

Metody hydrogeologického výzkumu

IV.

HYDRODYNAMICKÁ DISPERZE

2 neoddělitelné procesy

1. difúze
2. disperze (rozptyl)

METODY STANOVENÍ HODNOT DISPERZIVITY

- laboratorní stanovení v kolonách
- stanovení metodou jednoho vrtu
- stanovení metodou dvou vrtů
- stanovení z kontaminačních mraků
- dopočítání hodnot při modelování – úpravou jiných parametrů zvodněného prostředí
- stochastické metody – korelace disperzivity s variací hodnot hydraulické vodivosti

- v 3-D systému ve všech směrech (x, y, z)
- nejčastěji tzv. podélná (longitudinální – paralelní s hlavním směrem proudění – ve směru osy x) a příčná disperzivita (transverzální – kolmá na směry proudění – ve směru osy y nebo z)

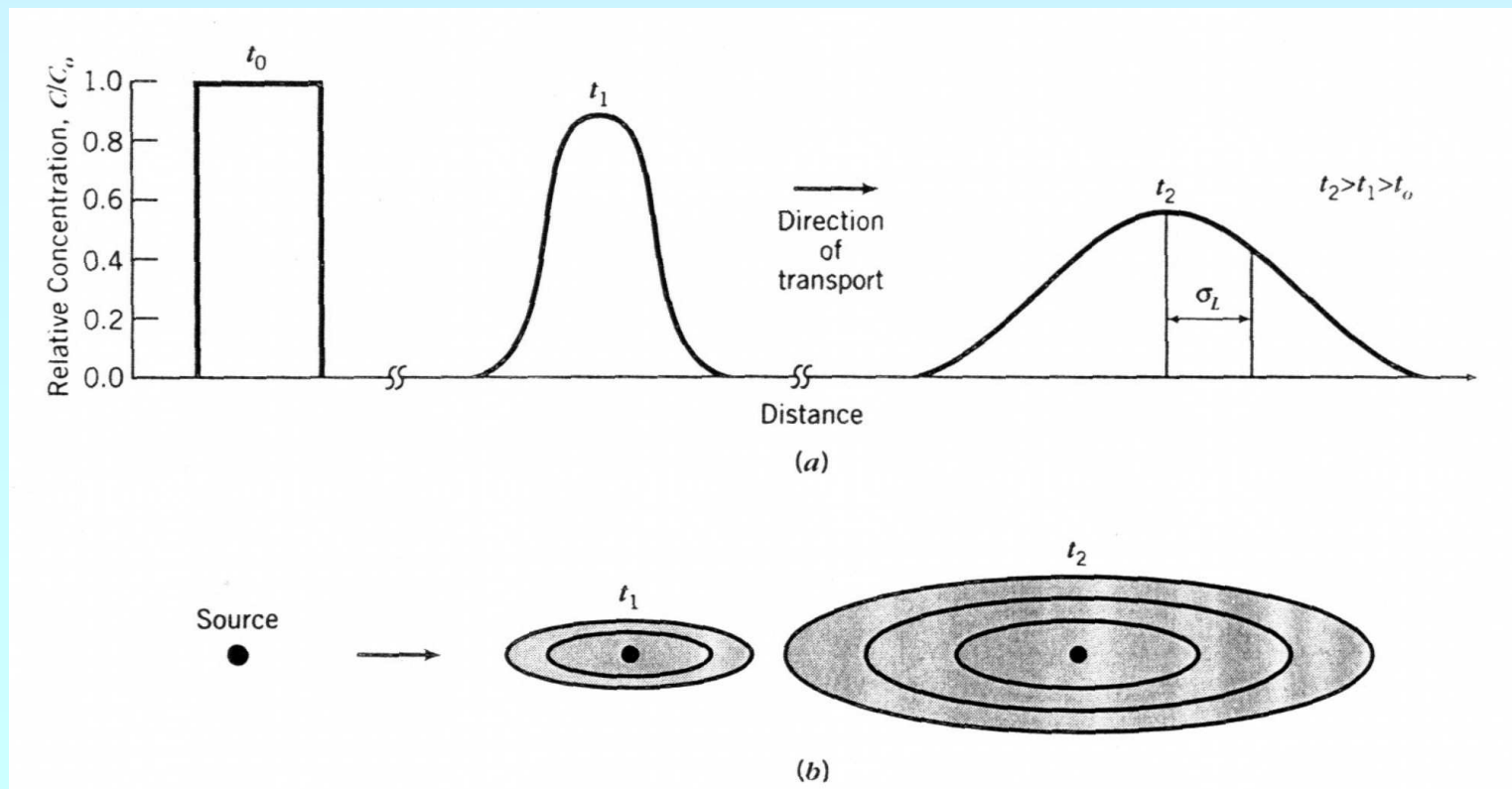
$$D_L = \alpha_L \cdot v_i + D'_d$$

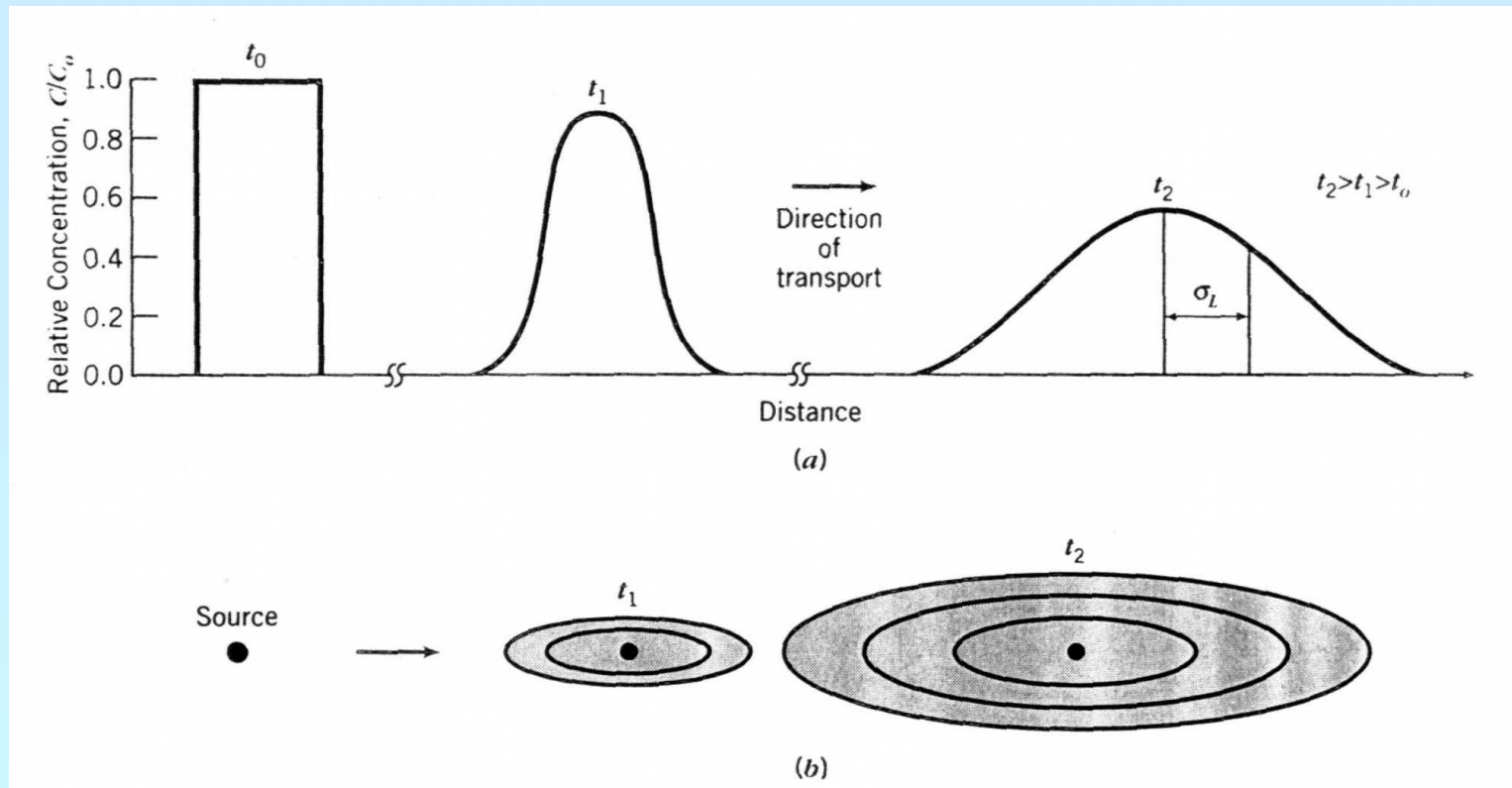
D ... koeficient hydrodynamické disperze [m^2/s]

