

Interreg



Kofinanziert von
der Europäischen Union
Spolufinancováno
Evropskou unií

Sachsen – Tschechien | Česko – Sasko

**Interreg Sachsen – Tschechien
2021-2027**

**Interreg Česko – Sasko
2021–2027**



Interreg



Kofinanziert von
der Europäischen Union
Spolufinancováno
Evropskou unií

Sachsen – Tschechien | Česko – Sasko

**Interreg Sachsen – Tschechien
2021-2027**

**Interreg Česko – Sasko
2021-2027**





Modelování transportu látek v nenasycené zóně

Josef Chudoba





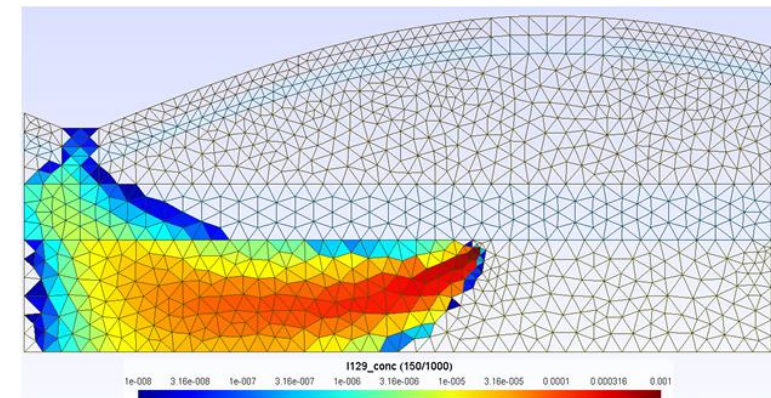
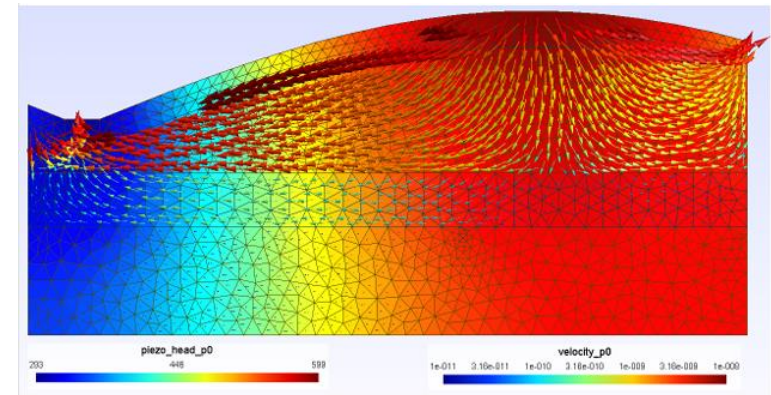
Úvod

- Publikovány budou rozšířené výsledky projektu TH03030274 „Software pro hodnocení šíření radionuklidů na rozhraní geosféra-biosféra a dopadů na člověka“. Projekt byl řešen v termínu 11/2017 až 9/2020.
- Výsledkem projektu bylo vytvořit software, který bude řešit model proudění a transportu látek v přípovrchové zóně - nesaturovaná oblast.
 - Využití výsledků pro hlubinné úložiště vyhořelého jaderného paliva.
 - Modelování proudění a transportu látek SW Flow123D
- Vstupem do modelu přípovrchové zóny jsou:
 - Koncentrace izotopů v nasycené zóně a jejich vlastnosti
 - Složení půdy
 - Model srážek
- Provedena případová studie pro transport látek v přípovrchové zóně.



Modelování transportu látek z hlubinného úložiště

- Využívá se SW Flow123D - <http://flow123d.github.io/>
- Ve výpočetní síti lze kombinovat elementy různé dimenze (3D hornina, 2D puklina)
- Pro výpočet transportu jsou zahrnuty následující fyzikální děje:
 - Radioaktivní rozpad
 - Difúze a disperze
 - Omezená rozpustnost izotopů
 - Časově závislé uvolňování izotopů z úložiště
- Obrázek nahoře – ilustrační příklad proudění podzemní vody
- Obrázek dole – transport látky z hypotetického úložiště. Jednotková koncentrace látky, nesorbuje.





