

Technický manuál SW BioRad

Verze 1.0.x

Autoři: Josef Chudoba, Jiří Landa, Jakub Říha

Cílem tohoto dokumentu je seznámit uživatele SW s principem fungování jeho jednotlivých modulů (matematicko-fyzikální popis, numerické schéma, atp.). Ovládání SW spolu s popisem jeho vstupů a výstupů je popsáno v samostatném dokumentu.

Obsah

1	Model nesaturované zóny (BioRad 1)	3
1.1	Matematicko-fyzikální model	3
1.1.1	Úloha proudění	4
1.1.2	Úloha transportu	8
1.1.3	Odstranění nestability modelu	11
1.2	Implementace základního modelu	12
1.2.1	Popis vstupů z modelu geosféry	13
1.2.2	Popis modelu v nenasycené zóně	13
1.2.3	Popis inicializačního souboru pro výpočet proudění a transportu v nenasycené zóně	14
1.3	Příklady	17
2	Model distribuce radionuklidů v biosféře a dopadu na člověka (BioRad 2)	26
2.1	Koncepční a matematický model pro výpočet příkonu efektivní dávky	26
2.1.1	Koncepční model	27
2.1.2	Příkon efektivní dávky požitím	28
2.1.3	Příkon efektivní dávky vdechnutím	32
2.1.4	Příkon efektivní dávky zevním ozářením	33
2.2	Potřebné údaje – přehled	34
2.2.1	Potřebné aktivity prostředí – předpokládané výstupy z modelů	34
2.2.2	Ostatní údaje a možnosti jejich získání	35
2.3	Údaje získané z literatury, významné pro výpočet efektivní dávky, potřebné pro posuzování bezpečnosti úložišť radioaktivních odpadů	36
2.3.1	Údaje závislé na chemických vlastnostech – transferové faktory	36
2.3.2	Vlastnosti radionuklidů a dávkové konverzní faktory	40
2.3.3	Spotřební koše – příjem potravy	42
2.3.4	Ostatní údaje	43
3	Literatura:	46

1 Model nenasycené zóny (BioRad 1)

Tato kapitola se zabývá jedním z modulů SW Biorad (BioRad 1) - prouděním vody a transportem rozpuštěných látek v nenasycené zóně v blízkosti povrchu. Vysvětluje způsob, jak lze numericky řešit Richardsovu a advekční disperzní rovnici, které fyzikálně popisují problematiku [33, 34]. Teoretický základ je následně řešen na několika příkladech.

SW Biorad lze využít při řešení následujících problémů:

1. Úniku radioaktivních látek na povrch oblasti například spadem, kde jeho velikost tvoří okrajovou podmínku na horní straně modelu.
2. Transportu látek geosférou, s následným přestupem izotopů do nenasycené zóny. Koncentrace kontaminantu v nasycené zóně tvoří okrajovou podmínku na dolní straně modelu.

Řešení těchto problémů lze využít při bezpečnostním rozboru hlubinného úložiště vyhořelého jaderného paliva (HÚ), kdy je třeba prokázat jeho bezpečnost od uložení odpadu přes kontejnery a geosféru až do člověka po dobu několika set tisíc let. Model nenasycené zóny navazuje na výsledky transportu látek v geosféře a předchází modelu biosféry s přestupem radioaktivních látek do člověka. Příklady uvedené v tomto manuálu jsou zasazeny právě do problematiky HÚ.

V nasycené zóně je dominantní horizontální proudění, proto geometrie modelu hlubinného úložiště je ve 3D. V nenasycené zóně je naopak dominantní vertikální proudění, proto model nenasycené zóny je tvořen v 1D. Horizontální proudění je vzhledem k velikosti elementů zanedbáno. Pro výpočet proudění bylo použito Richardsovy rovnice [35]. Okrajové podmínky proudění tvoří na horní podstavě časovou závislost srážek, na dolní podstavě tlaková výška. Transport izotopů je řešen pomocí advekčně-disperzní rovnice. Okrajové podmínky transportu v nenasycené zóně tvoří koncentrace na povrchových elementech z 3D modelu geosféry.

Výsledkem proudění podzemní vody je stanovení tlakové a piezometrické výšky, vodního obsahu a velikosti toků v uzlech výpočetní sítě. Výsledky transportu v nenasycené zóně je koncentrace izotopů v závislosti na čase a hloubkovém profilu a je možno řešení úlohy využít k:

- modelování bezpečnosti ukládání radioaktivních látek do hlubinných úložišť,
- modelování následků po zasažení území radioaktivními látkami,
- vstupu do biosférických modelů, kde je cílem stanovit příjem efektivní dávky.

1.1 Matematicko-fyzikální model

Matematicko-fyzikální model úlohy v nenasycené oblasti je rozdělen na výpočet proudění podzemní vody a transport rozpuštěných látek. V nenasycené oblasti je dominantní proudění vertikální, proto popsané modely jsou uvažovány v 1D svislé oblasti.

K výpočtu dochází pomocí následujícího schématu:

- časový krok 0 – použití počátečních podmínek proudění a transportu,
- časový krok 1 – z počátečních podmínek se vypočte iteračně nové řešení Richardsovy rovnice a řešení proudění se použije pro výpočet transportu látek,
- časový krok 2 až n – z výsledků proudění v předchozím časovém kroku se iteračně vypočte nové řešení proudění, které se využije pro výpočet transportu látek.

Výpočet proudění (Richardsova rovnice) i transportu (advekčně-disperzní rovnice) je řešením parciálních diferenciálních rovnic. Výsledky úloh jsou závislé na volbě geometrie výpočetní sítě a zároveň na délce časového kroku. V případě nevhodné diskretizace či délky kroku mohou vznikat problémy se stabilitou numerického výpočtu a s tím spojené nestability fyzikálních řešení (oscilace řešení, vznik záporných koncentrací látek, okamžitá vlhkost je blízká reziduální vlhkosti apod.). Vznik nestabilit je omezován zhuštěním výpočetní sítě, či zkrácením časového kroku. Blíže viz kapitola 1.1.3.

Matematický popis úlohy a numerické řešení vychází z [33].

1.1.1 Úloha proudění

V nasyceném prostředí jsou všechny póry zaplněny a tlaková výška $h \geq 0$. Proudění podzemní vody má charakter horizontálně-vertikální. Naopak v nenasyčeném prostředí jsou póry buď zaplněny vodou, nebo vzduchem. Tlaková výška $h < 0$. Proudění je dominantně vertikální (zvláště k horizontálnímu rozměru elementů, kde délka strany je v řádu desítek metrů), proto lze nahradit plošně větší oblasti pomocí 1D vertikálního modelu.

Richardsova rovnice

Úloha proudění v nenasyčené zóně je popsána Richardsovou rovnicí [35]:

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta, h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right) - S \quad (1)$$

, kde	h	tlaková výška	$[m]$
	θ	vlhkost	$\left[\frac{m^3}{m^3} \right]$
	t	čas	$[s]$
	z	svislá osa modelu	$[m]$
	S	zdroje	$\left[\frac{m^3}{m^3 s} \right]$
	K	nesaturovaná hydraulická vodivost	$\left[\frac{m}{s} \right]$

Řídící proměnnou v rovnici (1) je tlaková výška h . Proměnné $\theta(h)$ a $K(h)$ jsou nelineárně závislé na okamžité hodnotě tlakové výšky h podle van Genuchtenova vztahu [36]:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s \cdot S_e^{0.5} \cdot \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (3)$$

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

, kde	θ_r	reziduální vlhkost	$[1]$
	θ_s	saturovaná vlhkost	$[1]$
	α	parametr typu půdy	$[m^{-1}]$
	n	parametr typu půdy	$[1]$

K_s saturaovaná hydraulická vodivost [m/s]

Van Genuchtenovy parametry lze stanovit ze složení půdy, podle podílu prachu, jílu a písku a její hustotě. Převod mezi složením horniny a van Genuchtenovými parametry není analyticky popsán. Výsledky van Genuchtenových parametrů lze získat například pomocí SW Rosetta [37], které byly získány z fyzického zkoumání vzorků hornin. V SW Biorad byly jednotlivé druhy půd dle složení aproximovány po částech spojitou funkcí pomocí výsledků ze SW Rosetta.

Okrajové a počáteční podmínky, zdroje

Proudění na oblasti je závislé na typu horniny a je ovlivňováno okrajovými podmínkami. Na hranici modelu lze v SW modelovat buď tok (představující srážky), nebo tlakovou výšku. Oba typy OKP se mohou v průběhu simulace libovolně měnit v typu i v hodnotě. V každém časovém okamžiku musí být alespoň na jednom z okrajů definována tlaková výška.

V modelu transportu kontaminantu z hlubinného úložiště se předpokládá na dolní části modelu konstantní tlaková výška, na horní části modelu tok ve formě srážek. Jejich velikosti mohou být časově závislé.

Počáteční podmínka je popsána konstantní piezometrickou výškou na oblasti a její hodnota je dána výškou hladiny podzemní vody v dané lokalitě. Zdroje S mohou představovat odběr vody kořenovým systémem, nebo ze studny. Zadávají se v $\left[\frac{m^3}{m^3s}\right]$ a představují výšku vodního sloupce, který je z modelu odebrán na jednotku výšky za jednotku času.

Numerické schéma

Geometrie oblasti se diskretizuje pomocí $n - 1$ elementů s n uzly. Řešením Richardsovy rovnice (1) se obdrží tlaková výška na každém uzlu i v simulačních krocích j . Výpočet probíhá numericky tímto způsobem:

- Výpočet proudění v simulačním kroku j ,
 - výpočet 1. iterace pro simulační krok $j + 1$,
 - výpočet 2. iterace pro simulační krok $j + 1$,
 - výpočet n -té iterace pro simulační krok $j + 1$ (počet iterací je volitelný parametr SW, doporučuje se asi 10),
- výsledky proudění v simulačním kroku $j + 1$ jsou rovny výsledkům poslední iterace.

Richardsova rovnice (1) nemá analytické řešení, proto je řešena pomocí numerického schématu (4), které je popsáno v [33, 34, 38]:

$$\frac{\theta_i^{j+1,k+1} - \theta_i^j}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta z} \left(K_{i+\frac{1}{2}}^{j+1,k} \cdot \frac{h_{i+1}^{j+1,k+1} - h_i^{j+1,k+1}}{\Delta z_i} - K_{i-\frac{1}{2}}^{j+1,k} \cdot \frac{h_i^{j+1,k+1} - h_{i-1}^{j+1,k+1}}{\Delta z_{i-1}} \right) + \frac{K_{i+\frac{1}{2}}^{j+1,k} - K_{i-\frac{1}{2}}^{j+1,k}}{\Delta z} - S_i^j \quad (4)$$

, kde

- i představuje polohu uzlu ve výpočetní síti,
- j časovou proměnnou,
- k k -tou iteraci proudění.
- $\Delta t = t^{j+1} - t^j$, $\Delta z = \frac{z_{i+1} - z_{i-1}}{2}$, $\Delta z_i = z_{i+1} - z_i$, $\Delta z_{i-1} = z_i - z_{i-1}$,

$$\bullet \quad K_{i+\frac{1}{2}}^{j+1,k} = \frac{K_{i+1}^{j+1,k} + K_i^{j+1,k}}{2}, \quad K_{i-\frac{1}{2}}^{j+1,k} = \frac{K_i^{j+1,k} + K_{i-1}^{j+1,k}}{2}$$

V rovnici (4) se využívá znalost vlhkosti θ a hydraulické vodivosti K v uzlech i , které jsou závislé na tlakové výšce h dle vzorců (2 a 3). Zároveň vstupují do rovnice (4) hodnoty:

- v časovém kroku j ,
- k -té iterace v časovém kroku $j + 1$,
- $(k + 1)$. iterace v časovém kroku $j + 1$.

Cílem je převést rovnici (4) tak, aby na levé straně byly proměnné tlakové výšky h v $(k + 1)$. iteraci v $(j + 1)$. časovém kroku. Na pravé straně rovnice známé hodnoty získané z j . časového kroku a k . iterace v $(j + 1)$ časovém kroku.

Toho se dosáhne zavedením vodní kapacity:

$$C_i^{j+1,k} = \frac{d\theta^{j+1,k}}{dh} = \frac{(\theta_s - \theta_r) \cdot (\alpha_i \cdot m_i \cdot n_i) \cdot (\alpha_i \cdot h_i)^{n_i-1}}{(1 + (\alpha_i \cdot h_i)^{n_i})^{m_i+1}} \quad \begin{matrix} h < 0 \\ h > 0 \end{matrix} \quad (5)$$

a rozvinutím členu $\frac{\theta_i^{j+1,k+1}}{\Delta t}$ Taylorovým rozvojem na:

$$\frac{\theta_i^{j+1,k+1}}{\Delta t} = C_i^{j+1,k} \cdot \frac{h_i^{j+1,k+1} - h_i^{j+1,k}}{\Delta t} + \frac{\theta_i^{j+1,k}}{\Delta t} \quad (6)$$

obdržíme po dosazení do rovnice (4):

$$C_i^{j+1,k} \cdot \frac{h_i^{j+1,k+1} - h_i^{j+1,k}}{\Delta t} + \frac{\theta_i^{j+1,k} - \theta_i^j}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta z} \left(\left(\frac{K_{i+1}^{j+1,k} + K_i^{j+1,k}}{2} \right) \cdot \frac{h_{i+1}^{j+1,k+1} - h_i^{j+1,k+1}}{z_{i+1} - z_i} - \left(\frac{K_i^{j+1,k} + K_{i-1}^{j+1,k}}{2} \right) \cdot \frac{h_i^{j+1,k+1} - h_{i-1}^{j+1,k+1}}{z_i - z_{i-1}} \right) + \frac{K_{i+1}^{j+1,k} - K_{i-1}^{j+1,k}}{z_{i+1} - z_{i-1}} - S_i^j \quad (7)$$

V rovnici (7) již můžeme vyjádřit tlakovou výšku pro výpočet $(k + 1)$ iterace, protože všechny ostatní proměnné jsou známy z řešení k -té iterace, nebo z časového kroku j . Po algebraických úpravách lze rovnici (7) převést do tvaru rovnice (8):

$$-\frac{K_{i-1}^{j+1,k} + K_i^{j+1,k}}{2 \cdot (z_i - z_{i-1})} \cdot h_{i-1}^{j+1,k+1} + \left(\frac{\Delta z}{\Delta t} C_i^{j+1,k} + \frac{K_{i+1}^{j+1,k} + K_i^{j+1,k}}{2 \cdot (z_{i+1} - z_i)} + \frac{K_i^{j+1,k} + K_{i-1}^{j+1,k}}{2 \cdot (z_i - z_{i-1})} \right) \cdot h_i^{j+1,k+1} - \frac{K_i^{j+1,k} + K_{i+1}^{j+1,k}}{2 \cdot (z_{i+1} - z_i)} \cdot h_{i+1}^{j+1,k+1} = \frac{\Delta z}{\Delta t} C_i^{j+1,k} \cdot h_i^{j+1,k} - \frac{\Delta z}{\Delta t} \cdot (\theta_i^{j+1,k} - \theta_i^j) + \frac{K_{i+1}^{j+1,k} - K_{i-1}^{j+1,k}}{2} - S_i^j \cdot \Delta z \quad (8)$$

Tím se pro každý uzel výpočetní sítě vytvoří algebraická rovnice, pomocí které se stanoví nové iterační řešení tlakové výšky, která je v rovnici (8) na levé straně. Rovnici (8) lze zapsat v maticovém tvaru (9), kde matice \mathbf{P} je čtvercová s dimenzí počtu uzlů, vektor \mathbf{h} je nové iterační řešení, vektor \mathbf{F} představuje výsledky z přechodí(ho) iterace (kroku). Matice \mathbf{P} je pásová symetrická matice ve tvaru (10) s prvky (11).

$$\mathbf{P}^{(j+1,k)} \cdot \mathbf{h}^{(j+1,k+1)} = \mathbf{F} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} d_1 & e_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e_1 & d_2 & e_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e_2 & d_3 & e_3 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & e_{n-2} & d_{n-1} & e_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{n-1} & d_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ \dots \\ h_{n-1} \\ h_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \dots \\ f_{n-1} \\ f_n \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$d_i = \frac{\Delta z}{\Delta t} C_i^{j+1,k} + \frac{K_{i+1}^{j+1,k} + K_i^{j+1,k}}{2 \cdot (z_{i+1} - z_i)} + \frac{K_i^{j+1,k} + K_{i-1}^{j+1,k}}{2 \cdot (z_i - z_{i-1})} \quad i \in \langle 2, n-1 \rangle \quad (11a)$$

$$e_i = -\frac{K_{i-1}^{j+1,k} + K_i^{j+1,k}}{2 \cdot (z_i - z_{i-1})} \quad i \in \langle 2, n-2 \rangle \quad (11b)$$

$$f_i = \frac{\Delta z}{\Delta t} C_i^{j+1,k} \cdot h_i^{j+1,k} - \frac{\Delta z}{\Delta t} \cdot (\theta_i^{j+1,k} - \theta_i^j) + \frac{K_{i+1}^{j+1,k} - K_{i-1}^{j+1,k}}{2} - S_i^j \cdot \Delta z \quad i \in \langle 2, n-1 \rangle \quad (11c)$$

Prvky $d_1, d_n, e_1, e_{n-1}, f_1, f_n$ se určí z okrajových podmínek modelu. V SW se předpokládá buď Dirichletova okrajová podmínka (OKP), která představuje tlakovou výšku h a obvykle je definována na dolní hranici modelu. Nebo Neumannovu OKP, která představuje tok q přes hranici a obvykle je předepsán na horní hranici modelu a představuje velikost srážek. Z výpočetních důvodů musí být předepsána Dirichletova OKP alespoň na jedné hranici modelu. Podle předepsaných podmínek jsou prvky $d_1, d_n, e_1, e_{n-1}, f_1, f_n$ následující:

- Dirichletova podmínka na horní hranici modelu $d_n = 1, e_{n-1} = 0, f_n = h_n$
- Dirichletova podmínka na dolní hranici modelu $d_1 = 1, e_1 = 0, f_1 = h_1$
- Neumannova podmínka na horní hranici modelu:

$$d_n = \frac{(z_n - z_{n-1})}{2\Delta t} \cdot C_n^{j+1,k} + \frac{K_n^{j+1,k} + K_{n-1}^{j+1,k}}{2 \cdot (z_n - z_{n-1})}$$

$$e_{n-1} = -\frac{K_n^{j+1,k} + K_{n-1}^{j+1,k}}{2 \cdot (z_n - z_{n-1})}$$

$$f_n = \frac{(z_n - z_{n-1})}{2 \cdot \Delta t} C_n^{j+1,k} \cdot h_n^{j+1,k} - \frac{(z_n - z_{n-1})}{2 \cdot \Delta t} \cdot (\theta_n^{j+1,k} - \theta_n^j) - \frac{K_n^{j+1,k} + K_{n-1}^{j+1,k}}{2} - q_n^j$$

- Neumannova podmínka na dolní hranici modelu:

$$d_1 = \frac{K_1^{j+1,k} + K_2^{j+1,k}}{2 \cdot (z_2 - z_1)}$$

$$e_1 = -\frac{K_1^{j+1,k} + K_2^{j+1,k}}{2 \cdot (z_2 - z_1)}$$

$$f_n = \frac{K_1^{j+1,k} + K_2^{j+1,k}}{2} + q_n^j$$

Z důvodů stability výpočtu se předpokládá, že na dolní hranici modelu je předepsána kladná tlaková výška, proto je kapacita $C_1 = 0$ a vlhkost $\theta_1 = 1$.