D'_d . efektivní difuzivní koeficient [m^2/s]

$$D_{T(y,z)} = \alpha_{T(y,z)} \cdot v_i + D'_d$$

α ... disperzivita [m]





- šíření (rozptyl) tělesa rozpuštěné látky podléhajícího hydrodynamické disperzi je možné popsat rovněž pomocí Gaussova rozdělení
- charakteristika souboru pomocí aritmetického průměru a rozptylu
- s rostoucím časem (vzdáleností) klesá maximální koncentrace (a tím i poměr C/C_0)

$$D_L = \frac{\sigma_L^2}{2 \cdot t}$$

$$D_T = \frac{\sigma_T^2}{2 \cdot t}$$

LABORATORNÍ EXPERIMENTY

1. stanovení v laboratorních kolonách pomocí rovnice advektivně – disperzního modelu proudění v 1-d systému

vychází z řešení základní rovnice proudění ve tvaru $D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t}$

za předpokladu, že $C(0,t) = C_0$ a současně $C(x,0) = 0$ a určitého zjednodušení (zdroj – 1. typ okrajové podmínky)

$$\frac{C}{C_0} = 0,5 \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - v \cdot t}{2(\alpha_x \cdot v \cdot t)^{1/2}} \right) \right]$$

nepřesnosti metody

- zjednodušení – uvažuje homogenní podmínky
- testován je pouze malý výřez horninového prostředí
- neuvažuje příčnou disperzivitou
- disperzivita je ovlivněna délkou (časem) působení

LABORATORNÍ EXPERIMENTY

2. stanovení v laboratorních kolonách určením závislosti relativní koncentrace na vyteklém objemu pórů

