OCHRANA PODZEMNÍCH VOD

VII.

DNAPL´s v saturované zóně

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

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

- orientační výpočet velikosti póru v průlinově porózním prostředí

$$r \approx d/8 \qquad r \approx \left(k/n\right)^{0,5}$$

- 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

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

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

$$z_n = \frac{\left\lfloor P_{c(jemno)} - P_{c(hrubo)} \right\rfloor}{rg(\rho_{nw} - \rho_w)}$$

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)

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

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

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

- 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

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

průměrný transport hmoty
z plochy (povrchu) akumulace

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

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 nesmáčející kapalinou (DNAPL) v akumulaci
n	efektivní porozita
ρ_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 jílů

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)

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

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

Davis a Olsen (1991)

při rovnovážném stavu je větší množství látek s $K_H > 10^{-5}$ atm-m^3/mol v parách,

pro látky s $K_H < 10^{-5}$ atm-m^3/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)

$$K'_H = C_a / C_w \qquad K'_H = \frac{K_H}{R_g T} \qquad H'_K$$

Henryho konstanta (bezrozměrná)

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

$$K_H = \frac{P_o / S}{R_g T}$$

hodnoty běžně tabelovány (atm-m^3/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)

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

Migrace par

základní mechanizmus je **všesměrná difúze**

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

difuzivní koeficient ve volném vzduchu

D_g hodnoty od 1.10^{-1} cm^2/s (metylen chlorid) až do $8{,}11.10^{-2}$ cm^2/s (TCE)
průměrně $7 – 9.10^{-2}$ cm^2/s

přepočet na efektivní difuzivní koeficient vzduchu

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

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 $1x10^{-11}$ m^2 (hrubozrnné písky, štěrky)
- 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 obdoby ČZ – měří se tlak, nebo vyvolaný podtlak – speciálně vystrojené vrty