Výpočet

Prvky d, e, f tvoří prvky rovnice (9), která se následně řeší numericky, po jednom kroku se obdrží řešení v $(k + 1)$. iteraci. Výpočet je ukončen po definovaném počtu iterací. Autoři volili obvykle 10 iterací, minimum jsou dvě.

Výsledkem Richardsovy rovnice je získání tlakové výšky $h^{(j+1,k+1)}$ v $(k+1)$. iteraci, ze které se vypočte vlhkost $\theta^{j+1,k+1}$ dle vzorce (2), vodivost $K^{j+1,k+1}$ (3) a vodní kapacita $C^{j+1,k+1}$ (5). Tyto výsledky vstupují do výpočtu další iterace.

1.1.2 Úloha transportu

V nenasycené zóně se může vyskytovat kontaminant rozpuštěný ve 3 fázích – kapalně, pevně a plynně. Pro účely modelování úlohy hlubinného úložiště neuvažujeme přestup izotopů do plynné fáze. Důvodem je dlouhý simulační čas transportní úlohy v porovnání s udržení izotopů v plynné fázi v hornině.

Koncentrace rozpuštěných izotopů je velmi nízká, proto v modelu je uvažována pouze lineární sorpční izoterma. Uvažujeme v každém časovém kroku rovnováhu mezi koncentrací v pevné a kapalně fázi danou distribučním koeficientem. Potom transportní úloha je popsána advekčně-disperzní rovnicí (12) [33, 34, 38].

$$\frac{\partial \theta c_k}{\partial t} + \frac{\partial \rho s_k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_k^w \frac{\partial c_k}{\partial z} \right) - \frac{\partial q c_k}{\partial z} - \mu_{w,k} \theta c_k - \mu_{s,k} \rho s_k + \sum_{m=1, m \neq k}^n \mu_{w,m} \theta c_m + \sum_{m=1, m \neq k}^n \mu_{s,m} \rho s_m + \gamma_{w,k} \theta + \gamma_{s,k} \rho - r_k \quad (12)$$

, kde	θ, ρ	vlhkost, hustota horniny	$\left[\frac{m^3}{m^3}, \frac{kg}{m^3} \right]$
	t	čas	$[s]$
	z	svislá osa	$[m]$
	w, s	ve vodní fázi, v pevné fázi	
	c_k, s_k	koncentrace k-tého izotopu ve vodní a v pevné fázi	$\left[\frac{kg}{m^3}, \frac{kg}{kg} \right]$
	D_k^w	disperzní koeficient k-tého izotopu	$\left[\frac{m^2}{s} \right]$
	q	tok	$\left[\frac{m}{s} \right]$
	$\mu_{w,k}, \mu_{s,k}$	radioaktivní rozpad k-tého izotopu	$\left[\frac{1}{s}, \frac{1}{s} \right]$
	$\gamma_{w,k}, \gamma_{s,k}$	reakce nultého řádu	$\left[\frac{kg}{m^3 s}, \frac{1}{s} \right]$
	r_k	zdroje	$\left[\frac{kg}{m^3 s} \right]$

Vztah mezi koncentrací v pevné fázi s_k a v tekuté fázi c_k lze vyjádřit pomocí vzorce (13). Předpokládáme lineární sorpční izotermu.

$$s_k = k_{D,k} \cdot c_k \quad (13),$$

kde $k_{D,k} \left[\frac{m^3}{kg} \right]$ představuje distribuční koeficient pro k -tý izotop.

Dosazením (13) do (12) a zavedením proměnných R_k, E_k, B_k, F_k, G_k , které zvyšují přehlednost výpočtu, obdržíme:

$$\frac{\partial \theta R_k c_k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(E_k \frac{\partial c_k}{\partial z} \right) - \frac{\partial B_k c_k}{\partial z} + F_k c_k + G_k \quad (14)$$

$$R_k = 1 + \frac{\rho}{\theta} \cdot k_{D,k} \cdot c_k \quad [1]$$

$$E_k = \theta D_k^w \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

$$B_k = q \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$F_k = -\mu_{w,k}\theta - \mu_{s,k} \cdot \rho \cdot k_{D,k} \left[\frac{1}{s} \right]$$

$$G_k = \left(\sum_{m=1, m \neq k}^n \mu_{w,m}\theta c_m + \mu_{s,m}\rho k_{D,m} \right) c_m + \gamma_{w,k}\theta + \gamma_{s,k}\rho - r_k \left[\frac{kg}{m^3 \cdot s} \right]$$

Diferenciální rovnice (12) se řeší numericky pomocí metody konečných prvků, přičemž se stanovuje hodnota koncentrace izotopů na každém uzlu i výpočetní sítě. Výpočetní síť má stejnou geometrii jako při výpočtu proudění, protože do výsledků transportu vstupuje vlhkost $\theta(t, z)$. Rovnice (12, 13 a 14) se počítají pro všechny uzly i výpočetní sítě a všechny izotopy k .

Okrajové a počáteční podmínky

Okrajové podmínky se zadávají pro každý izotop na horní a dolní podstavě v $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$. Pro účely modelování hlubinného úložiště se předpokládá na povrchu oblasti nulová koncentrace a na dolní hraně modelu (ve styku s geosférou) hodnota koncentrace vypočtená z modelu transportu izotopů v geosféře. OKP je časově závislá.

Počáteční podmínky je možno zadávat libovolné. Pro účely řešení úlohy hlubinného úložiště předpokládáme, že v nesaturované zóně mají nulovou koncentraci a v saturované zóně hodnotu koncentrace získanou z výpočtu transportu v geosféře.

Numerické schéma

Výsledkem numerického řešení rovnice (14) je určení koncentrace izotopů na všech uzlech výpočetní sítě v závislosti na čase. Časové a prostorové derivace v (14) je třeba nahradit pomocí diferenciálů, tak abychom z výsledků koncentrací v čase j obdrželi koncentrace v čase $j + 1$.

Členy R_k, E_k, B_k, F_k, G_k byly pro každý uzel nahrazeny následujícími numerickými schématy pro každý i -tý uzel za předpokladu ekvidistantních vzdáleností uzlů:

$$\theta R_{i,k} c_{i,k} \approx \frac{\Delta z}{12} |\theta_{i-1} R_{i-1} + \theta_i R_i, \theta_{i-1} R_{i-1} + 6\theta_i R_i + \theta_{i+1} R_{i+1}, \theta_i R_i + \theta_{i+1} R_{i+1}| \cdot \begin{vmatrix} c_{i-1} \\ c_i \\ c_{i+1} \end{vmatrix} \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(E_{i,k} \frac{\partial c_{i,k}}{\partial z} \right) \approx \frac{1}{2\Delta z} |-E_{i-1} - E_i, E_{i-1} + 2E_i + E_{i+1}, -E_i - E_{i+1}| \cdot \begin{vmatrix} c_{i-1} \\ c_i \\ c_{i+1} \end{vmatrix}$$

$$\frac{\partial B_k c_k}{\partial z} \approx \frac{1}{6} |-2B_{i-1} - B_i, -B_{i-1} + B_{i+1}, B_i + 2B_{i+1}| \cdot \begin{vmatrix} c_{i-1} \\ c_i \\ c_{i+1} \end{vmatrix}$$

$$F_k c_k \approx \frac{\Delta z}{12} |F_{i-1} + F_i, F_{i-1} + 6F_i + F_{i+1}, F_i + F_{i+1}| \cdot \begin{vmatrix} c_{i-1} \\ c_i \\ c_{i+1} \end{vmatrix}$$

$$G_k \approx \frac{\Delta z}{6}(G_{i-1} + 4G_i + G_{i+1})$$

Časová derivace na levé straně se aproximuje ve tvaru:

$$\frac{\partial \theta R_k c_k}{\partial t} \approx \frac{(\theta R_{i,k})^{j+1} c_{i,k}^{j+1} - (\theta R_{i,k})^j c_{i,k}^j}{\Delta t} \quad (16)$$

ostatní prvky se počítají jako lineární kombinace simulačního kroku j a $j + 1$ podle vzorce:

$$B_k c_k \approx \varepsilon B_k^{j+1} c_k^{j+1} + (1 - \varepsilon) B_k^j c_k^j \quad (17)$$

a obdobně i pro E_k, F_k . Pro $G_k \approx \varepsilon G_k^{j+1} + (1 - \varepsilon) G_k^j$. Podle typu numerického schématu lze volit ε : $\varepsilon = 0$ (explicitní schéma), $\varepsilon = 0.5$ (Crank Nicholsonovo schéma) a $\varepsilon = 1$ (implicitní schéma).

Rozepsáním prostorových derivací z rovnice (14) do jednotlivých uzlů dle vzorců (15) a aproximováním časových derivací pomocí vzorců (16 a 17) obdržíme maticový tvar (18), který je závislý pouze na koncentracích v krocích j a $j + 1$.

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{c}^{j+1} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{c}^j + \mathbf{r} \quad (18)$$

kde čtvercové matice \mathbf{P}, \mathbf{T} a vektor \mathbf{r} lze rozepsat v rovnici (19):

$$\mathbf{P} = \frac{\Delta z}{12\Delta t} (\theta \mathbf{R}_k)^{j+1} + \varepsilon \left(\frac{\mathbf{E}_k^{j+1}}{2\Delta z} + \frac{\mathbf{B}_k^{j+1}}{6} + \frac{\mathbf{F}_k^{j+1}\Delta z}{12} \right) \quad (19)$$

$$\mathbf{T} = \frac{\Delta z}{12\Delta t} (\theta \mathbf{R}_k)^j - (1 - \varepsilon) \left(\frac{\mathbf{E}_k^j}{2\Delta z} + \frac{\mathbf{B}_k^j}{6} + \frac{\mathbf{F}_k^j\Delta z}{12} \right)$$

$$\mathbf{r} = \varepsilon \frac{\mathbf{G}_k^{j+1}\Delta z}{6} + (1 - \varepsilon) \frac{\mathbf{G}_k^j\Delta z}{6}$$

Čtvercové matice \mathbf{P} a \mathbf{T} mají shodnou strukturu a následující nenulové prvky:

$$\mathbf{P} = \mathbf{T} = \begin{pmatrix} d_1 & e_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_2 & d_2 & e_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_3 & d_3 & e_3 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & b_{n-1} & d_{n-1} & e_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_n & d_n \end{pmatrix} \quad (20)$$

Matici \mathbf{P} (19) lze rozvinout pomocí prostorových derivací v (15) do konečného tvaru (20), který byl zároveň naprogramován.

$$d_1 = \frac{\Delta z_1}{12\Delta t} (3\theta_1 R_1 + \theta_2 R_2) + \frac{\varepsilon}{2\Delta z_1} (E_1 + E_2) + \frac{\varepsilon}{6} (2B_1 + B_2) + \frac{\varepsilon \Delta z_1}{12} (3F_1 + F_2)$$

$$b_i = \frac{\Delta z_{i-1}}{12\Delta t} (3\theta_{i-1} R_{i-1} + \theta_i R_i) + \frac{\varepsilon}{2\Delta z_{i-1}} (E_{i-1} + E_i) + \frac{\varepsilon}{6} (2B_{i-1} + B_i) + \frac{\varepsilon \Delta z_{i-1}}{12} (3F_{i-1} + F_i)$$

$$\begin{aligned}
d_i &= \frac{\Delta z_{i-1}}{12\Delta t} (\theta_{i-1}R_{i-1} + 3\theta_i R_i) + \frac{\Delta z_i}{12\Delta t} (\theta_i R_i + \theta_{i+1}R_{i+1}) + \frac{\varepsilon}{2\Delta z_{i-1}} (E_{i-1} + E_i) + \frac{\varepsilon}{2\Delta z_i} (E_i + E_{i+1}) \\
&\quad + \frac{\varepsilon}{6} (B_{i+1} + B_{i-1}) + \frac{\varepsilon\Delta z_{i-1}}{12} (F_{i-1} + 3F_i) + \frac{\varepsilon\Delta z_i}{12} (3F_i + F_{i+1}) \\
e_i &= \frac{\Delta z_i}{12\Delta t} (\theta_i R_i + \theta_{i+1}R_{i+1}) - \frac{\varepsilon}{2\Delta z_i} (E_i + E_{i+1}) + \frac{\varepsilon}{6} (2B_{i+1} + B_i) + \frac{\varepsilon\Delta z_i}{12} (3F_i + F_{i+1}) \\
d_n &= \frac{\Delta z_{n-1}}{12\Delta t} (\theta_{n-1}R_{n-1} + 3\theta_n R_n) + \frac{\varepsilon}{2\Delta z_{n-1}} (E_{n-1} + E_n) - \frac{\varepsilon}{6} (B_{n-1} + B_n) + \frac{\varepsilon\Delta z_{n-1}}{12} (F_{n-1} + F_n)
\end{aligned}$$

Obdobně se vytvoří matice \mathbf{T} , kdy u prvků B, E, F se nahradí ε za $(1 - \varepsilon)$.

Vektor \mathbf{r} je následující:

$$\begin{aligned}
r_1 &= \frac{\varepsilon\Delta z}{6} (2G_1^{j+1} + G_2^{j+1}) + \frac{(1-\varepsilon)\Delta z}{6} (2G_1^j + G_2^j) + \varepsilon m_1^{j+1} + (1-\varepsilon)m_1^j \\
r_i &= \frac{\varepsilon\Delta z}{6} (G_{i-1}^{j+1} + 4G_i^{j+1} + G_{i+1}^{j+1}) + \frac{(1-\varepsilon)\Delta z}{6} (G_{i-1}^j + 4G_i^j + G_{i+1}^j) + \varepsilon m_i^{j+1} + (1-\varepsilon)m_i^j \\
r_n &= \frac{\varepsilon\Delta z}{6} (G_{n-1}^{j+1} + 2G_n^{j+1}) + \frac{(1-\varepsilon)\Delta z}{6} (G_{n-1}^j + 2G_n^j) + \varepsilon m_n^{j+1} + (1-\varepsilon)m_n^j
\end{aligned}$$

, kde m_i^j představuje hmotnostní přírůstek za jednotku času na uzlu sítě.

Rovnici (18) počítáme numericky: $\mathbf{c}^{j+1} = \mathbf{P}^{-1}(\mathbf{T} \cdot \mathbf{c}^j + \mathbf{r})$ a výsledkem je stanovení koncentrace všech izotopů v $j + 1$ simulačním kroku.

1.1.3 Odstranění nestability modelu

Při výpočtu proudění a transportu vznikají matematicko-fyzikální nestability v modelu. Zde je uveden jejich stručný popis a způsob, jak je lze odstranit.

Výpočet proudění:

- **Modelování odparu a odčerpávání vody.** Odpar vody z povrchu oblasti lze modelovat pomocí okrajové podmínky, kdy je předepsán tok z oblasti. To může vyvolat nefyzikální řešení, kdy je odčerpávána tokem voda, která se fyzicky již v uzlech nevyskytuje. To má za následek, že matematicky se limitně tlaková výška blíží $h \rightarrow -\infty$ a vlhkost $\theta \rightarrow \theta_r$, což vyvolává požadavky na výrazně zkrácení časového kroku $t \rightarrow 0$. Obdobný problém nastává při odčerpávání vody, kdy odtok je předepsán na jednom uzlu výpočetní sítě. Možným řešením je předepsat odpar pomocí zdroje, kdy se odčerpává vody z oblasti v definovaném hloubkovém profilu. Tímto přístupem lze modelovat 1) odčerpávání vody kořenovým systémem, 2) odpar, 3) oběh vody v blízkosti povrchu. Dalším řešením je upravit geometrii modelu jeho prodloužením do nasycené zóny, což umožňuje modelovat časovou změnu hladiny nasycené/nenasycené zóny způsobené srážkami/odparem vody z oblasti.
- **Nenulový tok při zadání počátečních podmínek** má za následek vyrovnávání hladiny v modelu v počátečních simulačních časech. Mohou vznikat výrazné toky podzemní vody. To

má za následek nefyzikální řešení a nutnost zkrátit časový krok. Kontrolu velikosti časového kroku lze řešit pomocí Courantova čísla, které je definováno: $Cr_i^j = \frac{|q_i^j \cdot \Delta t|}{\theta_i^j \cdot \Delta z}$. Úloha je stabilní, jestliže $Cr \leq 1$. Ze znalosti $\max_i Cr_i^j$ lze upravit následující velikost časového kroku při výpočtu.

- **Změna okrajových podmínek v průběhu simulace** je vyvoláno například časově závislou velikostí srážek. Vzniká obdobný problém se stabilitou výpočtu jako při nenulovém toku z počátečních podmínek, kdy dochází k výrazným tokům na uzlech výpočetní sítě. Problém lze odstranit zmenšením časového kroku, či postupnou změnou velikosti OKP. Protože dochází k nespojitě změně toku, je nutno odhadnout Courantovo číslo a podle něj upravit velikost Δt .
- **Dlouhý časový krok** má za následek nestabilitu a nefyzikální řešení. Problém lze odstranit pomocí výpočtu Courantova čísla.

Výpočet transportu:

- **Oscilace řešení a záporné koncentrace** jsou ovlivněny převažující advekcí nad disperzí a volbou délky časového kroku. Maximální simulační krok lze zjistit pomocí bezrozměrného Pecletova čísla $Pe_i^j = \frac{q_i^j \Delta t}{\theta_i^j D_{i,k}^j}$, kde $q [\frac{m}{s}]$ je velikost toku, Δx velikost elementu [m], θ vlhkost [1] a D disperzní koeficient [$\frac{m^2}{s}$]. Numerické oscilace lze prakticky zanedbat, jestliže $Pe < 5$. Dalším ze způsobů zvýšení stability výpočtu je zahrnutím tortuozity, potom výsledný disperzní koeficient ve vodní fázi se vypočte: $D^w = \frac{D_L |q|}{\theta} + D_w \tau_w$, kde D_L je podélná disperzivita [m], D_w molekulární difuzní koeficient [$\frac{m^2}{s}$] a $\tau_w = \frac{\theta^{7/3}}{\theta_s^2}$ je tortuozita.
- **Dlouhý časový krok** zvyšuje Pecletovo číslo a tím pádem vznikají při výpočtu transportu oscilace a záporné koncentrace.
- **Nulový disperzní koeficient** a zároveň neuvážování disperzivity má za následek nulový jmenovatel u Pecletova čísla a tím pádem oscilační řešení transportu.
- **Změny koncentrací v OKP, nebo v modelu** způsobují velké koncentrační změny na uzlech, které způsobují oscilační a záporné řešení. Lze odstranit pouze zkrácením časového kroku.

