmosféry.
Spolupráce EGP / PECHA, č. 06/1996, červenec 1996.

[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 Polution 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 Systém 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 Terresterial 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. 184 / 1997 Sb. zák. o požadavcích na zajištění radiační ochrany.

[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 Systém (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) - ??(??)-?? (final version in July,99).

[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).