jeden objem pórů = $F \cdot L \cdot n$

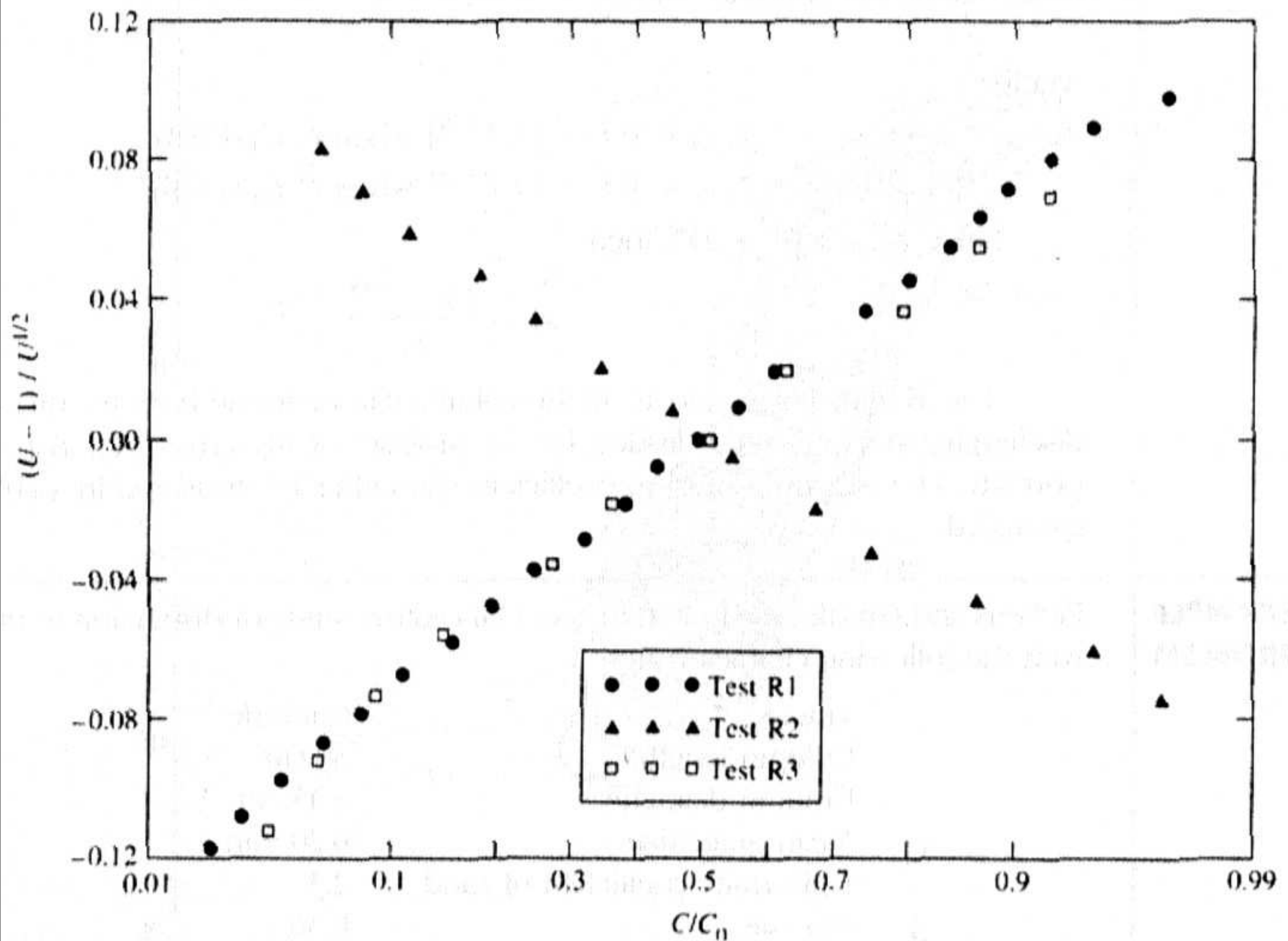
celkový odtok = $v_x \cdot n \cdot F$

celkový počet objemů pórů

$$U = \frac{v_x \cdot n \cdot F \cdot t}{F \cdot L \cdot n} = \frac{v_x \cdot t}{L} = t_r$$

po úpravě $\frac{C}{C_0} = 0,5 \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{1 - U}{2(U \cdot D_L - v_x \cdot L)^{1/2}} \right) \right]$ kde U je celkový počet vyteklých objemů pórů

v grafech se vykresluje závislost C/C_0 na $(U-1)/U^{0,5}$ – při vykreslení na pravděpodobnostní papír se závislost zobrazuje jako přímka, jejíž sklon je roven Dx



LABORATORNÍ EXPERIMENTY

2. stanovení v laboratorních kolonách určením závislosti relativní koncentrace na vyteklém objemu pórů

v grafech se vykresluje závislost C/C_0 na $(U-1)/U^{0,5}$ – při vykreslení na pravděpodobnostní papír se závislost zobrazuje jako přímka, jejíž sklon je roven Dx

$$D_x = \frac{V_x \cdot L}{8} [J(0,84) - J(0,16)]^2$$

$J_{0,84}$ hodnota z grafu při poměru C/C_0 0,84
 $J_{0,16}$ hodnota z grafu při poměru C/C_0 0,16