Nestability dány modelem:

- **Malá výška modelu** ve vztahu s předepsanou Dirichletovou okrajovou podmínkou. Jestliže na dolní straně modelu je předepsána Dirichletova OKP a tlaková výška není $h \gg 0$, potom při vydatných srážkách se posouvá hranice nasycené zóny vzhůru, zatímco OKP je konstantně neměnná. To má za následek výrazný gradient tlakové výšky v uzlech na dolní podstavě a tím způsobený velký tok, který nemá opodstatnění ve fyzikálním řešení úlohy. Problém lze odstranit zvětšením výšky modelu, kdy výška nasycené zóny dosahuje několika metrů.

1.2 Implementace základního modelu

Pro stanovení bezpečnosti hlubinného úložiště je třeba prokázat jeho bezpečnost přes všechny inženýrské bariéry a následně při přestupu látek skrz geosféru do biosféry. Mezi geosférou a biosférou je nenasyčená zóna, která dosud nebyla komplexně řešena a kterou řeší tento projekt.

Jedním ze SW, které se používají pro modelování proudění podzemní vody a transportu rozpuštěných látek v geosféře je Flow123D, který umožňuje stanovit míru koncentrace látky na každém z elementů 3D výpočetní sítě v závislosti na čase.

SW Biorad využívá výstupů koncentrací rozpuštěných látek z geosféry, které byly vypočteny SW Flow123D [39, 40]. Výsledky transportu v geosféře využívá jako okrajovou podmínku v modelu přípovrchové zóny. Z velikosti srážek na oblasti, typu horninového podloží a hloubky nasycené zóny numericky stanovuje časovou a prostorovou závislost koncentrace, která vstupuje do následného modelu biosféry.

1.2.1 Popis vstupů z modelu geosféry

SW Biorad předpokládá, že existuje textový soubor (formát *.msh) s výstupem simulace transportu z geosféry, který je proveden v SW Flow123d. Soubor s výstupy koncentrací lze vizualizovat např. v SW GMSH, čímž uživatel může zjistit číselné označení těch elementů (především povrchových), které mají nadlimitní míru koncentrace izotopů a u kterých následně provede výpočet v nenasycené zóně.

Struktura souborů formátu *.msh je následující:

- hlavička souboru,
- číselné označení uzlů a jejich souřadnice,
- číselné označení elementů, dimenze elementů a čísla uzlů tvořící vrcholy elementů,
- výsledky koncentrací jednotlivých izotopů
 - simulační čas 0, izotop 0,
 - element 0 koncentrace
 - element 1 koncentrace
 - ...
 - ...
 - simulační čas 0, izotop n,
 - simulační čas t1, izotop 0,
 - ...
 - simulační čas t1, izotop n,
 - ...
 - ...
 - simulační čas tm, izotop n.

SW Biorad při znalosti čísla analyzovaného elementu výpočetní sítě zjistí ze souboru formátu *.msh příslušné koncentrace pro jednotlivé izotopy, které tvoří okrajovou podmínku transportu pro řešení transportu v nenasycené zóně.

1.2.2 Popis modelu v nenasycené zóně

V geosféře je dominantní proudění horizontální, zatímco v nenasycené zóně vertikální. Proto model nenasycené zóny tvoří 1D v ose z a roviny x, y degradují do jediného bodu. V rámci počátečních podmínek proudění se požaduje, aby na dolní straně modelu byla nasycená zóna a z důvodu numerické stability aby dosahovala tloušťky několika metrů. Hladinu rozhraní nasycená / nenasycená

zóna je zjištěna měřením a tato piezometrická výška tvoří obvykle počáteční podmínku proudění v celém modelu. Okrajové podmínky proudění jsou na povrchu dány objemem vody vstupující do hlubokého oběhu (mohou být při zkrácení časového kroku závislé na čase) a na spodní části modelu tlakovou výškou (může být závislá na čase). Lze předpokládat odběr vody kořenovým systémem, potom je možno definovat odběr formou zdrojů, jejichž velikost se může měnit v závislosti na hloubce.

Okrajové podmínky pro transport jsou pro účely modelování hlubinného úložiště na povrchu nulové. V nasycené zóně je proudění vody horizontální, proto se přebírají hodnoty koncentrací na daném elementu z výsledků transportu geosférického modelu. Tímto způsobem lze modelovat propojení mezi geosférickým modelem a modelem nenasycené zóny. Při modelování úložiště se předpokládá na povrchu nulová koncentrace. Model transportu látek v sobě zahrnuje sorpci, disperzi a radioaktivní rozpad.

Výsledkem úlohy proudění je stanovení tlakové výšky, vodního obsahu a toku na každém uzlu výpočetní sítě v závislosti na čase. Výsledkem úlohy transportu je stanovení koncentrace látky na každém uzlu výpočetní sítě.

1.2.3 Popis inicializačního souboru pro výpočet proudění a transportu v nenasycené zóně

Inicializační soubor pro výpočet proudění a transportu látek v nenasycené zóně je pojmenován „UZ_conf_file.yaml“ a je umístěn v adresáři „inputs“. Jeho struktura je přesně definována a pro odsazení doprava musí být vždy použity dvě mezery. V příkladu inicializačního souboru jsou čísla řádků uvedena pro vyšší přehlednost, v souboru se nevyskytují.

1	simulation_parameters:	sekce parametrů simulace
2	simulation_time: 100.0	celkový simulační čas
3	Dt: 0.01	simulační krok
4	flow_iteration_count: 10.0	počet iterací pro výpočet proudění
5	output_step_time: 0.1	časový krok zápisu do výstupu
6	units:	sekce druhů jednotek
7	length: m	délkové jednotky, lze volit m, dm, cm, mm
8	mass: kg	váhové jednotky, lze volit kg, g, mg, μ g, ng
9	time: day	časové jednotky, lze volit s, h, den, rok

Výstupy ze souborů jsou vypočteny ve stejných jednotkách jako jednotky na vstupu.

10	outputs:	sekce výstupů
11	- entity: nodes	
12	physical_quantity: c_water	
13	file_format: gmesh_v2_ASCII	
14	file_name: ../outputs/UZ_results.msh	jméno výstupního souboru
15	mesh:	sekce výpočetní sítě
16	element_height: 0.1	velikost elementů
17	height: 10.0	výška modelu
18	horizons:	
19	- bottom: 0	
20	parameters_mode: material	

```

21     material: Loam
22     - bottom: 4.0
23     parameters_mode: granular_structure
24     sand: 10.0
25     silt: 10.0
26     clay: 80.0
27     density_kg_m3: 1300.0
28     - bottom: 6.0
29     parameters_mode: van_genuchten
30     theta_r: 0.1
31     theta_s: 0.5
32     alpha: 1.5
33     n: 1.5
34     Ks: 1.0e-05
35     density_kg_m3: 1300.0

```

Materiálové vlastnosti půdy se definují od spodní hranice modelu k povrchu. V případě více druhů půd se definuje pomocí rozhraní, kde dochází ke změně vlastností hornin. Ve výše uvedeném případě je první druh horniny mezi 0 až 4 m (řádek 19 a 22), druhý od 4 m do 6 m a následně od 6 m do maximální výšky modelu.

Pomocí klíčového slovo *parameters_mode* se definuje způsob definování typu hornin. Buď se zadává *material* (vybere se materiál z předdefinovaných typů), nebo *granular_structure* (zadává se procentuální složení půdy a hustota v kg/m³), nebo *van_genuchten* (zadávají se van Genuchtenovy parametry horniny). U van Genuchtenových parametrů se hydraulická vodivost zadává v jednotkách uvedených v sekci druhů jednotek.

V sekci *parameters_mode* je definován typ horniny. Je možno zadávat typ horniny buď

```

36  flow:                                     sekce definování toků
37      top_boundary_conditions:             OKP na horní podstavě modelu
38          - time: 0.0
39            type: neumann
40            flux: 0.001
41          - time: 1.0
42            type: neumann
43            flux: -0.002
44      bottom_boundary_conditions:
45          - time: 0.0
46            type: dirichlet
47            head: 5.0
48      initial_conditions:                  počáteční podmínky
49          - top_head: -3.0                 tlaková výška na horní hranici modelu
50          - bottom: 0.0                   definování dolní hranice modelu
51            head: 7.0                     tlaková výška na dolní hranici modelu
52      sources:                             zdroje
53          - bottom: 0.0
54            flux_of_height_unit: 0.0

```

Na řádcích 38 až 44 se definuje časová posloupnost okrajových podmínek. Časový sled musí být vzestupný. V sekci type se definuje typ OKP. Buď velikost toku pomocí klíčového slova „neumann“,

nebo velikost tlakové výšky pomocí klíčového slova „dirichlet“. Z numerických důvodů musí být v každém časovém okamžiku minimálně na jedné z hranic definována dirichletova OKP.

Při použití klíčového slova neumann se velikost toku zadává pomocí *flux* [m/s] s uvedením hodnoty v jednotkách uvedených v sekci units. Při Dirichletově OKP pomocí klíčového slova *head* s uvedením tlakové výšky [m] v jednotkách ze sekce units.

Obdobným způsobem se definuje i okrajová podmínka proudění na spodní hranici modelu.

Počáteční podmínky (řádek 48 až 51) se definují pomocí tlakové výšky na horní hranici modelu (top_head) a dále spodní hranice modelu (bottom) s uvedením tlakové výšky. Tlaková výška je v celém modelu lineárně interpolovaná. V případě, že se gradient tlakové výšky se mění s hloubkou, může být uvedeno několik sekcí *bottom*, *head*. Pak se uvede výška rozhraní a příslušná tlaková výška v daném bodě. Tlaková výška je opět lineárně interpolovaná.

Pomocí zdrojů (řádek 52 až 54) lze definovat odběr vody z určité výšky jako například studně či odběr vody kořenovým systémem. Opět se zadává posloupnost výšek (*bottom*) s uvedením velikosti zdroje pomocí *flux_of_height_unit*, které má jednotky dle sekce unit v $\frac{m^3}{ms}$.

55	transport:	sekce zadávání transportních vstupů
56	tortuosity: 'yes'	tortuozita ano/ne
57	dispersivity: 0.1	velikost dispersivity
58	numerical_scheme: crank_nicolson	druh numerického schématu

Doporučujeme u tortuosity vyplnit „yes“, protože omezuje vznik numerických oscilací při výpočtu. Disperzivita se zadává v jednotkách uvedených v sekci units. Numerické schéma lze volit buď implicitní (*implicit*), explicitní (*explicit*), nebo Crank Nicolsonovo (crank_nicolson).

59	isotopes:	sekce vlastností izotopů
60	- name: A	název izotopu
61	diff_coef_m2_s: 1.0e-09	difúzní koeficient v $\frac{m^2}{s}$
62	dist_coef_m3_kg: 0.0	distribuční koeficient v $\frac{m^3}{kg}$
63	- name: residual	
64	diff_coef_m2_s: 1.0e-09	
65	dist_coef_m3_kg: 0.0	
66	isotopes_half_life:	definování rozpadu izotopů
67	- isotope: A	
68	new_isotope: residual	izotop na který se rozpadá izotop A
69	half_life: 1000000.0	poločas rozpadu

Difúzní a distribuční koeficient musí být nezáporné číslo. V rámci rozpadů se může rozpadat jeden izotop na další, který je uveden za ním v seznamu. Poločas rozpadu se definuje v jednotkách uvedených v sekci *units*.

70	top_boundary_conditions:	sekce OKP transportu na povrchu
71	- isotope: A	definování pro izotop A
72	time_function:	
73	- time: 0.0	časová posloupnost změn OKP


```

74         c_flux: 0.0                koncentrace izotopu
75     - isotope: residual
76       time_function:
77         - time: 0.0
78         c_flux: 0.0
79     bottom_boundary_conditions:      sekce OKP transport na dolní podstavě
80     - isotope: A                    definování pro izotop A
81       time_function:
82         - time: 0.0                časová posloupnost změn OKP
83         c_flux: 1.0e-09            koncentrace izotopu
84         - time: 10.0
85         c_flux: 2.0e-09
86         - time: 30.0
87         c_flux: 3.0e-09
88         - time: 50000.0
89         c_flux: 2.0e-09
90     - isotope: residual
91       time_function:
92         - time: 0.0
93         c_flux: 0.0

94     saturated_zone_concentration:
95       apply: 'yes'
96       height: 7.0

```

Sekce `saturated_zone_concentration` umožňuje zadat konstantní koncentraci do určité výšky nad dolní část modelu. Obvykle se využívá počáteční výška nasycené zóny. Důvodem je, že pro výpočet proudění a zlepšení numerického výpočtu je třeba mít oblast s nasycenou zónou. V té je proudění vesměs horizontální, takže na element vniká ze strany kontaminovaná voda, která má koncentraci zadanou v okrajových podmínkách na dolní podstavě.

```

97     initial_conditions:              sekce počátečních podmínek transportu
98     - isotope: A
99       concentration_in_water:
100        - bottom: 0.0
101          c: 1.0e-09
102        - bottom: 7.0
103          c: 0.0
104     - isotope: residual
105       concentration_in_water:
106        - bottom: 0.0
107          c: 0.0

```

Počáteční podmínky jsou definovány pro jednotlivé izotopy, hodnoty koncentrací lze zadávat po vrstvách konstantní. Hodnoty koncentrací musí být nezáporné.

1.3 Příklady

Příklad 1 – sinusový průběh srážek

Základní parametry úlohy:	hloubka modelu	1000 cm
	Počet uzlů	101
	Simulační čas	5000 dní, řešena i úloha pro 50 000 dní

Simulační krok 1 den

Počet iterací v každém kroku 10

Horninové parametry: Složení horniny je stejné v celém profilu a skládá se ze 40 % prachu, 15 % jílu a 45 % písku. Vysušená hustota horniny je 1500 kg/m^3 . Tomuto složení odpovídají následující van Genuchtenovy parametry:

$$K_s = 0.1652 \text{ m/den} \quad n = 1.469 \quad \theta_r = 0.0492 \quad \theta_s = 0.3687 \quad a = 1.355 \text{ m}^{-1}$$

Okrajové a počáteční podmínky proudění: Na povrchu oblasti je předepsán tok ve formě srážek, od kterého je odečten odpar. Časový průběh je předepsán pomocí sinusoidy s periodou jednoho roku pomocí vzorce:

$$okp_{top_{Flux}} = -0.12 \cdot \sin(2 \cdot 3.14 \cdot t / 360) - 0.1 \text{ [cm/den]}$$

což předpokládá průměrný vtok o velikosti 360 mm/rok.

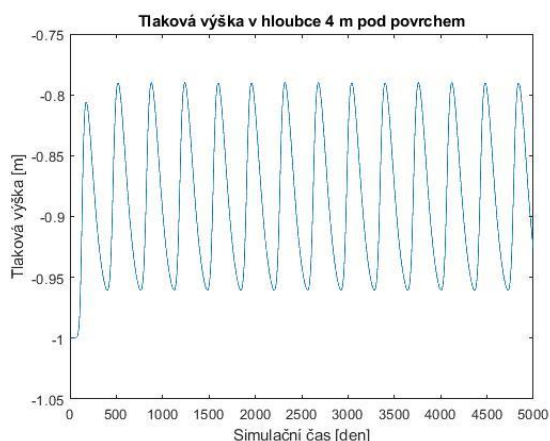
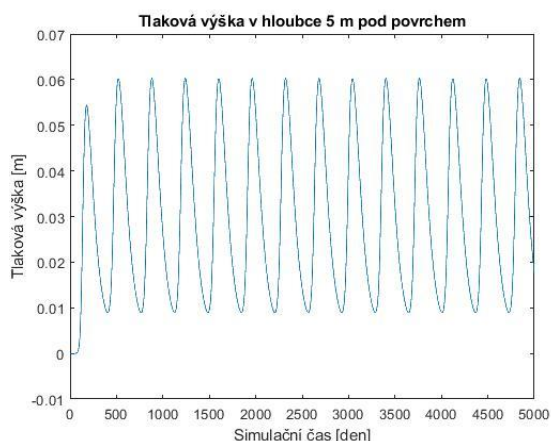
Výška modelu je 10 m a jako počáteční podmínka je předepsaná piezometrická výška 5 m. Na dolní podstavě je definována Dirichletova okrajová podmínka ve formě tlakové výšky 5 m.

Výsledkem proudění je časový průběh tlakové výšky a saturace v závislosti na čase, které byly zjišťovány na každém z výpočetních uzlů. Výsledky tlakové výšky a saturace v hloubce 5 m (blízkost rozhraní saturevané a nesaturevané zóny), 4 m, 3 m, 2 m, 1 m a na povrchu oblasti. Na obrázcích je průběh tlakové výšky v závislosti na čase. V Tab. 1 jsou pro každý sledovaný uzel uvedeny maximální, minimální a střední tlakové výšky.