Modelování transportu látek z hlubinného úložiště

- Pro výpočet transportu jsou zahrnuty následující fyzikální děje:
 - Radioaktivní rozpad
 - Difúze a disperze
 - Omezená rozpustnost izotopů
 - Časově závislé uvolňování izotopů z úložiště
- Model má šířku 2000 m, hloubka modelu 1000 m, úložiště 500 m pod povrchem. Srážky 800 mm/rok
- Uvolňuje se konstantní množství izotopů 1g/rok
- C14, Cl36, Ca41, Se79, I129 a Cs135

Isotope	Concentration [ng/m ³]	Activity [Bq/m ³]
C14	<< 1	1
Cl36	1920	2340
Ca41	13.6	43
Se79	<< 1	1
I129	19 440	127
Cs135	<< 1	1

Isotope	Effective dose [μSv/yr]		
	Ingestion of water	Other ingestion	Total
C14	0.000 6	0.000 4	0.001
Cl36	2.1	4.5	6.6
Ca41	0.008	0.021	0.029
Se79	0	7.1	7.1
I129	14	5.5	19.5
Cs135	0.002	0.042	0.044



Model transportu v nesaturované zóně

Koncepce modelu

- Cíl – na základě známého průběhu koncentrace v podzemní vodě a předpokládaného vývoje srážek vyhodnotit rozložení množství radionuklidů v blízkosti povrchu pomocí modelu nesaturované zóny.
- Vstupem do modelu:
 - Časový vývoj koncentrace kontaminantu v podzemní vodě – tvoří okrajovou podmínku transportu na dolním okraji modelu
 - Hloubka hladiny podzemní vody
 - Časový průběh hodnoty srážek – tvoří okrajovou podmínku proudění na horním okraji modelu.
 - Časový průběh velikosti odparu – Hamonův model
 - Hloubkový profil složení půdy v nenasycené zóně – van Genuchtenovy parametry
 - (Časový vývoj a umístění vodních zdrojů v modelu)
- Výpočet
 - Richardsova rovnice pro výpočet proudění
 - Advekčně-disperzní rovnice pro výpočet transportu
- Okrajové podmínky:
 - Proudění – horní okraj – objem vody vstupující do hlubokého oběhu, dolní okraj hydraulická výška (oboje závislé na čase).
 - Transport – horní okraj nulová koncentrace, dolní okraj převzatá koncentrace z modelu saturovaného prostředí
- Dolní část modelu musí z důvodu numerické stability zasahovat několik metrů do nasycené zóny.
- Výstup z modelu:
 - Tlaková výška, vodní obsah a tok na každém uzlu výpočetní sítě v závislosti na čase
 - Koncentrace látky na každém uzlu výpočetní sítě v závislosti na čase.



Model transportu v nesaturované zóně

Model proudění

- Nasycené prostředí – všechny póry jsou zaplněny a tlaková výška $h \geq 0$. Proudění horizontálně-vertikální.
- Nenasycené prostředí – póry jsou zaplněny vodou, nebo vzduchem. Tlaková výška $h < 0$. Proudění vertikální. Dimenze modelu omezena na 1D
- Proudění lze vyjádřit Richardsovou rovnicí: $\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta, h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right) - S$
 - h tlaková výška [m] θ vlhkost $\left[\frac{m^3}{m^3} \right]$ t čas [s]
 - z svislá osa [m] S zdroje $\left[\frac{m^3}{m^3 s} \right]$ K nesat. hydraulická vodivost $\left[\frac{m}{s} \right]$
- Proměnné $\theta(h)$ a $K(h)$ jsou nelineárně závislé na okamžité hodnotě tlakové výšky h . Dle van Genuchtena lze tuto závislost vyjádřit následujícími vztahy:
 - $\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m}$ $h < 0$ $K(h) = K_s \cdot S_e^{0.5} \cdot [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2$ $S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ $m = 1 - \frac{1}{n}$
 - θ_r reziduální vlhkost θ_s satureovaná vlhkost α, n van Genuchtenovy parametry K_s sat. hydr vodivost
- Van Genuchtenovy α a n parametry odvisí od složení půdy - podílu prachu, jílu a písku a její hustotě.
- Richardsova rovnice nemá analytické řešení, v modelu je řešena pomocí Piccardova numerického schématu.





Model transportu v nesaturované zóně

Model transportu

- V modelu transportu je zahrnuta disperze a radioaktivní rozpad. V každém časovém kroku zároveň uvazujeme rovnováhu mezi koncentrací v pevné a kapalně fázi danou distribučním koeficientem. Za těchto předpokladů lze závislost koncentrace na čase a místě vyjádřit advektivně-disperzní rovnicí (12).