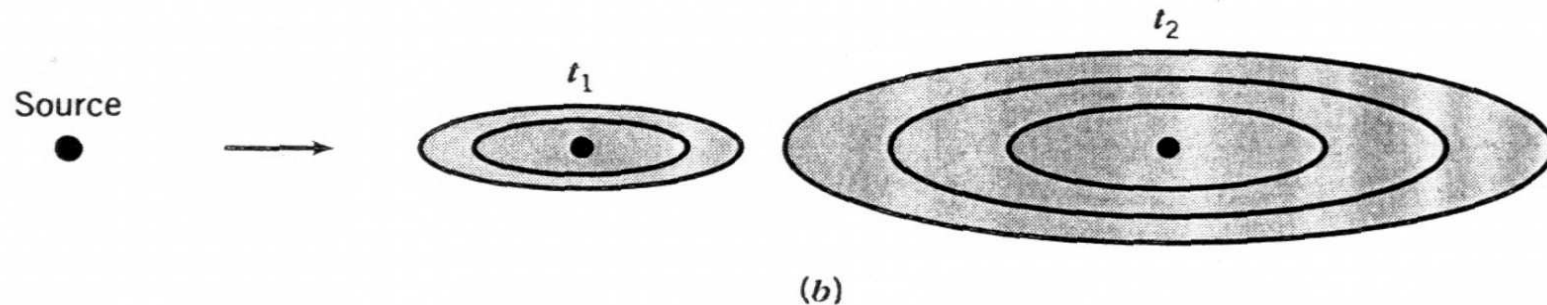
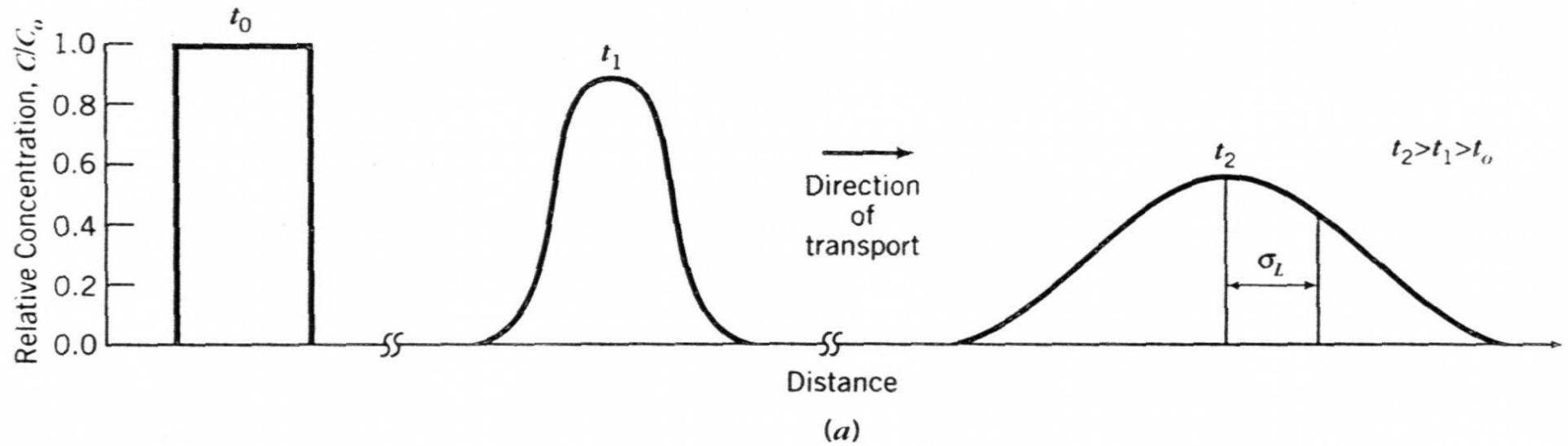
kde $D_x = \alpha_x \cdot V_x + D_d$, z čehož
$$\alpha_x = \frac{D_x - D_d}{V_x}$$

nepřesnosti metody

- zjednodušení – uvažuje homogenní podmínky
- testován je pouze malý výřez horninového prostředí
- neuvažuje příčnou disperzivitou
- disperzivita je ovlivněna délkou (časem) působení

TERÉNNÍ EXPERIMENTY

1.



odchylka a rozptyl jsou měnkem rozšířením pulsu a tím i disperzivní charakteristiky