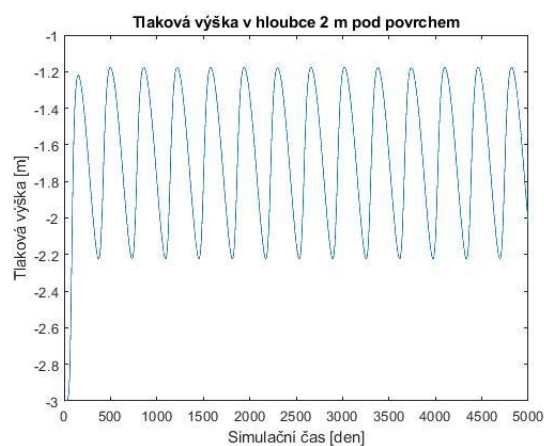
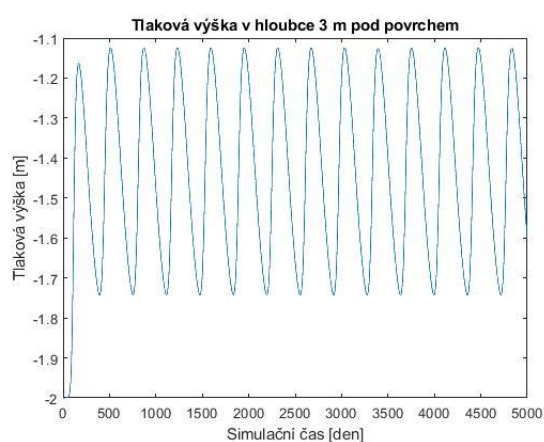
Tab. 1 Modul nesaturevané zóny – příklad 1 – tlakové výšky

Výška uzlu	Tlaková výška min [m]	Tlaková výška střed [m]	Tlaková výška max [m]
5 m	0.009	0.030	0.063
6 m	-0.961	-0.885	-0.790
7 m	-1.742	-1.437	-1.124
8 m	-2.224	-1.660	-1.177
9 m	-2.603	-1.774	-1.172
10 m (povrch oblasti)	-3.536	-1.949	-1.156

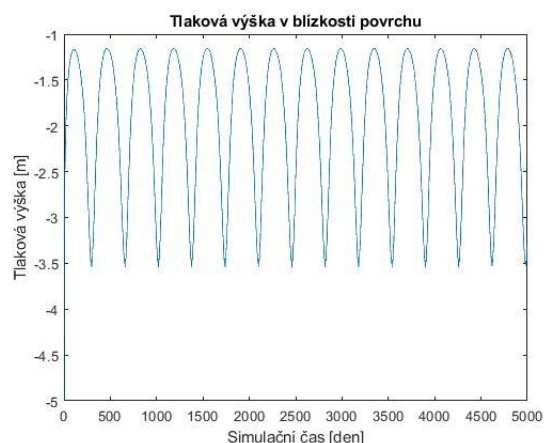
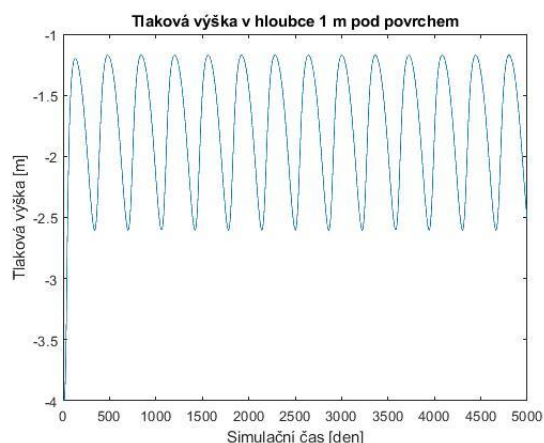
Z obrázků 1 až 3 jsou vidět průběhy změn tlakové výšky v různých hloubkách pod povrchem. V 5 m pod povrchem (v blízkosti nasycené zóny), hladina tlakové výšky kolísá v závislosti na srážkách asi o 6 cm; ve 4 m asi o 17 cm; ve 3 m pod povrchem o 63 cm; ve 2 m o 105 cm; v 1 m pod povrchem o 143 cm; v blízkosti povrchu kolísá tlaková výška o 238 cm.



Obr. 1 Tlaková výška v závislosti na čase v hloubce 5 m (rozhraní saturované a nesaturované zóny) a 4 m pod povrchem (přibližné rozhraní saturované a nesaturované zóny)



Obr. 2 Tlaková výška v závislosti na čase v hloubce 3 m a 2 m pod povrchem



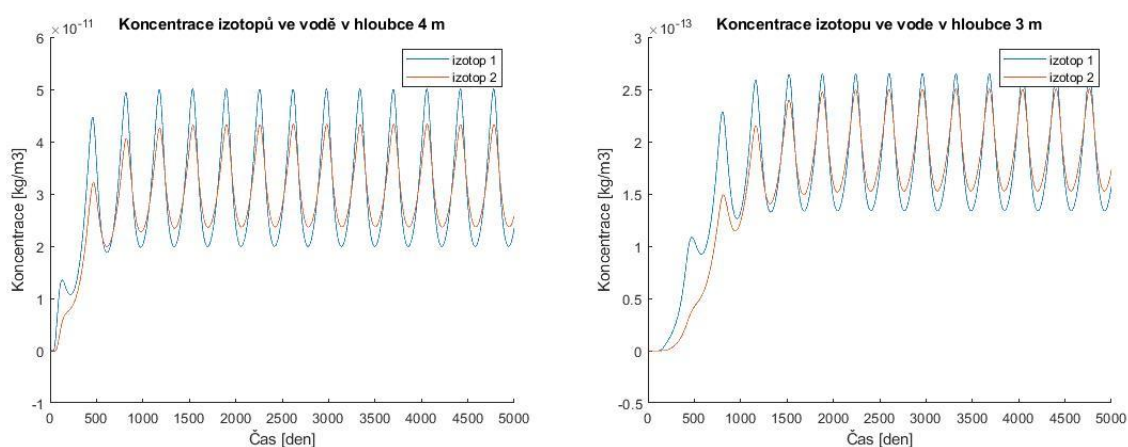
Obr. 3 Tlaková výška v závislosti na čase v hloubce 1 m pod povrchem a v blízkosti povrchu

Transportní úloha: Na úloze proudění, viz výše, je vypočten transport 2 izotopů. Poločas rozpadu izotopu 1 je 10000 dní a rozpadá se na stabilní izotop 2. Difuzní koeficient je zvolen $10^{-3} \text{ m}^2/\text{den}$ ($1.15 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$) a podélná disperzivita je 10 cm. Distribuční koeficient je rozdílný. U prvního izotopu je zvolen 0 a u druhého $0.0001 \text{ m}^3/\text{kg}$ [41]. Tyto hodnoty představují nesorbující, nebo málo sorbující izotop. Izotopy, které v geosféře sorbují, mají na rozhraní nasycená/nenasycená zóna prakticky nulovou koncentraci.

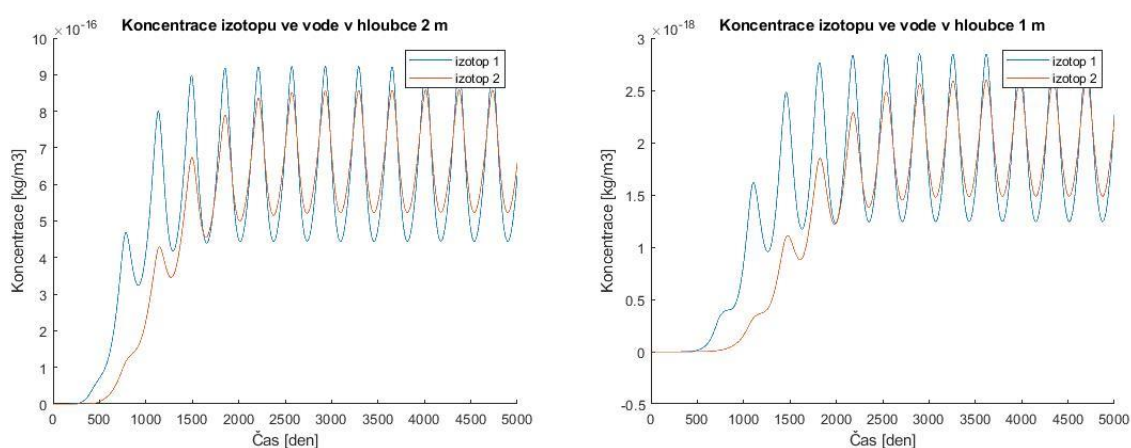
Okrajové podmínky modelu předpokládají, že na horní podstavě modelu nevniká do oblasti žádná kontaminace, na dolní podstavě je u obou izotopů koncentrace látky $1 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m}^3$. Na počátku simulace je koncentrace v nasycené zóně $1 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m}^3$. Lze předpokládat, že v nasycené zóně bude probíhat i horizontální proudění, kdy koncentrace látky je konstantní v čase. Proto je horizontální proudění v nasycené zóně modelováno tím, že v každém časovém kroku je v ní upravována koncentrace na hodnotu $1 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m}^3$. Změna koncentrace v nasycené oblasti tvoří zdroj. V nenasyčené části modelu předpokládáme nulovou počáteční podmínku.

Výsledky transportu:

U obou modelů byl zjišťován průběh koncentrace na elementech ve vodě v závislosti na čase. Výsledky jsou uvedeny v grafech 4 a 5 podle hloubky pod povrchem. Z grafů je patrné, že přibližně od simulačního času 2000 dní dochází vlivem sinusové velikosti srážek i k periodicky sinusovým výstupům koncentrace izotopů.



Obr. 4 Koncentrace izotopů ve vodě v hloubce 4 m a 3 m pod povrchem



Obr. 5 Koncentrace izotopů ve vodě v hloubce 2 m a 1 m pod povrchem

Závěr:

V modelovém příkladu byl řešen transport nesorbujícího/sorbujícího kontaminantu s jeho radioaktivním rozpadem. V modelové úloze bylo uvažováno, že nasycená zóna se nachází 5 m pod

povrchem oblasti. Počáteční koncentrace je zvolena 10^{-9} kg/m^3 . Na obrázcích 4 a 5 je vyobrazení průběhu koncentrace v určitých hloubkách. Při výpočtu transportu došlo k výraznému poklesu koncentrace v nenasycované oblasti v blízkosti povrchu, dle modelového příkladu asi o 10 řádů, což je dáno především velkou mírou infiltrace srážek do oblasti.

V reálném prostředí však snížení koncentrace může výrazně ovlivnit a) typ půdy, b) hloubka nenasycované zóny, c) velikost srážek a odparu, d) zdroje (odběr vody kořenovým systémem, studny apod.).

Příklad 2 – komplexní transport látek v nenasycené zóně

Příklad 2 se zabývá transportem 10 vytipovaných izotopů (^{14}C , ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{59}Ni , ^{79}Se , ^{107}Pd , ^{126}Sn , ^{129}I , ^{135}Cs a ^{238}U), které se transportují z hlubinného úložiště. Izotopy mají odlišné fyzikální vlastnosti, jako jsou poločas rozpadu, velikosti difúzního a distribučního koeficientu. Viz tab. 2. To má za následek, že náběh koncentrace jednotlivých izotopů je zaznamenán na rozhraní nasycené a nenasycené zóny v odlišných simulačních časech.

Tab. 2 Velikost difúzních a distribučních koeficientů modelovaných izotopů

Izotop	Poločas rozpadu [rok]	Difúzní koeficient $[\text{m}^2/\text{s}]$	Distribuční koeficient $[\text{m}^3/\text{kg}]$
^{14}C	5700	$1\text{e-}9$	0.0005
^{36}Cl	301 000	$1\text{e-}9$	0
^{41}Ca	102 000	$1\text{e-}9$	0.0001
^{59}Ni	76 000	$1\text{e-}9$	0.01
^{79}Se	356 000	$1\text{e-}9$	0.0005
^{107}Pd	6 500 000	$1\text{e-}9$	0.0001
^{126}Sn	230 000	$1\text{e-}9$	0.0
^{129}I	16 100 000	$1\text{e-}9$	0.0
^{135}Cs	2 300 000	$1\text{e-}9$	0.01
^{238}U	4 468 000 000	$1\text{e-}9$	0.1

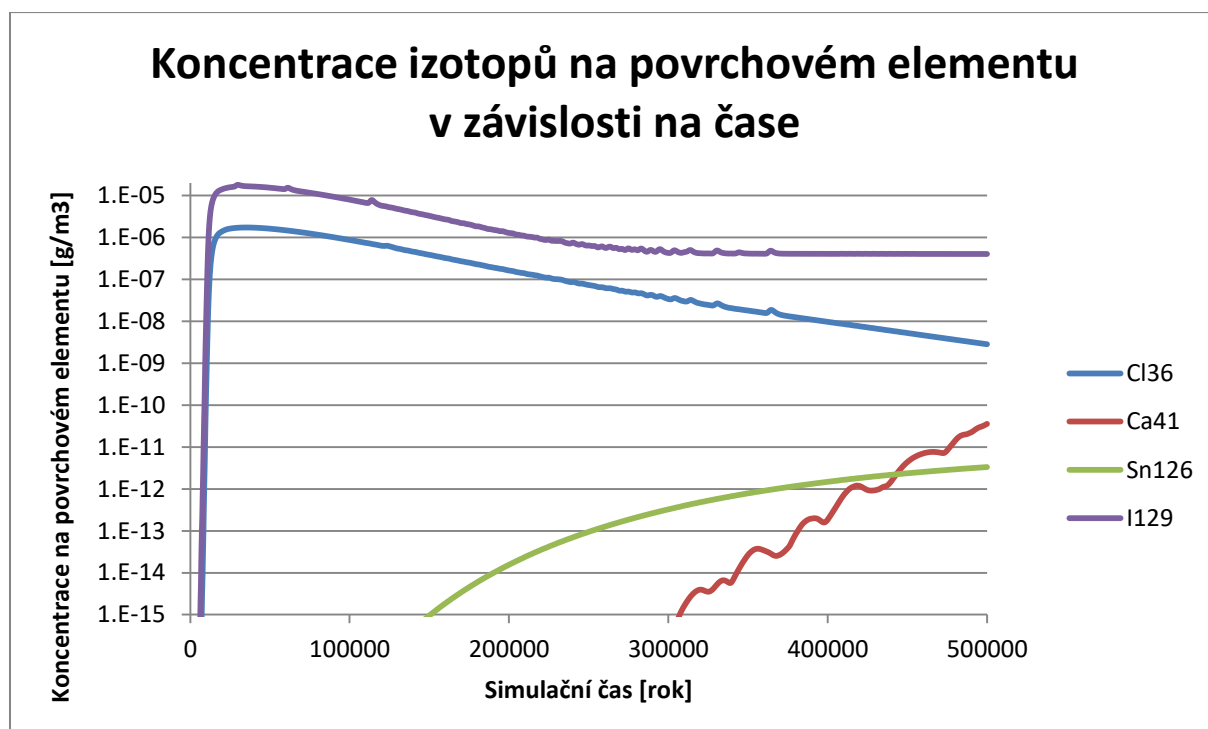
Velikosti koncentrací zaznamenaných na povrchovém elementu jsou řádově odlišné. To je způsobeno odlišnou hmotností uvolňování izotopů z úložiště a zároveň odlišnými difúzními a sorpčními vlastnostmi geosféry. Izotopy ^{59}Ni , ^{79}Se , ^{107}Pd , ^{126}Sn , ^{135}Cs a ^{238}U vlivem vysokého distribučního koeficientu mají prakticky nulovou kontaminaci na povrchovém elementu.

Pro účely modelování byla zvolena hlinito-písčitá hlína, která má následující van Genuchtenovy parametry: $\theta_r = 0.065$, $\theta_s = 0.41$, $\alpha = 7.5 \left[\frac{1}{\text{m}} \right]$, $n = 1.89$, $K_s = 1.061 \left[\frac{\text{m}}{\text{den}} \right]$.

Z modelu geosféry (2D geometrie, 7364 elementů) byl vybrán jeden element, který se nachází na povrchu oblasti v blízkosti vodního toku, a zároveň byla u něj zaznamenána nejvyšší koncentrace izotopů. Koncentrace (závislé na čase) z tohoto elementu vstupují jako okrajová podmínka transportu do modelu nenasycované zóny.

Geometrie modelu nenasycované zóny je 10 m vysoká a výška elementu je zvolena na 10 cm. Satureovaná zóna je v dolních 8 m, nad ní leží nenasycovaná zóna. Počáteční podmínka proudění je konstantní piezometrická výška v celém modelu (8 m). Počáteční podmínka transportu je nulová.

Okrajové podmínky proudění – na dolní podstavě je konstantní piezometrická výška, na horní podstavě tok představující srážky vstupující do hlubšího oběhu. Bylo vytvořeno několik scénářů, které se odlišují velikostí okrajové podmínky proudění. Okrajové podmínky transportu jsou převzaty z modelu geosféry na celé výšce nasycené zóny. Časový průběh okrajové podmínky transportu je zobrazen na obr. 6. Ostatní izotopy mají nižší koncentraci než $1\text{E-}15\text{ g/m}^3$. Celkový simulační čas $t = 500\,000$ let, časový krok je zvolen 0.1 roku.



Obr. 6 Průběh okrajové podmínky transportu látek

Byly voleny různé velikosti okrajové podmínky na horní hraně modelu představující velikost srážek vstupující do hlubokého oběhu. Byly zvoleny následující hodnoty: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 a 80 mm/rok. Výsledkem simulace jsou časové průběhy izotopů v závislosti na čase na jednotlivých uzlech výpočetní sítě. Ty následně vstupují do biosférického modelu.

V tabulce 3 jsou uvedeny výsledky koncentrací izotopů ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{126}Sn a ^{129}I v simulačních časech 50 000, 100 000 a 200 000 let v hloubkách 30, 50 a 100 cm pod povrchem a v nasycené zóně. Výsledky jsou uvedeny pro velikosti srážek 0, 20 a 50 mm/rok.

