

A photograph of a forest stream with a title overlay. The stream flows through a dense forest of tall, thin trees. The water is clear and flows over rocks, creating small rapids. The surrounding forest is lush with green and brown foliage, suggesting an autumn setting. The title text is centered over the image in a white, serif font.

# OCHRANA PODZEMNÍCH VOD

VII.



## DNAPL's v saturované zóně

- každý pór nasycený smáčejší kapalinou (vodou) klade nesmáčejší kapalině (DNAPL) odpor vyjádřený kapilárním (tzv. vstupním) tlakem

$$P_d = \frac{2\sigma \cos \varphi}{r}$$

$$P_d = \frac{2\sigma \cos \varphi}{b}$$

- orientační výpočet velikosti póru v průlinově porózním prostředí

$$r \approx d / 8$$

$$r \approx (k / n)^{0,5}$$

- akumulace volné fáze generuje tlak způsobený objemovou hmotností

$$P_g = z_n g \rho_{nw}$$

- v saturované zóně je tento gravitační tlak přímo úměrný rozdílu objemových hmotností DNAPL a vody

$$P_g = z_n g (\rho_{nw} - \rho_w)$$

## HYDROSTATICKÉ PODMÍNKY

průnik volné fáze DNAPL do saturované zóny

$$z_n = \frac{2\sigma \cos \varphi}{rg\rho_{nw}}$$

průnik volné fáze do menších pórů (puklin) – povrch tělesa je v podmínkách nasávání

$$z_n = \frac{2\sigma \cos \varphi}{rg(\rho_{nw} - \rho_w)}$$

průnik volné fáze do menších pórů (puklin) – povrch tělesa je v podmínkách drenáže

$$z_n = \frac{[P_{c(jemno)} - P_{c(hrubo)}]}{rg(\rho_{nw} - \rho_w)}$$

stabilní délka akumulace na uklánějící se vrstvě v saturované zóně

$$L_n = \frac{P_d}{(\rho_{nw} - \rho_w)g \sin \theta}$$

## HYDRODYNAMICKÉ PODMÍNKY

vertikální hydraulický gradient (**rozdíl výšek hladin**) potřebný k zamezení dalšího hloubkového průniku volné fáze DNAPL (měřeno přes mocnost akumulace)

$$\Delta h = i_c z_n = \frac{z_n (\rho_{nw} - \rho_w)}{\rho_w}$$

kritická hodnota horizontálního hydraulického gradientu, potřebná k mobilizaci volné fáze DNAPL (ležící horizontálně na kapilární bariéře)

$$i_c = \frac{2\sigma \cos \varphi}{r\rho_w gL}$$

hydraulický gradient potřebný k zamezení pohybu volné fáze v uklánějící se puklině nebo ležící podél ukloněné plochy

$$i_c = \frac{(\rho_{nw} - \rho_w) \sin \theta}{\rho_w}$$

# PŘETRVÁNÍ DNAPL V HORNINOVÉM PROSTŘEDÍ

## Kapalné reziduum

- produkuje vysoké koncentrace (na hranici efektivní rozpustnosti)
- podzemní voda proudí póry kolem kapalného rezidua
- dlouhodobý trend – stagnace a potom pozvolný pokles

$$t = \frac{m}{v_i n C_w F}$$

přibližná doba rozpuštění kapalného rezidua  
(jen orientační výpočet – zjednodušení)

## Akumulace volné fáze

- produkuje vysoké koncentrace – intenzivnější ředění - cca jednotky % rozpustnosti ve vzdálenostech několika desítek metrů
- podzemní voda proudí jen po povrchu akumulace a její svrchní částí
- rozpouštění jen z povrchové části akumulace – velmi dlouhodobé
- při přechodu akumulace na reziduum (závěrečná fáze rozpouštění) – nárůst koncentrací

## Akumulace volné fáze

- teoreticky nad každou kapilární bariérou v zóně výskytu kapalné fáze DNAPL
- orientační určení plochy akumulace

$$A_m < \frac{(V_n - V_r)}{(z_n s_r)}$$

- ve skutečnosti je plocha akumulace spíš menší (hodnoty  $s$  v akumulaci převyšují  $s_r$ )

## Rozpouštění akumulace volné fáze

závislé na prostředí - rychlost proudění a vertikální disperzivita

závislé na akumulaci - délka (plocha) povrchu akumulace a rozpustnosti

$$M_a = \left[ (4D_T v_i) / (\pi L_p) \right]^{1/2} C_{SAT} n$$

průměrný transport hmoty  
z plochy (povrchu) akumulace

$$D_T = D_e^* + (v_i \alpha_v)$$

při zanedbání změny plochy akumulace v čase (s postupujícím rozpouštěním)