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

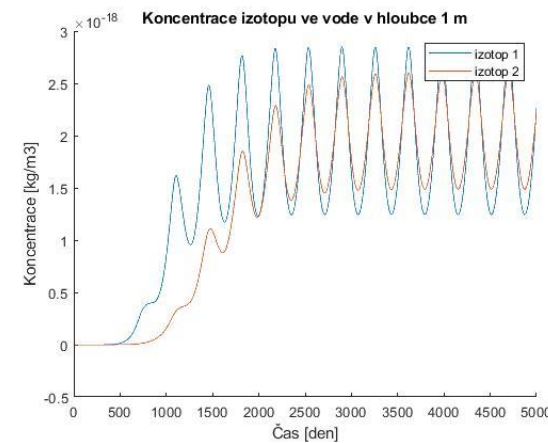
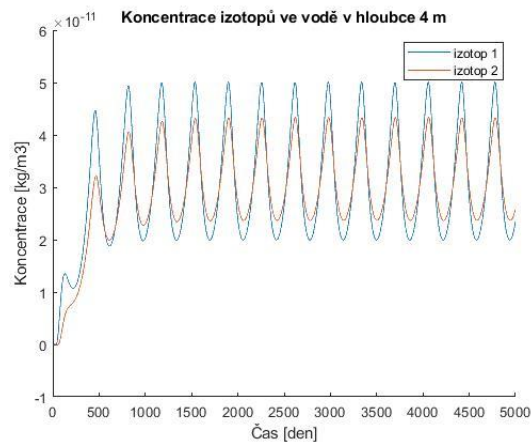
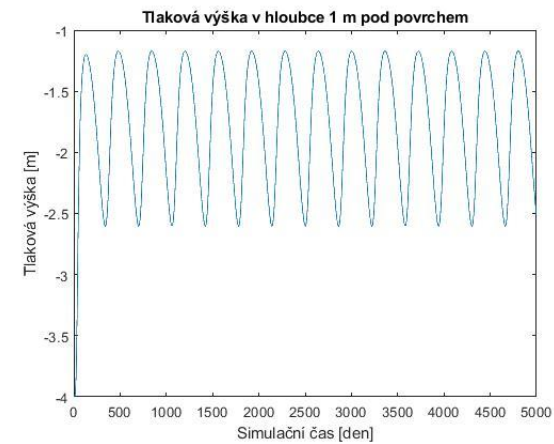
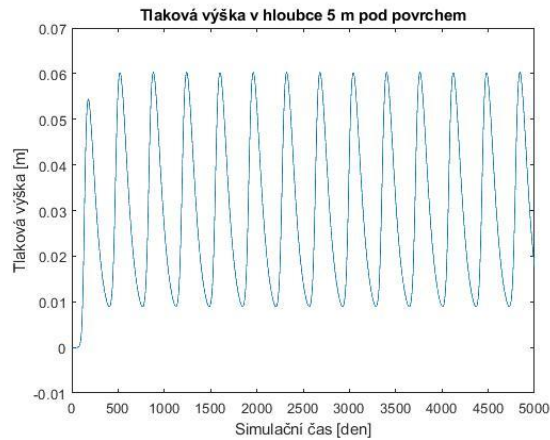
- θ vlhkost $\left[\frac{m^3}{m^3} \right]$
 - w, s vodní fáze, pevná fáze
 - D_k^w disperzní koeficient k-tého izotopu $\left[\frac{m^2}{s} \right]$
 - $\gamma_{w,k}, \gamma_{s,k}$ reakce nultého řádu $\left[\frac{kg}{m^3 s}, \frac{1}{s} \right]$
 - Vztah mezi koncentrací v pevné fázi s_k a vodní fázi c_k : $s_k = k_{D,k} \cdot c_k$
 - $k_{D,k}$ $\left[\frac{m^3}{kg} \right]$ distribuční koeficient pro k -tý izotop.
 - Výsledkem numerického řešení rovnice $c_k(t, z)$
- ρ hustota horniny $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$ t čas [s] z svislá osa [m]
 c_k, s_k konc. k-tého izotopu ve vodní a v pevné fázi $\left[\frac{kg}{m^3}, \frac{kg}{kg} \right]$
 q tok $\left[\frac{m}{s} \right]$ $\mu_{w,k}, \mu_{s,k}$ rad. rozpad k-tého izotopu $\left[\frac{1}{s}, \frac{1}{s} \right]$
 r_k zdroje $\left[\frac{kg}{m^3 s} \right]$



Případové studie – periodický průběh srážek

- Model – 10 m sloupec rozdělený do 100 elementů, 5 m saturovaná oblast
- Hornina: 40 % prachu, 15 % jílu a 45 % písku. Hustota vysušené horniny je 1500 kg/m^3 .
 - Van Genucht. parametry: $K_s=0.1652 \text{ m/den}$, $n=1.469$, $\theta_r = 0.0492$, $\theta_s = 0.3687$, $a=1.355 \text{ m}^{-1}$
- Proudění – předepsán tok reprezentující srážky po odečtu odparu.
 - Předpokládaný vtok do oblasti je 360 mm /rok .
 - Okrajová podmínka na horním okraji: $okp_{top_{Flux}} = -0.12 \cdot \sin(2 \cdot 3.14 \cdot t/360) - 0.1 \text{ [cm/den]}$
 - Okrajová podmínka na dolním okraji: $h=5 \text{ m}$
- Transport 2 izotopy – poločas rozpadu $t_{0.5,1} = 10000 \text{ dní}$. 2. izotop se nerozpadá
 - Distribuční koeficient $k_{D,2} = 0.0001 \text{ m}^3/\text{kg}$, 1. izotop nesorbuje