Tab. 3 Výsledky koncentrací ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{126}Sn , ^{129}I v různých simulačních časech, pro různou úroveň infiltrace srážek v rozdílných hloubkách pod povrchem

Cl36	50 000 let				100 000 let				200 000 let			
srážky [mm/rok]	30 cm	50 cm	100 cm	nasycená zóna	30 cm	50 cm	100 cm	nasycená zóna	30 cm	50 cm	100 cm	nasycená zóna
0	1.5E-06	1.6E-06	1.6E-06	1.6E-06	8.3E-07	8.4E-07	8.6E-07	8.8E-07	1.6E-07	1.6E-07	1.6E-07	1.7E-07
20	1.1E-12	8.2E-12	1.1E-09	1.6E-06	6.1E-13	4.5E-12	6.1E-10	8.8E-07	1.2E-13	8.4E-13	1.2E-10	1.7E-07
50	2.0E-13	1.6E-12	2.8E-10	1.6E-06	1.1E-13	8.4E-13	1.5E-10	8.8E-07	2.0E-14	1.6E-13	2.8E-11	1.7E-07

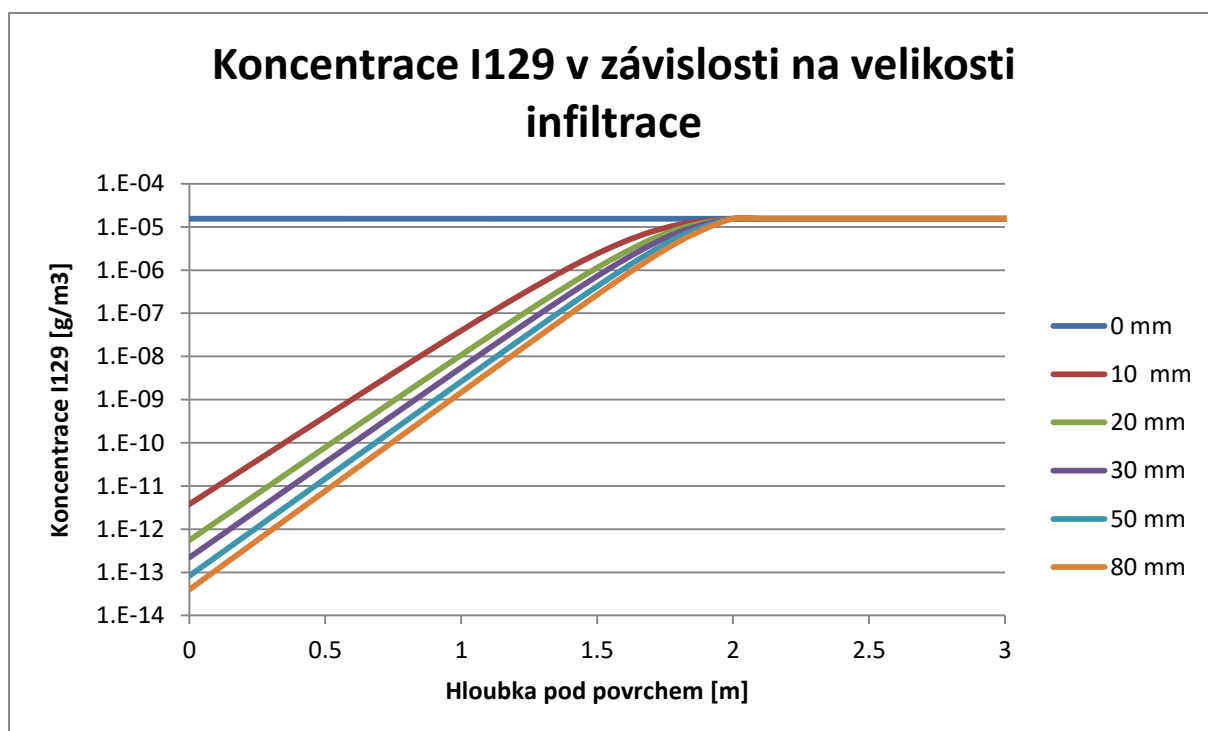
Ca41	50 000 let				100 000 let				200 000 let			
srážky [mm/rok]	30 cm	50 cm	100 cm	nasycená zóna	30 cm	50 cm	100 cm	nasycená zóna	30 cm	50 cm	100 cm	nasycená zóna
0	8.5E-19	8.6E-19	9.3E-19	1.0E-18	8.5E-19	8.6E-19	9.3E-19	1.0E-18	8.5E-19	8.6E-19	9.3E-19	1.0E-18
20	7.0E-25	5.1E-24	7.0E-22	1.0E-18	7.0E-25	5.1E-24	7.0E-22	1.0E-18	7.0E-25	5.1E-24	7.0E-22	1.0E-18
50	1.2E-25	9.5E-25	1.7E-22	1.0E-18	1.2E-25	9.5E-25	1.7E-22	1.0E-18	1.2E-25	9.5E-25	1.7E-22	1.0E-18

Sn126	50 000 let				100 000 let				200 000 let			
srážky [mm/rok]	30 cm	50 cm	100 cm	nasycená zóna	30 cm	50 cm	100 cm	nasycená zóna	30 cm	50 cm	100 cm	nasycená zóna
0	9.3E-19	9.3E-19	9.7E-19	1.0E-18	6.9E-18	7.1E-18	7.5E-18	7.9E-18	1.4E-14	1.4E-14	1.4E-14	1.5E-14
20	7.0E-25	5.1E-24	7.0E-22	1.0E-18	5.5E-24	4.0E-23	5.5E-21	7.9E-18	1.0E-20	7.5E-20	1.0E-14	1.5E-14
50	1.2E-25	9.5E-25	1.7E-22	1.0E-18	9.5E-25	7.5E-24	1.3E-21	7.9E-18	1.8E-21	1.4E-20	2.5E-18	1.5E-14

I129	50 000 let				100 000 let				200 000 let			
srážky [mm/rok]	30 cm	50 cm	100 cm	nasycená zóna	30 cm	50 cm	100 cm	nasycená zóna	30 cm	50 cm	100 cm	nasycená zóna
0	1.6E-05	1.6E-05	1.6E-05	1.5E-05	8.1E-06	8.1E-06	8.1E-06	8.1E-06	1.3E-06	1.3E-06	1.3E-06	1.3E-06
20	1.1E-11	7.8E-11	1.1E-08	1.5E-05	5.6E-12	4.1E-11	5.6E-09	8.1E-06	9.1E-13	6.6E-12	9.1E-10	1.3E-06
50	1.9E-12	1.5E-11	2.6E-09	1.5E-05	9.7E-13	7.7E-12	1.4E-09	8.1E-06	1.6E-13	1.2E-12	2.2E-10	1.3E-06

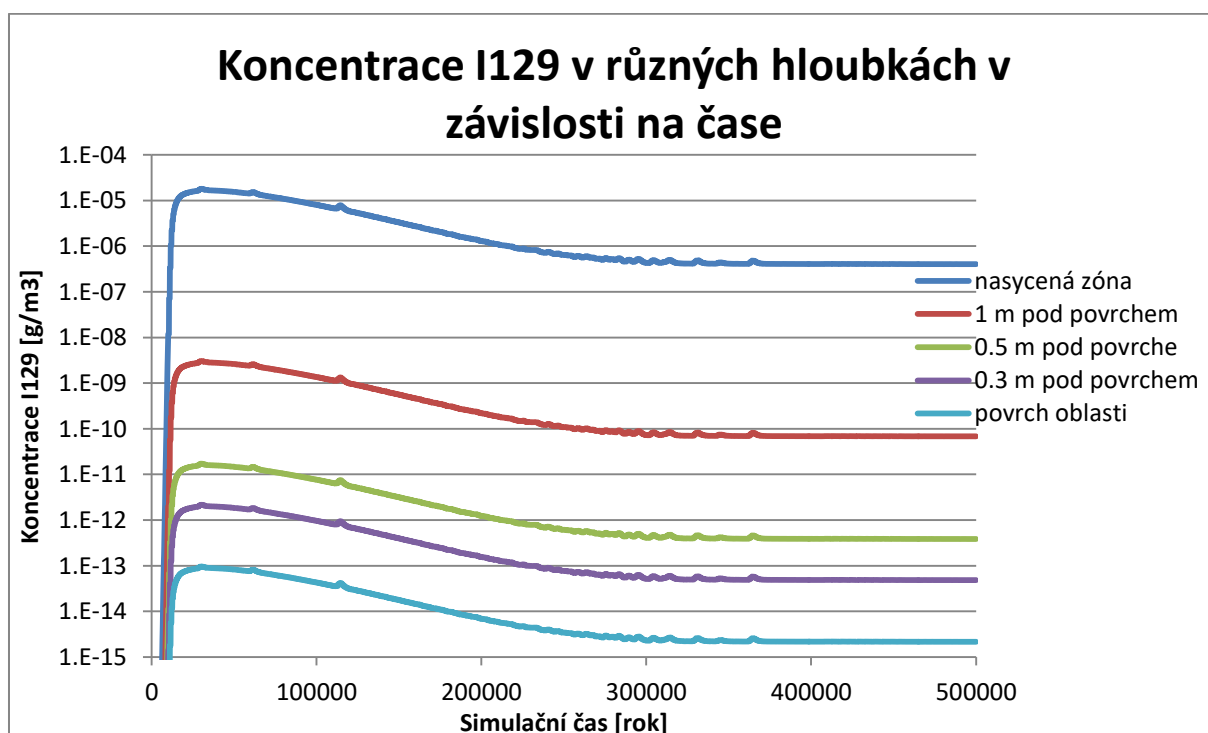
Z tabulky 3 je patrná významná závislost na infiltraci vodních srážek do nesaturované zóny. Pro každý z izotopů a simulační čas platí při shodné velikosti infiltrace, že poměr koncentrací kontaminantu v určité výšce v nesaturované zóně k velikosti okrajové podmínky je konstantní. To znamená, že míra mísení koncentrací v nesaturované zóně je dána především velikostí infiltrace vodních srážek a nezávisí na simulačním čase ani druhu izotopu.

Na obr. 7 jsou vyobrazeny průběhy koncentrací ^{129}I v závislosti na hloubce v simulačním čase 50 000 let pro různé velikosti infiltrace srážek [42]. Na x-ové ose je hloubka pod povrchem, na y-ové ose koncentrace látky v logaritmických souřadnicích.



Obr. 7 Koncentrace ^{129}I v závislosti na hloubce a velikosti infiltrace

Nejkritičtější izotop je ^{129}I , který má nejvyšší koncentraci na vybraném povrchovém elementu a zároveň nesorbuje ani v nesaturované zóně. Na obrázku 8 je průběh jeho koncentrace v závislosti na čase v různých hloubkách pod povrchem. Byl použit případ, kdy infiltrace do hlubokého oběhu činí 50 mm/rok.



Obr. 8 Průběh koncentrace I129 v různých hloubkách v závislosti na čase

Závěr:

Příklad popisuje průběh koncentrace v nenasycené oblasti pro různé velikosti infiltrace vody. Okrajové podmínky byly získány řešením úlohy transportu látek v geosféře, přičemž vybraný element do modelu nenasycené zóny byl vybrán jako element s nejvyšší koncentrací z povrchových elementů. Výslednou koncentraci nejvíce ovlivňuje velikost infiltrace vody, která zajišťuje snižování koncentrace v nenasycené zóně o několik řádů. Výsledky transportu izotopů v nenasycené zóně vstupují do modelu biosféry.

2 Model distribuce radionuklidů v biosféře a dopadu na člověka (BioRad 2)

Tato kapitola zpráva popisuje možnosti výpočtu příkonu efektivní dávky, kterou obdrží jedinec při jeho definovaném chování a stravování na kontaminovaném území. Tato metodika vychází z obecně uznávaného přístupu podporovaného Mezinárodní agenturou pro jadernou energii (IAEA). [1], [2], [3]

Na základě předchozích zkušeností autora (např. [4], [5], [6]) byl nově sestaven model příkonu efektivní dávky, který je oproti předchozím pracím pojat univerzálně. Jednotlivé položky (rovnice) modelu jsou popsány každá zvlášť. Takto pojatý model umožní modulární použití s volbou různých cest kontaminace, tak, jak bude vyžadovat jeho aplikace na konkrétní úlohu (lokalitu).

Dále jsou ve zprávě popsány možnosti získání potřebných údajů pro výpočty a v poslední kapitole jsou uvedeny údaje potřebné pro výpočet dávky pro radionuklidy významné z hlediska posuzování bezpečnosti úložišť radioaktivních odpadů.

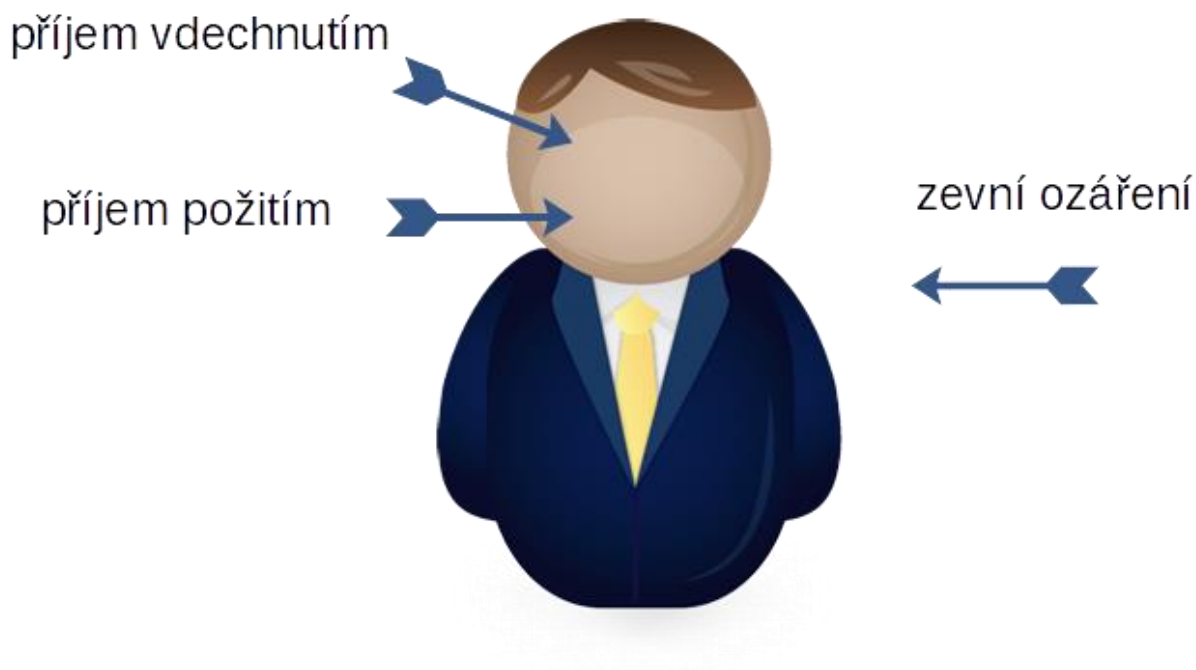
2.1 Konceptní a matematický model pro výpočet příkonu efektivní dávky

Aktivita v různých složkách životního prostředí se používá pro výpočet potenciální dávky, kterou obdrží člověk. Pro tyto výpočty se předpokládá, že zástupce z nejvíce exponované skupiny tráví celou dobu (po celý život) v kontaminované oblasti a obdrží plnou dodávku potravin a vody z této kontaminované oblasti. Hlavní dlouhodobá rizika pro člověka, způsobená vlivem uloženého radioaktivního odpadu (RAO), jsou z vnitřního ozáření. Tato situace může nastat především požitím kontaminované vody a potravin, nebo vdechováním znečištěného vzduchu. Vnitřní expozice závisí na druhu kontaminovaných potravin a vody, příslušné aktivity izotopů a případně jejich chemické formy.

Hlavní cesty kontaminace se předpokládají požitím, vdechnutím a zevním ozářením (viz obr. 9). Přičemž požití je dále rozděleno na rostlinné produkty, živočišné produkty, produkty vodní hospodářství, vodu a ostatní (například půdu). V jednotlivých kapitolách zprávy jsou uvedeny vzorce, pomocí kterých je možno vypočítat jednotlivé příspěvky $\dot{E}_{j,p}$. Výpočet pro každou z výše zmíněných cest je popsán v následujících podkapitolách.

Příjem efektivní dávky vdechnutím a zevním ozářením závisí na zejména kontaminaci vzduchu a době pobytu v daném prostředí. Pro zevní ozáření jsou důležité i kontaminace dalších prostředí, tzn. půdy, vody apod.

Z důvodu kontroly správnosti výpočetních vztahů a s ohledem na to, že ne vždy jsou hodnoty různých veličin a parametrů uváděny v základních jednotkách SI, je v jejich popisu vždy uváděn fyzikální rozměr a běžně užívané jednotky.

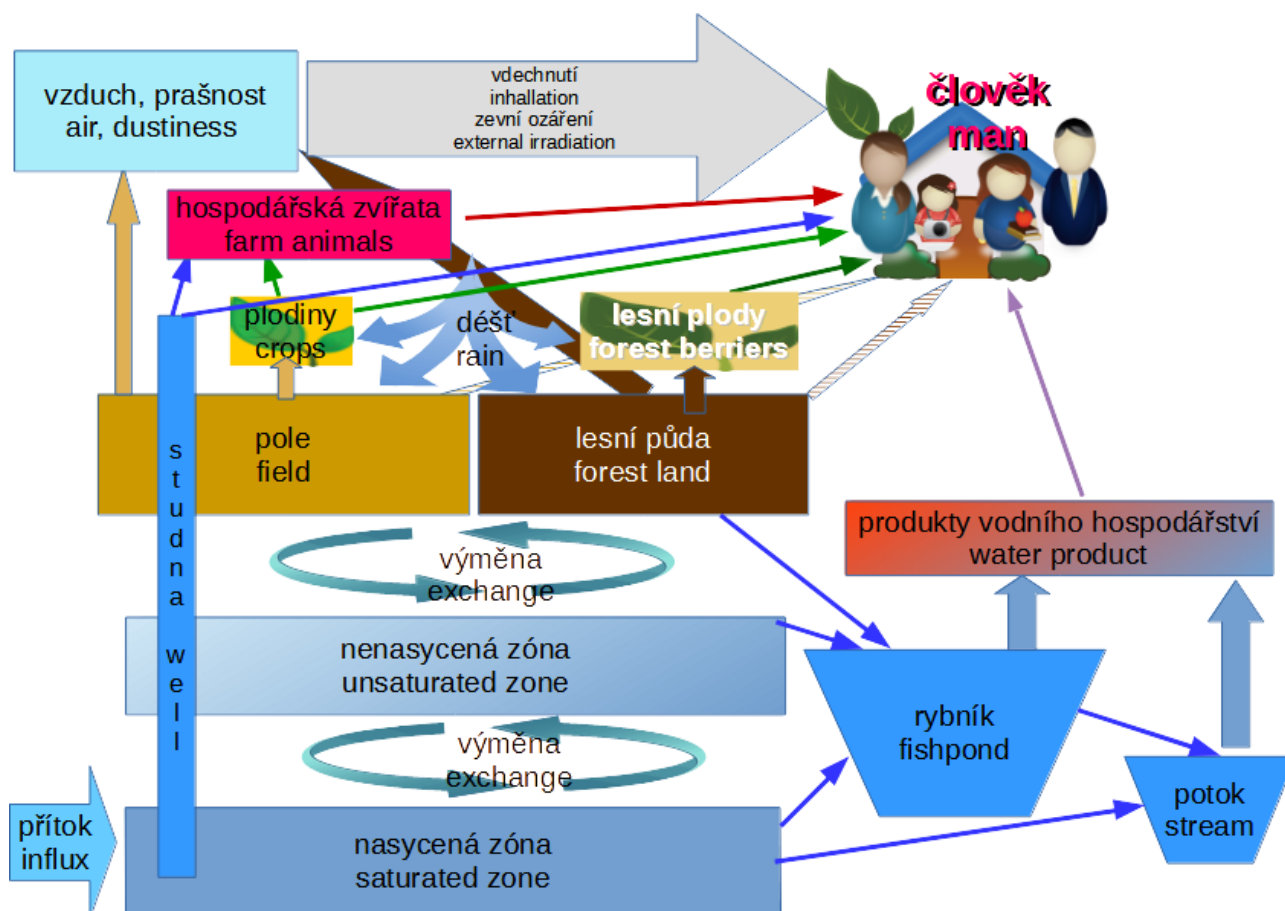


Obr. 9 hlavní cesty kontaminace

2.1.1 Koncepční model

Na Obr. 10 je celkové koncepční schema biosféry. Přítok radionuklidů z úložiště je do nasycené zóny, na rozdíl od předchozích verzí, kdy byl tento přítok nastaven konzervativně přímo do povrchových kompartmentů (tzn. půdy). Další šíření radionuklidů je zde uvažováno přes nenasycenou zónu do půdy.