$$t_d = \frac{h_p L_p n \rho_n s_n}{M_a}$$

$L_p$

délka akumulace

$h_p$

mocnost akumulace

$s_n$

nasycení nesmáčeující kapalinou (DNAPL)  
v akumulaci

$n$

efektivní porozita

$\rho_n$

hustota kapalné fáze DNAPL

## Doba úplného rozpouštění kapalné fáze DNAPL

běžně se vyskytující objemy v horninovém prostředí

*kapalné reziduum* → **roky až desítky let**

*akumulace volné fáze* → **desítky až stovky let**

- rozpouštěním se vždy produkují rizikové koncentrace

- přetrvání v puklinově propustných horninách

- vliv na propustnost jílu



# NAPL V NESATUROVANÉ ZÓNĚ

- značná část NAPL patří mezi těkavé organické látky (TOL, VOC)
- např. BTX, styren, ClE (PCE – VC), TCA, DCA, MC, freony, monocyklické ClU, atd.
- posouzení těkavosti – tlak nasycených par (přechod z kapalné formy do plynné) a Henryho konstanta (přechod z vodného roztoku do par)
- vytěkávání lze považovat za významný proces vedoucí k odstranění látek z horninového prostředí

## orientační pravidla

*Lyman a kol. (1984)*

$K_H < 3 \times 10^{-7} \text{ atm-m}^3/\text{mol}$  – netěkavé

$K_H > 3 \times 10^{-7} \text{ atm-m}^3/\text{mol}$  – těkání lze považovat za významný transportní mechanismus

*Davis a Olsen (1991)*

při rovnovážném stavu je větší množství látek s  $K_H > 10^{-5} \text{ atm-m}^3/\text{mol}$  v parách,  
pro látky s  $K_H < 10^{-5} \text{ atm-m}^3/\text{mol}$  je větší množství ve vodných roztocích

## Faktory ovlivňující těkavost

- teplota, tlak, složení půdního vzduchu (směs)
- kinematické ovlivnění přenosu hmoty mezi fázemi pravděpodobně nehraje tak velkou roli, platí pro pasivní proudění vzduchu (nikoliv aktivní, např. SVE)
- kolísání atmosférického tlaku – minimální vliv – vysoký tlak – zadržuje kontaminanty, nízký tlak – zvyšuje odstraňování par

rovnovážný stav mezi koncentracemi látky ve vodě a půdním vzduchu (tenká vrstva při hladině)

$$K'_H = \frac{C_a}{C_w} \quad K'_H = \frac{K_H}{R_g T} \quad H'_K \quad \text{Henryho konstanta (bezrozměrná)}$$

obecná forma Henryho konstanty (pro látky slabě rozpustné ve vodě) – v molech

$$K_H = \frac{P_o / S}{R_g T} \quad \text{hodnoty běžně tabelovány (atm-m}^3\text{/mol)}$$

Raoultův zákon – parciální tlak plynu (tlak par) ve směsi plynů (obdoba efektivní rozpustnosti)

$$X = \frac{P_{org}}{P_{org}^o}$$

určení parciálního tlaku (tlaku par) a výpočet koncentrace látky v půdním vzduchu (v molech)

$$C_g = \frac{P}{R_g T}$$

$$C_{gA} = \frac{X_A P_A}{R_g T}$$

## Migrace par

základní mechanismus je **všesměrná difúze**

$$C_i(x, t) = C_0 \cdot \operatorname{erfc} \frac{x}{2(D^*_g \cdot t)^{0,5}} \quad \text{omezení pro jednoduché okrajové podmínky}$$

difuzivní koeficient ve volném vzduchu

$D_g$  hodnoty od  $1 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$  (metylen chlorid) až do  $8,11 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$  (TCE)  
průměrně  $7 - 9 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$

přepočet na efektivní difuzivní koeficient vzduchu

$$D^*_g \quad D^* = D \tau_a \quad \tau_a = \frac{n_a^{2,333}}{n^2}$$



## advektivní pohyb - spíše výjimečný

- při kolísání hladiny
- v důsledku vyšší hustoty par - pokud převýší hustota par hustotu okolního plynu alespoň o 10% a propustnost plynu je alespoň  $1 \times 10^{-11} \text{ m}^2$  (hrubozrnné písky, šterky)
- únik skládkových plynů (vznikají mikrobiálními procesy, způsobují vznik gradientu tlaku a i přednostní únik kontaminantů)
- aktivní odběru půdního vzduchu (SVE)

## retardační faktor

$$R_a = 1 + \frac{n_w}{n_a K'_H} + \frac{\rho_b K_d}{n_a K'_H}$$

## celkově – shrnutí

- průzkum půdního vzduchu je rychlá a finančně poměrně málo nákladná metoda (vpichy levnější než vrty) na zjištění rozsahu a intenzity **nesaturované** zóny
- záleží na situování ohniska kontaminace - pokud je kontaminována saturovaná zóna, půdní vzduch může být zcela bez kontaminantů a opačně
- pohyb je komplikovaný
- vliv nehomogenit – nutné období ČZ – měří se tlak, nebo vyvolaný podtlak – speciálně vystrojené vrty