Případové studie – periodický průběh srážek





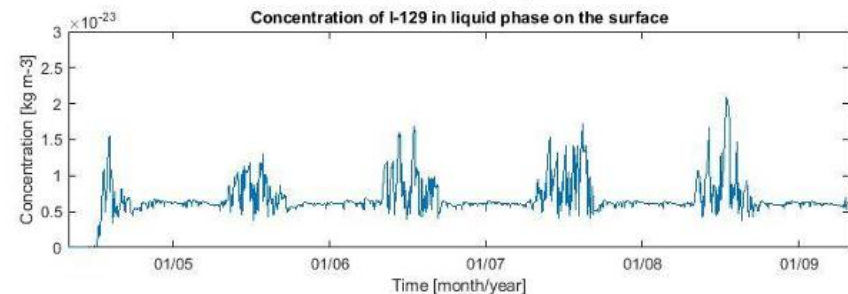
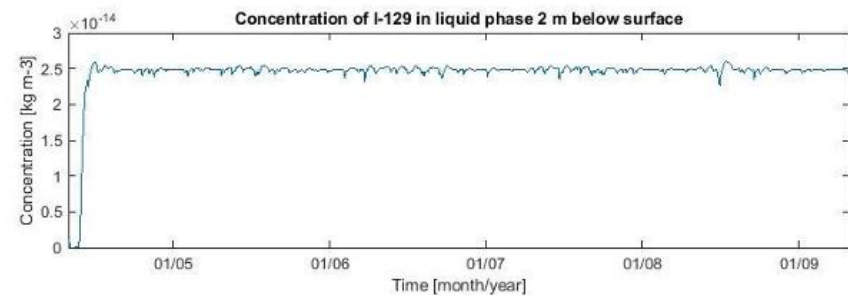
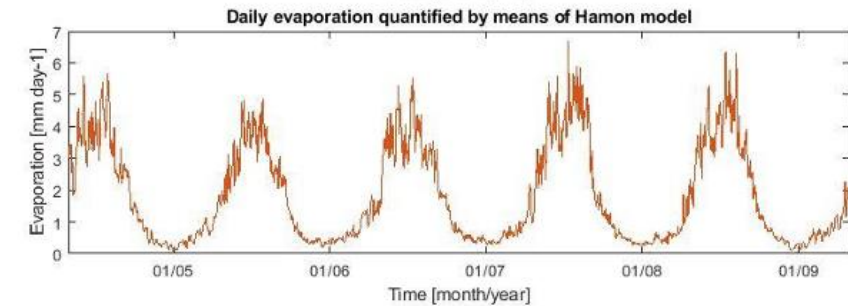
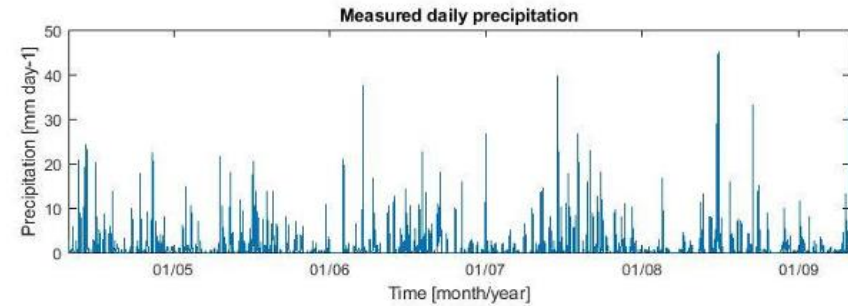
Případová studie 2 - srážky a odpar stanoveny z meteorologických dat

- Model – 10 m sloupec rozdělený do 100 elementů, 7 m saturovaná oblast
- Hlinito písčité půda
- Proudění:
 - Meteorologicky naměřené denní srážky z Klementina (data od roku 1775)
 - Odpar – zvolen Hamonův model (teplota, datum, zeměpisná šířka)
- Počáteční koncentrace I129 - $c_{I129} = \frac{1\mu g}{m^3}$. I129 nesorbuje



Případová studie 2

Srážky a odpar stanoveny z meteorologických dat





Závěr

- Byl vytvořen software, který řeší problematiku proudění a transportu v nesaturované zóně
- Popsán numerický model založený na Richardsově rovnici a advekčně-disperzní rovnici
- Snaha o odstranění numerických nestabilit.
- Rovnice proudění a transportu otestována na případových studiích, kde okrajové podmínky byly definovány na základě reálných meteorologických údajů srážek a Hamonově modelu odparu
- Následné činnosti:
 - Ověření funkčnosti na více typů úloh
 - Stochastické modelování





Děkuji za pozornost