Celkový příkon efektivní dávky je počítán z ingesce vody a půdy, rostlinných produktů, živočišných produktů a produktů vodního hospodářství. Inhalace je počítána z prašnosti, tzn. prachu půdy v daném prostředí (pole, les). Zevní ozáření je počítáno jednak z aktivity podloží, případně vody při koupání a také z prašnosti v daném prostředí.



Obr. 10: koncepční schéma biosféry

Celková dávka bude stanovena sumací příspěvků přes všechny cesty kontaminace a všechny radionuklidy pomocí vzorce:

$$\dot{E} = \sum_j \sum_p \dot{E}_{j,p} \quad (1)$$

kde:

- \dot{E} celkový příkon efektivní dávky [$L^2 \cdot T^{-3}$], [$Sv \cdot a^{-1}$]
- $\dot{E}_{j,p}$ příkon efektivní dávky pro radionuklid j , cestou p [$L^2 \cdot T^{-3}$], [$Sv \cdot a^{-1}$]
- j index radionuklidu
- p index cesty (požití, vdechnutí, zevní ozáření)

2.1.2 Příkon efektivní dávky požitím

Příkon efektivní dávky požitím, pro konkrétní radionuklid, je počítán násobením konverzního faktoru pro příjem požitím, množstvím přijaté potravy a kontaminací dané potravy uvažovaným radionuklidem, viz rovnice (2). Zvykem bývá, že aktivita i spotřeba pevných potravin bývá udána v měrných jednotkách a u kapalných potravin pak v objemových jednotkách. Při výpočtu je nutné kontrolovat, zda si jednotky aktivity a spotřeby potravin odpovídají.

$$\dot{E}_{ing_j} = h_{ing_j} \cdot \sum_{ip} (a_{ip_j} \cdot I_{ip}) \quad (2)$$

kde:

$h_{ing j}$	konverzní faktor radionuklidu j pro příjem požitím, $[L^2 T^{-1}]$, $[Sv \cdot Bq^{-1}]$
$\dot{E}_{ing j}$	příkon efektivní dávky požitím (ingescí) radionuklidu j , $[L^2 T^{-3}]$, $[Sv \cdot a^{-1}]$
$a_{ip j}$	měrná/objemová aktivita potravin ip radionuklidu j , $[T^{-1} M^{-1}]$, $[Bq \cdot kg^{-1}]$ nebo $[T^{-1} L^{-3}]$, $[Bq \cdot m^{-3}]$, $[Bq \cdot l^{-1}]$
I_{ip}	příjem potravin ip reprezentativní osobou, $[M T^{-1}]$, $[kg \cdot a^{-1}]$ nebo $[L^3 T^{-1}]$, $[m^3 \cdot a^{-1}]$, $[l \cdot a^{-1}]$
ip	index potravin
j	index radionuklidu

Pro výpočet kontaminace (aktivity) potravin rozdělíme tyto do několika skupin:

- **nebiologické (anorganické) části biosféry**, tzn. zejména voda a půda
- **rostlinné produkty**
- **živočišné produkty**
- **produkty vodního hospodářství**

2.1.2.1 Výpočet kontaminace (aktivity) nebiologických částí biosféry

Nebiologickými částmi biosféry pro příjem aktivity požitím myslíme zejména vodu a půdu. Aktivita vody bývá přímým výstupem transportních modelů. Pro výpočet uvažujeme aktivitu vody ze studny, která je umístěna tam, kde je aktivita podzemní vody nejvyšší.

Přepočet hmotnosti na aktivitu, koncentrace na objemovou aktivitu - Výpočet aktivity povrchové vody

Koncentrace ve vodní fázi (roztoku) bývá většinou udávána v jednotkách odpovídajících fyzikálnímu rozměru $M L^{-3}$, např. $kg m^{-3}$. Pro výpočet dávky je ale nutné znát místo koncentrace objemovou aktivitu, fyzikální rozměr $T^{-1} L^{-3}$, jednotky $Bq m^{-3}$. Pro přepočet hmotnosti na aktivitu nebo koncentrace na objemovou aktivitu slouží vztah (3).

$$a_j = \frac{m_j}{M_j} \cdot N_a \cdot \lambda_j \Leftrightarrow avg_j = \frac{cg_j}{M_j} \cdot N_a \cdot \lambda_j \quad (3)$$

kde:

a_j	aktivita radionuklidu j $[T^{-1}]$, $[Bq]$
avg_j	objemová aktivita vodní fáze (podzemní vody) radionuklidu j $[T^{-1} \cdot L^{-3}]$, $[Bq \cdot m^{-3}]$
cg_j	koncentrace radionuklidu j v pozemní vodě, $[T^{-1} \cdot L^{-3}]$, $[Bq \cdot m^{-3}]$
j	index radionuklidu, odpovídá chemickému prvku i
m_j	hmotnost radionuklidu j $[M]$, $[kg]$
M_j	molární hmotnost radionuklidu j , $[M N^{-1}]$, $[g mol^{-1}]$
N_a	Avogadrova konstanta, $[N^{-1}]$, $[mol^{-1}]$
λ_j	přeměnová konstanta radionuklidu j , $[T^{-1}]$, $[s^{-1}]$
r_{gs}	ředění podzemní vody na povrchovou, $[-]$, $[-]$

Výpočet aktivity půd

K požití půdy dochází náhodně, například požitím špatně umyté zeleniny, případně z nečistých rukou apod. Výpočet aktivity půdy je možný pomocí distribučních faktorů z aktivity podzemní vody, viz

rovnice (4). Vhodnější je však výstup z modelu povrchových vrstev, který vypočte aktivitu půdy se započtením migračních procesů, které v těchto vrstvách působí.

$$am_j = \frac{avg_j}{r_{gs}} \cdot \frac{(\rho_b \cdot Kd_i + \theta \cdot \eta)}{\rho_b} \quad (4)$$

kde:

am_j	měrná aktivita půdy radionuklidu j [$T^{-1} \cdot M^{-1}$], [$Bq \cdot kg^{-1}$]
avg_j	objemová aktivita vodní fáze (podzemní vody) radionuklidu j [$T^{-1} \cdot L^{-3}$], [$Bq \cdot m^{-3}$]
i	index chemického prvku
r_{gs}	ředění podzemní vody na povrchovou, [-], [-]
j	index radionuklidu, odpovídá chemickému prvku i
Kd_i	distribuční koeficient prvku i v dané půdě, [$L^3 \cdot M^{-1}$], [$m^3 \cdot kg^{-1}$]
η	porozita půdy [-], [%]
ρ_b	celková hustota půdy (bez vlhkosti – „bulk“) [$M \cdot L^{-3}$], [$kg \cdot m^{-3}$]
θ	vlhkost půdy [-], [%]

2.1.2.2 Výpočet kontaminace (aktivity) rostlinného produktu

Spotřeba rostlinných produktů bývá uváděna v hodnotě čerstvé, kdežto transferové faktory pro přenos rostlina půda bývají stanoveny pro sušinu. Kontaminaci rostlinného produktu lze tedy spočítat jako součin měrné aktivity půdy, transferového faktoru pro přenos půda->rostlina a obsahu sušiny, viz rovnice (5). V případě, že by transferový faktor půda -> rostlina byl pro hodnotu čerstvou, za obsah sušiny dosadíme hodnotu 1.

$$a_{ipj} = PTF_{ip_i} \cdot am_j \cdot s_{ip} + aS_{ipj} \quad (5)$$

kde:

PTF_{ip_i}	přenosový faktor půda – rostlina prvku i , rostlinného produktu ip (pro sušinu) [1], [1]
aS_{ipj}	kontaminace (aktivita) ip radionuklidem j způsobená usazování prachu na povrchu, platí pouze pro listovou zeleninu, pro statní rostlinné produkty je rovna 0, [$T^{-1} M^{-1}$], [$Bq \cdot kg^{-1}$], viz rovnice (6)
a_{ipj}	kontaminace (aktivita) potravin (rostlinného produktu) ip radionuklidem j , [$T^{-1} M^{-1}$], [$Bq \cdot kg^{-1}$]
am_j	měrná aktivita půdy radionuklidu j [$T^{-1} \cdot M^{-1}$], [$Bq \cdot kg^{-1}$]
i	index chemického prvku
ip	index potravin (rostlinného produktu)
j	index radionuklidu, odpovídá chemickému prvku i
s_{ip}	obsah sušiny v rostlinném produktu v ip [1], [%]

2.1.2.3 Výpočet kontaminace (aktivity) rostlinného produktu vlivem resuspenze prachu

Zejména u listové zeleniny můžeme ještě počítat s usazováním kontaminovaného prachu na jejím povrchu. Výpočet aktivity listové zeleniny lze provést podle rovnice (6).

$$aS_{ipj} = am_j \cdot \frac{rf \cdot gs_{ip}}{cy_{ip}} \quad (6)$$

kde:

aS_{ipj}	kontaminace (aktivita) ip radionuklidem j způsobená usazování prachu na povrchu listové zeleniny, $[T^{-1} M^{-1}]$, $[Bq \cdot kg^{-1}]$
am_j	měrná aktivita půdy radionuklidu j $[T^{-1} \cdot M^{-1}]$, $[Bq \cdot kg^{-1}]$
cy_{ip}	výnos listové zeleniny ip , $[M \cdot L^{-2}]$, $[kg \cdot m^{-2}]$
gs_{ip}	doba vegetace zeleniny ip , $[T]$, $[d]$
ip	index zeleniny, s předpokladem konzumace listů či jiných částí s možnou povrchovou kontaminací
j	index radionuklidu, odpovídá chemickému prvku i
rf	rychlost usazování prachu $[M \cdot L^{-2} \cdot T^{-1}]$, $[g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}]$

2.1.2.4 Výpočet kontaminace (aktivity) živočišného produktu

Spotřeba živočišných produktů bývá uváděna v jednotkách $kg \cdot a^{-1}$, případně $l \cdot a^{-1}$, podle toho, zdali jde o pevný nebo kapalný produkt.

Kontaminace živočišných produktů je počítána pomocí růstových transferových faktorů pro hospodářská, případně divoká, zvířata a jejich příjmu kontaminovaného krmiva, půdy, vody a dýchání kontaminovaného vzduchu.

$$a_{ipj} = TF_{a,ip_i} \cdot \dot{A}_{aj} \quad (7)$$

kde:

\dot{A}_{aj}	příjem aktivity radionuklidu j hospodářským či divokým zvířetem a , $[T^{-2}]$, $[Bq \cdot d^{-1}]$
TF_{a,ip_i}	koeficient přenosu prvku i , do živočišného produktu ip zvířete a $[T \cdot M^{-1}]$, $[d \cdot kg^{-1}]$ nebo $[T \cdot L^{-3}]$, $[d \cdot l^{-1}]$
a_{ipj}	kontaminace (aktivita) potraviny (živočišného produktu) ip radionuklidem j , $[T^{-1} M^{-1}]$, $[Bq \cdot kg^{-1}]$ nebo $[T^{-1} \cdot L^{-3}]$, $[Bq \cdot l^{-1}]$ (případně $[Bq \cdot m^{-3}]$)
a	index druhu hospodářského či divokého zvířete
i	index chemického prvku
ip	index potraviny (živočišného produktu), odpovídá indexu a (hospodářského či divokého zvířete)
j	index radionuklidu, odpovídá chemickému prvku i

Příjem aktivity hospodářským/divokým zvířetem lze vypočítat součtem tří položek:

- příjem vodou (napájení)
- příjem krmivem (a půdou)
- příjem dýcháním (vdechování prachu))

Krmení může mít obecně více složek, ale lze uvažovat pouze jedna. Celkový vztah tedy má tři členy, viz rovnice (8). Aktivita krmiv lze spočítat podle vztahu (5).

$$\begin{aligned} \dot{A}_{aj} &= \dot{A}_{aj}(w) + \sum_p \dot{A}_{aj}(p) + \dot{A}_{aj}(br) = \\ &= av_j \cdot FCR_a(w) + \sum_p am_j(p) \cdot FCR_a(p) + br_a \cdot dl \cdot am_j \end{aligned} \quad (8)$$

kde:

\dot{A}_{aj}	příjem aktivity radionuklidu j hospodářským či divokým zvířetem a , [T ⁻²], [Bq·d ⁻¹]
$\dot{A}_{aj}(br)$	příjem aktivity radionuklidu j dýcháním hospodářského či divokého zvířete a , [T ⁻²], [Bq·d ⁻¹]
$\dot{A}_{aj}(p)$	příjem aktivity radionuklidu j z krmiva p hospodářským/divokým zvířetem a , [T ⁻²], [Bq·d ⁻¹]
$\dot{A}_{aj}(w)$	příjem aktivity radionuklidu j z napájení vodou hospodářským/divokým zvířetem a , [T ⁻²], [Bq·d ⁻¹]
a_{ipj}	kontaminace (aktivita) potravin (rostlinného produktu) ip radionuklidem j , [T ⁻¹ M ⁻¹], [Bq·kg ⁻¹]
a	index druhu hospodářského či divokého zvířete
am_j	měrná aktivita půdy radionuklidu j [T ⁻¹ ·M ⁻¹], [Bq·kg ⁻¹]
$am_j(p)$	měrná aktivita krmiva p radionuklidu j [T ⁻¹ ·M ⁻¹], [Bq·kg ⁻¹], pokud je krmivo rostlinného původu, lze jeho aktivitu vypočítat podle (5), případně jde přímo o aktivitu půdy
av_j	objemová aktivita napájecí vody radionuklidu j [T ⁻¹ ·L ⁻³], [Bq·m ⁻³], lze konzervativně uvažovat aktivitu vody ve studni, kde jsou předpokládány vyšší hodnoty
br_a	rychlost dýchání zvířete a [L ⁻³ ·T ⁻¹], [m ³ ·a ⁻¹] nebo [m ³ ·d ⁻¹]
dl	prašnost [M·L ⁻³], [kg·m ⁻³]
$FCR_a(p)$	spotřeba krmiva p hospodářským zvířetem [L ⁻³ ·T ⁻¹], [m ³ ·a ⁻¹]
$FCR_a(w)$	spotřeba vody hospodářským zvířetem [L ⁻³ ·T ⁻¹], [m ³ ·a ⁻¹]
j	index radionuklidu, odpovídá chemickému prvku i
p	index krmiva, včetně půdy

2.1.2.5 Výpočet kontaminace (aktivity) produktu vodního hospodářství

Kontaminace produktů vodního hospodářství, tedy zejména ryb lze spočítat vynásobením aktivity vody a koncentračního faktoru pro daný produkt a chemický prvek, viz rovnice (9).

$$a_{ipj} = CF_{ip_i} \cdot av_j \quad (9)$$

kde:

av_j	objemová aktivita povrchové (rybníční, potoční) vody radionuklidu j [T ⁻¹ ·L ⁻³], [Bq·m ⁻³]
CF_{ip_i}	koncentrační faktor - koeficient přenosu prvku i z vody do produktu vodního hospodářství ip [L ³ ·M ⁻¹], [m ³ ·kg ⁻¹]
a_{ipj}	kontaminace (aktivita) potravin (produktu vodního hospodářství) ip radionuklidem j , [T ⁻¹ M ⁻¹], [Bq·kg ⁻¹]
i	index chemického prvku
ip	index potravin (produktu vodního hospodářství)
j	index radionuklidu, odpovídá chemickému prvku i

2.1.3 Příkon efektivní dávky vdechnutím

Příkon efektivní dávky inhalací je vypočítán z rychlosti dýchání a aktivity vzduchu. Obecně se může člověk pohybovat v různých prostředích (např. les, pole, louka), kde je ve vzduchu různá aktivita, proto celkový příkon efektivní dávky počítáme jako součet částečných příkonů přes různá prostředí, viz rovnice (10). Pro každé prostředí je stanovena relativní doba pobytu, součet relativních dob pobytu je roven jedné, viz rovnice (11). Aktivitu vzduchu můžeme vypočítat z aktivity prachu rozptýleného v půdě. Aktivita půdy by měla být výstupem z modelu kontaminace povrchových vrstev.

$$\dot{E}_{inhj} = h_{inhj} \cdot br \cdot \sum_e r_e \cdot a_{ej} \quad (10)$$

kde:

- \dot{E}_{inhj} příkon efektivní dávky vdechnutím (inhalací), [L² T⁻³], [Sv·a⁻¹]
- h_{inhj} konverzní faktor radionuklidu j pro příjem vdechnutím, [L² T⁻¹], [Sv·Bq⁻¹]
- a_{ej} objemová aktivita vzduchu radionuklidu j v prostředí e [T⁻¹·L⁻³], [Bq·m⁻³], viz též rovnice (12)
- br rychlost dýchání člověka [L³·T⁻¹], [m³·a⁻¹] nebo [m³·d⁻¹]
- e index prostředí, např. pole, les, louka, atd.
- r_e relativní doba pobytu v prostředí e viz též rovnici (11)

$$\sum_e r_e = 1 \quad (11)$$

kde:

- e index prostředí, např. pole, les, louka, atd.
- r_e relativní doba pobytu v prostředí e viz též rovnici (11)

$$a_{ej} = dl_e \cdot am_{ej} \quad (12)$$

kde:

- a_{ej} objemová aktivita vzduchu radionuklidu j v prostředí e [T⁻¹·L⁻³], [Bq·m⁻³]
- e index prostředí, např. pole, les, louka, atd.
- dl_e prašnost prostředí e [M⁻¹·L³], [kg·m⁻³]
- am_{ej} měrná aktivita prachu (půdy) radionuklidu j v prostředí e [T⁻¹·M⁻¹], [Bq·kg⁻¹]

2.1.4 Příkon efektivní dávky zevním ozáření

Příkon efektivní dávky zevním ozáření lze spočítat jakou součet zevních ozáření ze všech prostředí, kde člověk pobývá, tedy zejména pole, les, voda (tím je myšleno například koupání v rybníce.) V každém z těchto prostředí se zevní ozáření skládá z více složek, např. na poli to je zejména půda a vzduch, v lese to je též půda a vzduch, ale může to být například i ze stromů, pokud tyto budou významně kontaminovány radioaktivitou. Při koupání se provede výpočet zevního ozáření zejména z vody a ze vzduchu. Vztah pro výpočet viz rovnice (13). Dávkové konverzní faktory pro zevní ozáření bývají uvedeny pro objemovou kontaminaci (tedy takovou, která je rozptýlena v prostředí a je vztažena k objemu) nebo povrchovou (aktivita je na povrchu, tedy ve spadu radioaktivního prachu a je vztažena na plochu).

$$\dot{E}_{extj} = \sum_e \left(r_e \cdot \sum_{ep} \left(h_{epj} \cdot a_{epj} \right) \right) \quad (13)$$

kde:

$\dot{E}_{ext j}$	příkon efektivní dávky zevním ozářením radionuklidem j [$L^2 \cdot T^{-3}$], [$Sv \cdot a^{-1}$]
$h_{ep j}$	dávkový konverzní faktor pro zevní ozáření z části prostředí ep radionuklidu j [$L^5 \cdot T^{-2}$], [($Sv \cdot s^{-1}$)/($Bq \cdot m^{-3}$)] nebo [$L^4 \cdot T^{-2}$], [($Sv \cdot s^{-1}$)/($Bq \cdot m^{-2}$)] (někdy bývá značeno jako h_{ext} ale z důvodu nutnosti použít více indexů používáme pouze h)
$a_{ep j}$	aktivita části prostředí ep radionuklidu j v jednotkách odpovídajících koeficientu pro zevní ozáření h , [$T^{-1} \cdot L^{-3}$], [$Bq \cdot m^{-3}$] nebo [$T^{-1} \cdot L^{-2}$], [$Bq \cdot m^{-2}$]
e	index prostředí, např. pole, les, louka, atd.
ep	index části prostředí, např. půda, vzduch, voda, apod.
r_e	relativní doba pobytu v prostředí e viz též rovnici (11)

2.2 Potřebné údaje – přehled

V této kapitole jsou popsány předpokládané výstupy z transportních modelů, tzn. různé aktivity životního prostředí. Dále pak souhrn dalších potřebných údajů jako jsou konverzní faktory a spotřební koše potravin, s uvedením některých literárních zdrojů.

2.2.1 Potřebné aktivity prostředí – předpokládané výstupy z modelů

V kapitole 2.1 je popsán matematický model pro výpočet příkonu efektivní dávky z různé kontaminace prostředí. V této podkapitole je přehledně do tabulek uspořádán seznam aktivit potřebných pro výpočet a způsobu jejich získání, viz Tab. 4. V další tabulce (Tab. 5), je přehled použití těchto aktivit pro výpočet jednotlivých příspěvků příkonu efektivní dávky.

Tab. 4: přehled aktivit prostředí potřebných pro výpočet příkonu efektivní dávky, a možnosti jejich získání

aktivita	vztahená k	získána z
podzemní vody (studna)	objemu	přímý výstup z modelu
povrchové vody (potok, rybník)	objemu	přímý výstup z modelu
půdy (pole, les, prach)	hmotnosti	přímý výstup z modelu
půdy (pole, les)	objemu	vypočtená z měrné aktivity půdy
vzduchu	objemu	vypočtená z měrné aktivity půdy a prašnosti prostředí
depozit prachu	ploše	vypočtený z měrné aktivity půdy a usazování prachu (půdy), výstup z modelu?

Tab. 5: přehled použití aktivit prostředí pro výpočet příspěvků příkonu efektivní dávky přehled použití aktivit prostředí pro výpočet příspěvků příkonu efektivní dávky

příspěvek příkonu efektivní dávky		aktivita			
		podzemní vody	povrchové vody	půdy (měrná)	vzduchu (z prašnosti)
ingesce	vody	ano			
	půdy			ano	
	rostlinných produktů			ano	
	listové zeleniny			ano	(depozit prachu)
	živočišných produktů	ano		ano	ano
	produktů vodního hospodářství		ano		
inhalace					ano
zevní ozáření			ano	(objemová)	ano

2.2.2 Ostatní údaje a možnosti jejich získání

Data potřebná pro výpočet příkonu efektivní dávky, podle modelu popsaného v kapitole 2.1, je nutné získat z různých zdrojů. Aktivity prostředí budou získána jako výstup z transportního modelu povrchových vrstev biosféry. Ostatní údaje je nutné získat z legislativy, literatury, statistik atd. V Tab. 6 jsou parametry pro výpočet příkonu efektivní dávky rozděleny podle kategorií a je zde uvedena možnost jejich získání i s odkazem na příslušné zdroje.

Tab. 6: přehled kategorií vstupních parametrů pro výpočet příkonu efektivní dávky, možnosti jejich získání a odkazy na příslušné zdroje

parametr	způsob získání údajů	odkaz
dávkové konverzní faktory pro příjem požitím a vdechnutím	vyhláška	[7]
dávkové konverzní faktory pro zevní ozáření	literatura	[8]
aktivity prostředí	výstupy z modelu, příp. jejich přepočet	viz kapitola 2.1
údaje o spotřebě potravin	statistiky	[9], [2]
další biometrické údaje (rychlost dýchání)	literatura	[2]
údaje o spotřebě hospodářských zvířat	literatura	např. [10]
transferové faktory rostlin, zvířat a ryb	literatura	zejména [1]

2.3 Údaje získané z literatury, významné pro výpočet efektivní dávky, potřebné pro posuzování bezpečnosti úložišť radioaktivních odpadů

V této kapitole jsou shromážděna potřebná data pro biosférické výpočty, s ohledem na výběr radionuklidů významných při bezpečnostních rozborech úložišť radioaktivních odpadů. Celkem jde o 46 radionuklidů od 31 chemických prvků.

2.3.1 Údaje závislé na chemických vlastnostech – transferové faktory

2.3.1.1 distribuční koeficienty půd

Distribuční koeficienty půd budou potřebné pro model nenasycené vrstvy. Zde jsou uvedeny pouze kvůli možnosti konzervativního přepočtu aktivity podzemní vody na aktivitu půdy, podle rovnice (4), viz Tab. 7.

V této tabulce jsou uvedeny střední hodnoty distribučních koeficientů pro polní a lesní půdu podle různých zdrojů. Koeficienty pro lesní půdu jsou počítány pro podíl 70% půdy a 30% organiky, viz též Tab. 14.

Tab. 7: distribuční koeficienty K_d [$m^3 \cdot kg^{-1}$]

Z	prvek	Kd pole [$m^3 \cdot kg^{-1}$]			Kd les [$m^3 \cdot kg^{-1}$]		
		[5]	[3]	[1]	[5]	[3]	[1]
4	Be	0,99	0,81	0,99	0,99	1,467	1,593
6	C	0,02	0	0	0,02	0	0
17	Cl	0,0003	0,0001	0,0003	0,0003	1,2	0,0003
20	Ca	0,008	0,05	0,008	0,008	0,0386	0,0386
25	Mn	0,75	0,2	1,2	0,75	0,818	0,888
27	Co	1,3	1	0,48	1,3	0,5931	0,48
28	Ni	0,28	0,2	0,28	0,28	0,456	0,28
34	Se	0,2	0	0,2	0,2	0,41	0,44
38	Sr	0,052	0,03	0,052	0,052	0,0729	0,052
40	Zr	1,9	2,2	0,41	1,9	0,038	1,397
41	Nb	1,5	0	1,5	1,5	2,35	1,65
42	Mo	0,04	0,125	0,04	0,04	0,18	0,04
43	Tc	0,00023	0	0,00023	0,00023	0,000949	0,001091
46	Pd	0,18	0,18	0,18	0,18	0,327	0,327
47	Ag	0,38	0	0,38	0,38	0,005	3,176
50	Sn	1,6	0	1,6	1,6	0,795	1,6
53	I	0,0069	0,0001	0,0069	0,0069	0,0157	0,01443
55	Cs	1,2	4,6	1,2	1,2	2,531	0,921
62	Sm	0,93	0,825	0,93	0,93	1,467	1,551
63	Eu	0,5	0,825	0	0,5	0	0
67	Ho	0,93	0,8	0,93	0,93	1,467	1,551
82	Pb	0,54	0,1	2	0,54	7,75	2,15
84	Po	0,15	0,01	0,21	0,15	1,9	2,127
88	Ra	2,5	0,07	2,5	2,5	1,9	2,14
90	Th	0,2	60	1,9	0,2	12,819	1,549
91	Pa	2	0,05	2	2	3,24	3,38
92	U	0,2	0,05	0,2	0,2	0,577	0,5
93	Np	0,035	0,257	0,035	0,035	0,2591	0,2675
94	Pu	0,74	2	0,74	0,74	0,893	0,746
95	Am	2,6	0,02	2,6	2,6	3,69	2,57
96	Cm	9,3	1,38	9,3	9,3	15,52	9,3

2.3.1.2 Přenosové faktory půda – rostlina

Přenosové faktory půda – rostlina (sušina) jsou zkompileovány zejména z [1] a [11], přičemž přednost mají údaje podle IAEA [1] (pokud jsou k dispozici).

Tab. 8: přenosové faktory půda – rostlina (sušina), hodnoty jsou bezrozměrné, podle [1] (zeleně podbarvené), a [11] (oranžově podbarvené), [12] (modře podbarvené) a [13] (fialově podbarvené), u brambor a hub, pokud není jiná hodnota je vzat maximální faktor pro zeleninu

Z	prvek	kořenová zelenina	listová zelenina	brambory	houby	krmivo	obilí
4	Be	0,0015	0,01	0,01	0,01	0,42	0,42
6	C	0,7	0,7	0,7	5,5	0,7	0,7
17	Cl	36	48	48	300	86	86
20	Ca	0,35	3,5	3,5	38	3,5	38
25	Mn	3,9	3	0,3	3,9	2,7	2,7
27	Co	0,72	1	0,67	1	0,84	0,72
28	Ni	0,06	0,28	0,28	0,52	0,58	0,17
34	Se	0,05	0,25	0,25	0,6	20	0,25
38	Sr	4,8	7,8	1,6	7,8	7,3	1
40	Zr	0,004	0,004	0,002	0,01	0,01	0,001
41	Nb	0,017	0,017	0,004	0,02	0,02	0,025
42	Mo	0,42	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
43	Tc	79	340	0,65	470	470	2,4
46	Pd	0,04	0,15	0,15	0,15	0,15	0,04
47	Ag	0,0039	0,0013	0,0039	0,0039	0,0039	0,25
50	Sn	0,006	0,03	0,03	0,03	0,03	0,006
53	I	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
55	Cs	0,88	0,98	0,6	10,2	5	0,9
62	Sm	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
63	Eu	0,02	0,02	0,02	3,5	0,02	0,02
67	Ho	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
82	Pb	3,3	0,25	2,6	3,3	1	0,048
84	Po	0,049	0,05	0,034	1	1	0,00026
88	Ra	0,02	0,013	0,049	0,67	0,67	0,67
90	Th	0,095	0,21	0,018	2,7	2,7	0,022
91	Pa	0,00035	0,00047	0,00047	0,00047	0,00047	0,000022
92	U	0,26	8,8	0,08	8,8	0,14	0,82
93	Np	0,036	0,08	0,027	0,47	0,47	0,071
94	Pu	0,0058	0,00029	0,005	0,005	0,0039	0,0011
95	Am	0,0017	0,0015	0,034	0,048	0,048	0,034
96	Cm	0,0039	0,0081	0,0021	0,0081	0,0036	0,0002

2.3.1.3 Koeficienty přenosu do živočišných produktů a produktů vodního hospodářství

Koeficienty přenosu do živočišných produktů jsou též zkompileovány z [1] a [11], přičemž přednost mají údaje podle IAEA [1]. Koeficienty pro játra jsou nastaveny stejným způsobem jako v Aktualizaci referenčního projektu [5], pokud je to možné jsou převzaty z [14], pokud zde nejsou, jsou použity maximální koeficienty pro maso podle [1] případně [13].

Protože z produktů vodního hospodářství uvažujeme pouze ryby, bylo by zbytečné vytvářet samostatnou kapitulu a tabulku, jsou tyto koeficienty zahrnuty do této podkapitoly.

Tab. 9: koeficienty přenosu do živočišných produktů, podle [1] a [11], pro játra podle [5], [14], [1] a [13]

Z	prvek /	hovězí maso	vepřové maso	drůbeží maso	vnitřnosti (játra)	(hovězí) mléko	vejce	ryby
		d·kg ⁻¹	d·kg ⁻¹	d·kg ⁻¹	d·kg ⁻¹	d·l ⁻¹	d·kg ⁻¹	l·kg ⁻¹
4	Be	0,001	0,001	0,4	0,01	8,3E-07	0,02	100
6	C	0,031	0,031	0,031	0,1	0,012	0,031	320000
17	Cl	0,017	0,02	0,03	0,02	0,017	2,7	230
20	Ca	0,013	0,002	0,044	0,61	0,01	0,44	5600
25	Mn	0,00064	0,0053	0,0019	0,0006	4,1E-05	0,042	450
27	Co	0,00043	0,00043	0,97	0,00084	0,00011	0,033	400
28	Ni	0,005	0,2	0,001	0,05	0,00095	0,1	660
34	Se	0,015	0,32	9,7	10	0,004	16	12000
38	Sr	0,0013	0,0025	0,02	0,01	0,0013	0,35	710
40	Zr	1,2E-06	1E-06	6E-05	0,01	3,6E-06	0,0002	240
41	Nb	2,6E-07	3E-07	0,0003	0,01	4,1E-07	0,001	300
42	Mo	0,001	0,001	0,18	0,02	0,0011	0,64	190
43	Tc	0,0001	0,0001	0,03	0,00075	0,00014	3	20
46	Pd	0,004	0,004	0,0003	0,01	0,01	0,004	10
47	Ag	0,003	0,003	2	0,006	5E-05	0,5	210
50	Sn	0,08	0,08	0,8	0,03	0,001	1	3000
53	I	0,0067	0,041	0,0087	0,004	0,0054	2,4	45000
55	Cs	0,022	0,05	2,7	0,096	0,0046	0,4	24000
62	Sm	2E-05	2E-05	0,002	0,05	3E-05	4E-05	30
63	Eu	2E-05	2E-05	0,002	2E-05	2E-05	4E-05	12
67	Ho	2E-05	2E-05	0,002	0,05	3E-05	4E-05	30
82	Pb	0,0007	0,0004	0,8	0,0007	0,00019	3,1	5700
84	Po	0,005	0,005	2,4	0,005	0,00021	1	170
88	Ra	0,0017	0,0009	0,03	0,01	0,00038	0,31	250

Z	prvek / jednotky	hovězí maso $\text{d} \cdot \text{kg}^{-1}$	vepřové maso $\text{d} \cdot \text{kg}^{-1}$	drůbeží maso $\text{d} \cdot \text{kg}^{-1}$	vnitřnosti (játra) $\text{d} \cdot \text{kg}^{-1}$	(hovězí) mléko $\text{d} \cdot \text{l}^{-1}$	vejce $\text{d} \cdot \text{kg}^{-1}$	ryby $\text{l} \cdot \text{kg}^{-1}$
90	Th	0,00023	4E-05	0,006	6E-05	5E-06	0,004	3900
91	Pa	4E-05	4E-05	0,006	0,0001	5E-06	0,004	10
92	U	0,00039	0,044	0,75	0,00063	0,0018	1,1	20
93	Np	2,6E-07	0,001	0,006	0,01	5E-06	0,004	30
94	Pu	1,1E-06	1E-05	0,003	0,0003	1,1E-06	0,0012	50000
95	Am	0,0005	4E-05	0,006	0,0001	4,2E-07	0,003	400
96	Cm	4E-05	4E-05	0,006	0,0002	2E-05	0,004	30

2.3.2 Vlastnosti radionuklidů a dávkové konverzní faktory

Dávkové konverzní faktory pro příjem požitím a vdechnutím jsou převzaty z vyhlášky SÚJB 422 Sb. o radiační ochraně [7], pro zevní ozáření pak z [8].

Tab. 10: vlastnosti radionuklidů a dávkové konverzní faktory

Z	A	radio- nuklid	atom. hmot.	poločas přeměny	DCF				
					požití	Vdechnutí (maximum)	zevní ozáření z půdy	zevní ozáření ze vzduchu	zevní ozáření ve vodě
					h_{ing}	h_{inh}	$h_{\text{e,soil}}$	$h_{\text{e,air}}$	$h_{\text{e,water}}$
					h_{ing}	h_{inh}	$h_{\text{e,soil}}$	$h_{\text{e,air}}$	$h_{\text{e,water}}$
		značka	m_a (M)	$t_{1/2}$	h_{ing}	h_{inh}	$h_{\text{e,soil}}$	$h_{\text{e,air}}$	$h_{\text{e,water}}$
		odkaz	[15]	[16], [17]	[7]	[7]	[8]	[8]	[8]
		jednotky	u ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	a	$\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$	$\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$	$\frac{\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}}$	$\frac{\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}}$	$\frac{\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}}$
4	10	Be10	10,0135	1510000	1,1E-09	3,5E-08	5,76E-21	1,12E-17	2,17E-20
6	14	C14	14,0032	5700	5,8E-10	5,8E-09	7,2E-23	2,24E-19	4,39E-22
17	36	Cl36	35,9683	301000	9,3E-10	7,3E-09	1,28E-20	2,23E-17	4,48E-20
20	41	Ca41	40,9623	102000	1,9E-10	1,8E-10	0	0	0
25	54	Mn54	53,9404	0,8545829	7,1E-10	1,5E-09	2,76E-17	4,09E-14	8,88E-17
27	60	Co60	59,9338	5,2711	3,4E-09	3,1E-08	8,68E-17	1,26E-13	2,74E-16
28	59	Ni59	58,9343	76000	6,3E-11	4,4E-10	0	0	0
28	63	Ni63	62,9297	98,7	1,5E-10	1,3E-09	0	0	0
34	79	Se79	78,9185	356000	2,9E-09	6,8E-09	9,96E-23	3,03E-19	5,93E-22
38	90	Sr90	89,9077	28,8	2,8E-08	1,6E-07	3,77E-21	7,53E-18	1,46E-20
40	93	Zr93	92,9065	1530000	1,1E-09	2,5E-08	0	0	0
41	94	Nb94	93,9073	20300	1,7E-09	4,9E-08	5,18E-17	7,7E-14	1,67E-16
42	93	Mo93	92,9068	4000	3,1E-09	2,3E-09	3,16E-21	2,52E-17	5,92E-20
43	99	Tc99	98,9063	211100	6,4E-10	1,3E-08	6,72E-22	1,62E-18	3,14E-21
46	107	Pd107	106,905	6500000	3,7E-11	5,9E-10	0	0	0
47	108	Ag108m	107,906	438	2,3E-09	3,7E-08	5,16E-17	7,8E-14	1,69E-16
50	126	Sn126	125,908	230000	4,7E-09	2,8E-08	7,89E-19	2,11E-15	4,76E-18

Z	A	radio-nuklid	atom. hmot.	poločas přeměny	DCF				
		značka	m_a (M)	$t_{1/2}$	požití	Vdechnutí (maximum)	zevní ozáření z půdy	zevní ozáření ze vzduchu	zevní ozáření ve vodě
		odkaz	[15]	[16], [17]	[7]	[7]	[8]	[8]	[8]
		jednotky	u ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	a	$\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$	$\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$	$\frac{\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}}$	$\frac{\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}}$	$\frac{\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}}$
53	129	I129	128,905	16100000	1,1E-07	3,6E-08	6,93E-20	3,8E-16	8,91E-19
55	135	Cs135	134,906	2300000	2E-09	8,6E-09	2,05E-22	5,65E-19	1,1E-21
55	137	Cs137	136,907	30,05	1,3E-08	3,9E-08	4,02E-21	7,74E-18	1,49E-20
62	151	Sm151	150,92	90	9,8E-11	4E-09	5,27E-24	3,61E-20	8,5E-23
63	152	Eu152	151,922	3,522	1,4E-09	4,2E-08	3,75E-17	1,43E-14	1,23E-16
67	166	Ho166m	165,932	1200	2E-09	1,2E-07	5,51E-17	8,45E-14	1,84E-16
82	210	Pb210	209,984	22,23	6,9E-07	5,6E-06	1,31E-20	5,64E-17	1,31E-19
84	210	Po210	209,983	0,378862	1,2E-06	4,3E-06	2,8E-22	4,16E-19	9,03E-22
88	226	Ra226	226,025	1600	2,8E-07	9,5E-06	1,7E-19	3,15E-16	6,95E-19
90	229	Th229	229,032	7880	4,9E-07	0,00024	1,72E-18	3,83E-15	8,56E-18
90	230	Th230	230,033	75400	2,1E-07	0,0001	6,47E-21	1,74E-17	3,94E-20
90	232	Th232	232,038	14020000000	2,3E-07	0,00011	2,79E-21	8,72E-18	1,99E-20
91	231	Pa231	231,036	32760	7,1E-07	0,00014	1,02E-18	1,72E-15	3,78E-18
92	233	U233	233,04	159200	5,1E-08	9,6E-06	7,48E-21	1,63E-17	3,64E-20
92	234	U234	234,041	245500	4,9E-08	9,4E-06	2,15E-21	7,63E-18	1,75E-20
92	235	U235	235,044	704000000	4,7E-08	8,5E-06	3,86E-18	7,2E-15	1,59E-17
92	236	U236	236,046	23430000	4,7E-08	8,7E-06	1,15E-21	5,01E-18	1,16E-20
92	238	U238	238,051	4468000000	4,5E-08	8E-06	5,52E-22	3,41E-18	7,95E-21
93	237	Np237	237,048	2144000	1,1E-07	5E-05	4,17E-19	1,03E-15	2,32E-18
94	238	Pu238	238,05	87,74	2,3E-07	0,00011	8,1E-22	4,88E-18	1,14E-20
94	239	Pu239	239,052	24100	2,5E-07	0,00012	1,58E-21	4,24E-18	9,6E-21
94	240	Pu240	240,054	6561	2,5E-07	0,00012	7,85E-22	4,75E-18	1,11E-20
94	242	Pu242	242,059	373000	2,4E-07	0,00011	6,85E-22	4,01E-18	9,35E-21
95	241	Am241	241,057	432,6	2E-07	9,6E-05	2,34E-19	8,18E-16	1,88E-18
95	242	Am242m	242,06	141	1,9E-07	9,2E-05	9,04E-21	3,17E-17	7,28E-20
95	243	Am243	243,061	7367	2E-07	9,6E-05	7,6E-19	2,18E-15	4,94E-18
96	244	Cm244	244,063	18,11	1,2E-07	5,7E-05	6,74E-22	4,91E-18	1,15E-20
96	245	Cm245	245,065	8500	2,1E-07	9,9E-05	1,82E-18	3,96E-15	8,84E-18
96	246	Cm246	246,067	4723	2,1E-07	9,8E-05	6,22E-22	4,46E-18	1,05E-20

2.3.3 Spotřební koše – příjem potravy

Předpokládáme, že údaje o spotřebě potravin bude zadávat uživatel sw Biorad. Dříve však byly navrženy spotřební koše „zemědělská usedlost“, „vysočina“ a rybníkářská oblast. Tyto spotřební koše byly navrženy s ohledem na různé oblasti ČR. Později byl, po podrobném zpracování údajů z ČSÚ sestaven spotřební „univerzální“ koš, který zohledňuje stravovací zvyky v Česku v období 1920-2006. Tento koš je vhodné brát jako základní, pro srovnávací výpočty. Koš, který je označen jako „pesimistický“ obsahuje ve všech položkách maximální hodnotu z předchozích košů, tedy „zemědělské oblasti“, „vysočiny“ a „rybníkářské oblasti“. Při výpočtu podle tohoto koše vyjde tedy nejvyšší dávka, která by mohla být pro nadstandartního jedlíka. V této práci byly ještě přidány dva koše, jeden pro vegetariána a druhý pro masožravce, ve kterých je konzumace pouze rostlinné resp. živočišné stravy. Tyto koše mají být kontrolní, pro extrémní strávnický. Přehled údajů spotřebních košů je v Tab. 11.

Tab. 11: spotřební koše

položka	jednotky	zemědělská usedlost	vysočina	rybníkářská oblast	základní	pesimistický (jedlík)	vegetarián	masožravec	odkazy
voda	$\text{l} \cdot \text{a}^{-1}$	730	730	730	730	730	730	730	[7]
hlína	$\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$	0,0083	0,0083	0,0083	0,0365	0,0365	0,04		[12], [3], [18]
kořenová zelenina	$\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$	83			27,7	83	160		[9], [19], [20]
listová zelenina	$\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$				50,1	50,1	160		[9], [19], [20]
resuspenze		ne	ne	ne	ano	ano	ano	ne	
obilí	$\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$	100	70	70	100	130	130	0	[9]
brambory	$\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$		150	150	99,2	150	370		[9], [19], [20]
houby	$\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$		30		1,9	30	80		[9], [19], [20]
hovězí maso	$\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$	79			21	79		80	[9], [19], [20]
vepřové maso	$\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$		80		37,8	80		150	[9], [19], [20]
drůbeží maso	$\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$			40	13,5	40		40	[9], [19], [20]
vnitřnosti (játra)	$\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$	7,6	4,1		4,4	7,6		15	[9], [19], [20]
mléko	$\text{l} \cdot \text{a}^{-1}$	210			215,4	215,4			[9], [19], [20]
vejce	$\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$				15,4	15,4		7	[9], [19], [20]
ryby	$\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$			40	5,2	40		15	[9], [19], [20]
rychlost dýchání	$\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$	8500	8500	8500	8500	8500	8500	8500	[7]
relativní doba pobytu									
pole		1	2/3	0,98	1	0,647	0,5		[18]
les		0	1/3	0	0	1/3	0,5	0,95	[18]
voda (koupání)		0	0	0,02	0	0,02		0,05	[18]
potraviny celkem	$\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$	380	265	231	493	792	771	308	

2.3.4 Ostatní údaje

Transferové faktory pro rostliny bývají uváděny pro sušinu, zatím co spotřeba potravin (zeleniny) bývá uváděna v hodnotě čerstvé. Proto je nutné přepočítat aktivitu sušiny na aktivitu čerstvé zeleniny pomocí obsahu sušiny. Obsah sušiny pro uvažované druhy rostlin je uveden v Tab. 12.

Pro výpočet kontaminace listové zeleniny může být významný spád radionuklidů (prachu). Údaje pro výpočet depositu jsou v Tab. 15

Údaje o spotřebě krmiva, vody, vzduchu a půdy hospodářskými, které jsou potřebné pro výpočet aktivity živočišných produktů. Potřebné údaje pro uvažované druhy zvířat jsou v Tab. 13.

Přesto že jsou předpokládány výstupní údaje o aktivitě půdy z modelu nenasycené zóna, jsou v Tab. 14 údaje potřebné pro výpočet aktivity půdy z aktivity podzemní vody. Takovýto přepočet je velice konzervativní, lze ale použít pokud nejsou k dispozici jiné údaje o aktivitě půdy.

Tab. 12: obsah sušiny v rostlinných produktech, podle [1]

rostlina	sušina [%]
kořenová zelenina	14
listová zelenina	8
brambory	21
houby	10
krmivo	20

Tab. 13: spotřeby hospodářských zvířat, [21] a [14]

produkt	jednotky	skot	vepři	drůbež
voda	$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	0,14	0,01	0,0004
krmivo	$\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$	61,5	48,5	0,4
hlína	$\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$	0,95	0,5	0,02
vzduch	$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	129,6	30	2

Tab. 14: vlastnosti půd – hypotetická data [18]

vlastnost	jednotky	půda	
		zemědělská	lesní
hustota	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1360	1200
porozita	%	30	30
vlhkost	%	70	85
		hlína	organika
složení lesní půdy	%	70	30

Tab. 15: další údaje pro výpočet příkonu efektivní dávky z inhalace a depositu prachu na listové zelenině

parametr / veličina	značka	jednoty	hodnota	odkaz
Prašnost	<i>dl</i>	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	5E-06	[14]
rychlost usazování prachu	<i>rf</i>	$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$	648	[22]
vegetační doba	<i>gs</i>	d	91,3	[18]
výnos listové zeleniny	<i>cy</i>	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	2,7	[23], [24]
ředění podzemní vody na povrchovou (v nenasycené vrstvě)	<i>r_{gs}</i>	-	10000	[18]

3 Literatura:

- [1] IAEA, Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, sv. technical reports series no. 472, Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010.
- [2] SÚJB, „Postupy při výpočtu ozáření obyvatelstva přírodními radionuklidy uvolňovanými do životního prostředí a při posuzování zásahů v oblastech ovlivněných hornickou činností (rev. 1),“ 2008. [Online]. Available: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/18_PZIZ_ukon_horn_cinnost_revize.pdf. [Přístup získán 12 12 2018].
- [3] C. Yu, S. Kamboj, C. Wang a J.-J. Cheng, Data Collection Handbook to Support Modeling Impacts of Radioactive Material in Soil and Building Structures, Chicago, USA: Argonne National Laboratory, September 2015.
- [4] J. Landa, Modelování vlivu vybraných parametrů migrace radionuklidů z úložišť radioaktivních odpadů na jejich přenos do biosféry, Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Katedra jaderné chemie, disertační práce, 2012, revize 2013.
- [5] A. Vokál, V. Havlová, M. Hercík, J. Landa, D. Lukin a J. Vejsada, Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě; III. etapa STUDIE ZADÁVACÍ BEZPEČNOSTNÍ ZPRÁVY; C. DOKUMENTAČNÍ ČÁST; C.2 Hodnocení dlouhodobé bezpečnosti HÚ, Řež: ÚJV Řež, a. s., 09/2010.
- [6] J. Landa, D. Trpková a A. Vetešník, Tvorba celkového robustního modelu hodnocení bezpečnosti úložiště a aplikace modelu, sv. ÚJV 14276, Řež: ÚJV Řež, a. s., červenec 2013.
- [7] SÚJB, Vyhláška 422/2016 Sb. o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje, SÚJB, 23. prosince 2016.
- [8] K. F. Eckerman a J. C. Ryman, EXTERNAL EXPOSURE TO RADIONUCLIDES IN AIR, WATER, AND SOIL, sv. EPA-402-R-93-081, Oak Ridge, Tennessee / USA: Oak Ridge National Laboratory, September 1993.
- [9] Český statistický úřad, „Retrospektivní údaje o spotřebě potravin - 1920 - 2006,“ 31 07 2008. [Online]. Available: <https://www.czso.cz/csu/czso/retrospektivni-udaje-o-spotrebe-potravin-v-letech-1920-2006-n-7sg9bp0osn>. [Přístup získán 12 12 2018].
- [10] Normativy pro zemědělskou a potravinářskou výrobu, „Živočišná produkce,“ [Online]. Available: <http://www.agronormativy.cz/fslovasolv;jsessionid=0185F937564DDC189F419DB73AA65137?gfrme=1>. [Přístup získán 13 12 2018].
- [11] L. H. Staven, K. Rhoats, B. A. Napier a D. L. Streng, A Compendium of Transfer Factors for Agricultural and Animal Products, USA: Pacific Northwest National Laboratory, U. S. Department of Energy, June 2003.
- [12] J. Landa, Modely distribuce radionuklidů v biosféře pro účely hodnocení bezpečnosti ukládání radioaktivních odpadů, shromáždění dat a výpočty biosferických dávkových konverzních faktorů, Řež: Ústav jaderného výzkumu Řež a.s., prosinec 2008.
- [13] U. Bergström, S. Nordlinder a I. Aggerlyd, Models for dose assessments, Modules for various biosphere types, TR-99-14, SKB, December 1999.

- [14] A. Albrecht, D. Damois, E. Kerrigan, R. Klos, G. Smith, M. Thorne, M. Willians a H. Yoshida, Bioprota Theme 2: Task 4: Model Intercomparison with Focus on Accumulation in Soil, June 2005.
- [15] wikipedia.org, „Periodic table,“ wikipedia.org. [Online]. [Přístup získán 22 8 2019].
- [16] Laboratoire National Henri Becquerel, „Recommended data,“ [Online]. Available: http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm. [Přístup získán 22 8 2019].
- [17] National Nuclear Data Center, „NuDat 2.7,“ BROOKHAVEN National Laboratory, [Online]. Available: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>. [Přístup získán 22 8 2019].
- [18] J. Landa, hypotetická data - expertní odhad, 20xx.
- [19] J. Rupich, M. Dofková, V. Kopřiva, D. Resová a I. Řehůřková, Spotřební koš potravin pro Českou republiku, Expoziční faktory - ČR1997, ČR: Centrum hygieny potravinových řetězců v Brně, Státní zdravotní ústav v Praze, 2000.
- [20] Státní zdravotní ústav, „Manuál prevence v lékařské praxi,“ 5 5 2008. [Online]. Available: <http://www.szu.cz/manual-prevence-v-lekarske-praxi>. [Přístup získán 2019].
- [21] M. A. Wasiolek, „Environmental Transport Input Parameters for the Biosphere Model,“ September 2014. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/838327>. [Přístup získán 2019].
- [22] B. Moldan, Atmosferická depozice na území čkoslovenska v letech 1976-1987, Praha: Národní klimatický program ČSFR, 1992.
- [23] Z. Fialová, „Průměrné výnosy zeleniny,“ 8 10 2007. [Online]. Available: <https://www.zemedelec.cz/prumerne-vynosy-zeleniny/>. [Přístup získán 2019].
- [24] „Výnosy zeleniny podle knihy Encyklopedie pro zahrádkáře,“ Biozahrada - Fórum o biozahrádách, ekozahrádách, rostlinách a zahradních zvířatech, 30 1 2010. [Online]. Available: <http://diskuse.nachvojnici.cz/viewtopic.php?f=74&t=208#p867>. [Přístup získán 2019].
- [25] Wikipedia, „Continuous stirred-tank reactor,“ 11 10 2019. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Continuous_stirred-tank_reactor.
- [26] IAEA, Modelling of resuspension, seasonality and losses during food processing, Sv. 1 z 2TECDOC-647, Mai: International Atomic Energy Agency, 1992.
- [27] G. S. Linsley, Resuspension of the Transuranium Elements - A Review, London: HMSO, 1978.
- [28] L. R. Anspaugh, J. H. Shinn, P. L. Phleps a N. C. Kennedy, „Resuspension and redistribution of plutonium in soil,“ *Health Phys.*, sv. 29, pp. 571-582, 1975.
- [29] USAEC - United States Atomic Energy Commission, Proposed Final Environment Statement, Liquid Metal Fast Breeder Reactor Programme, Part II G-19, Washington, D.C.: USAEC, 1974.
- [30] USAEC - United States Atomic Energy Commission, Reactor Safety Study - An Assessment of Accident Risks in US Commercial Nuclear Power Plants, Washington, D.C., USA: USAEC, 1975, pp. Appendix IV, E-13.

- [31] J. A. Garland, Resuspension of Particulate Material from Grass, Experimental Programme 1979-1980, London: HMSO, 1982.
- [32] Wikipedia, „Čas,“ [Online]. Available: <https://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cas>. [Přístup získán 7 11 2019].
- [33] Šimůnek, J., M. Šejna, H. Saito, M. Sakai, and M. Th. van Genuchten, The Hydrus-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.17, HYDRUS Software Series 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA, pp. 342, 2013.
- [34] Vogel, T., K. Huang, R. Zhang, and M. Th. van Genuchten, The HYDRUS code for simulating one-dimensional water flow, solute transport, and heat movement in variably-saturated media, Version 5.0, Research Report No 140, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA, 1996.
- [35] RICHARDS, L.A. Capillary Conduction of Liquids Through Porous Mediums. Physics. 1931, Issue 5(Volume 1), 318-333. Dostupné z: doi:10.1063/1.1745010
- [36] van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44:892–898
- [37] SCHAAP, Marcel G., Feike J. LEIJ a Martinus Th. VAN GENUCHTEN. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. Journal of Hydrogeology. 2001, 10(251), 163-176.
- [38] Celia, M. A., and E. T. Bououtas, R. L. Zarba, A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation, Water Resour. Res., 26, 1483-1496, 1990
- [39] BŘEZINA, Jan a Milan HOKR. Mixed-Hybrid Formulation of Multidimensional Fracture Flow. In: 7th International Conference - Numerical Methods and Applications. Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2011, s. 125-132. DOI: doi:10.1007/978-3-642-18466-6_14. ISBN 978-3-642-18465-9. ISSN 0302-9743.
- [40] BŘEZINA, Jan, Jan STEBEL, David FLANDERKA, Pavel EXNER a Jan HYBŠ. https://flow.nti.tul.cz/packages/2.2.1_release/flow123d_2.2.1_doc.pdf: Flow123d version 2.2.1. Flow123d [online]. Liberec, 2018, 2018 [cit. 2020-09-24]. Dostupné z: https://flow.nti.tul.cz/packages/2.2.1_release/flow123d_2.2.1_doc.pdf
- [41] Juranová, E., Hanslík, E., Dulanská, S. et al. Sorption of anthropogenic radionuclides onto river sediments and suspended solids: dependence on sediment composition. Journal Radioanal Nucl Chem 324, 983–991 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07174-w>
- [42] Zhang, K., Wu, Y. & Houseworth, J.E. Sensitivity analysis of hydrological parameters in modeling flow and transport in the unsaturated zone of Yucca Mountain, Nevada, USA. Hydrogeology Journal 14, 1599–1619 (2006). <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0055-y>