$$\sigma = (2 \cdot D \cdot t)^{1/2}$$

relativní koncentrace se mění jako funkce času

s dobou transportu v systému s **konstantní rychlostí**

pro 1-D kolonu

$$D_L = \frac{\sigma_L^2}{2t}$$

je-li rychlost konstantní, potom současně

$$D_L = \frac{\sigma_L^2 \cdot v}{2x}$$

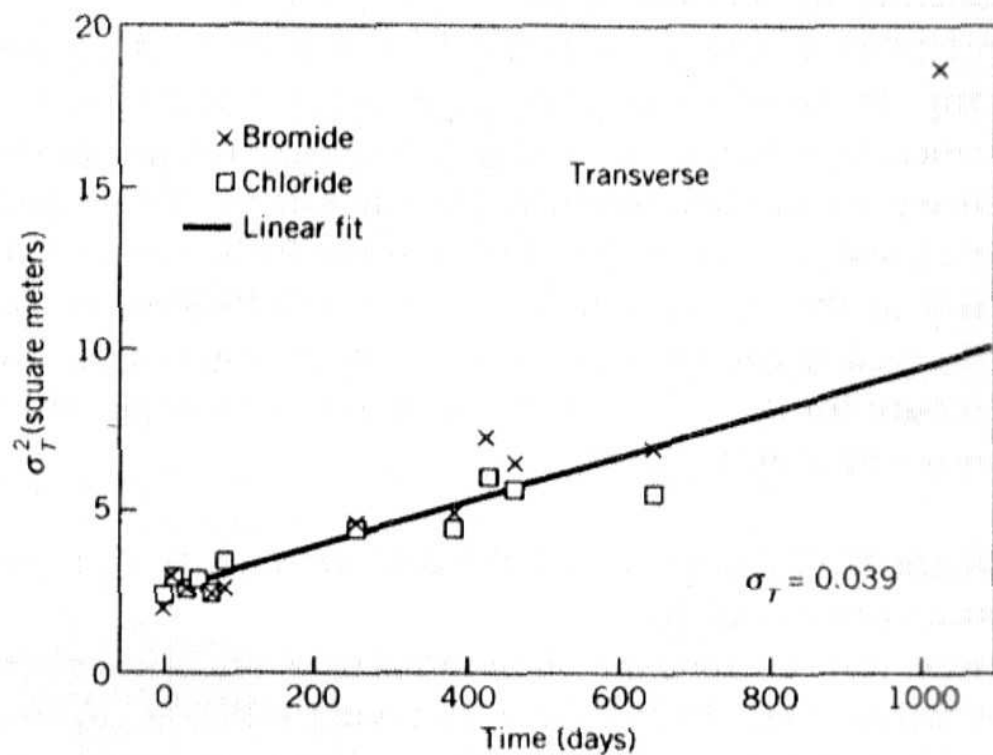
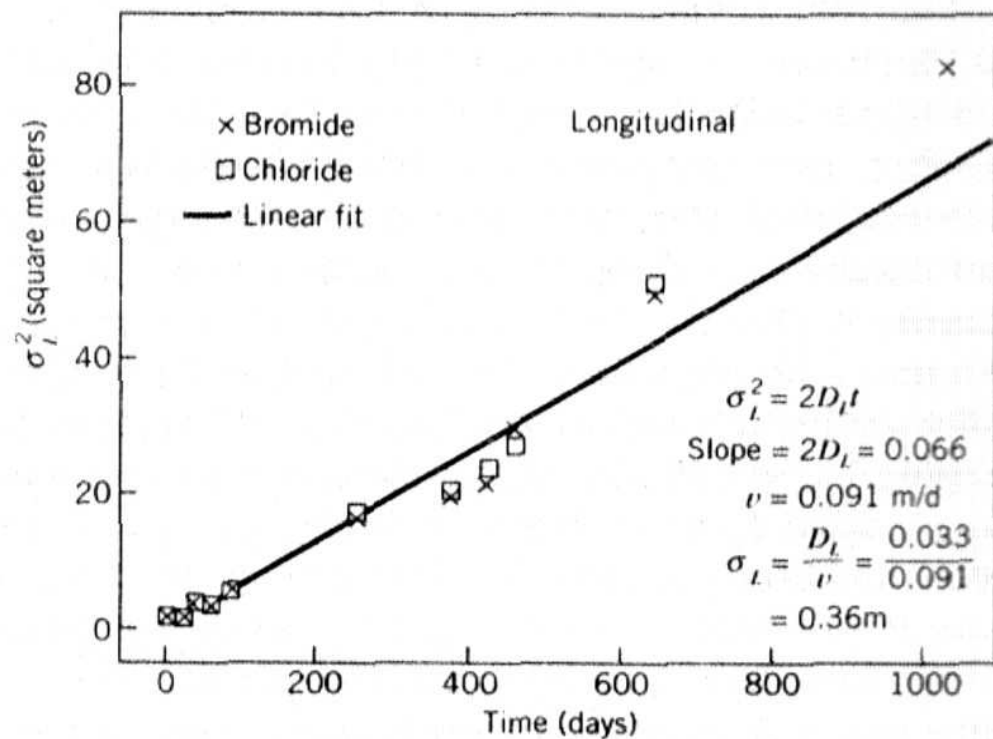
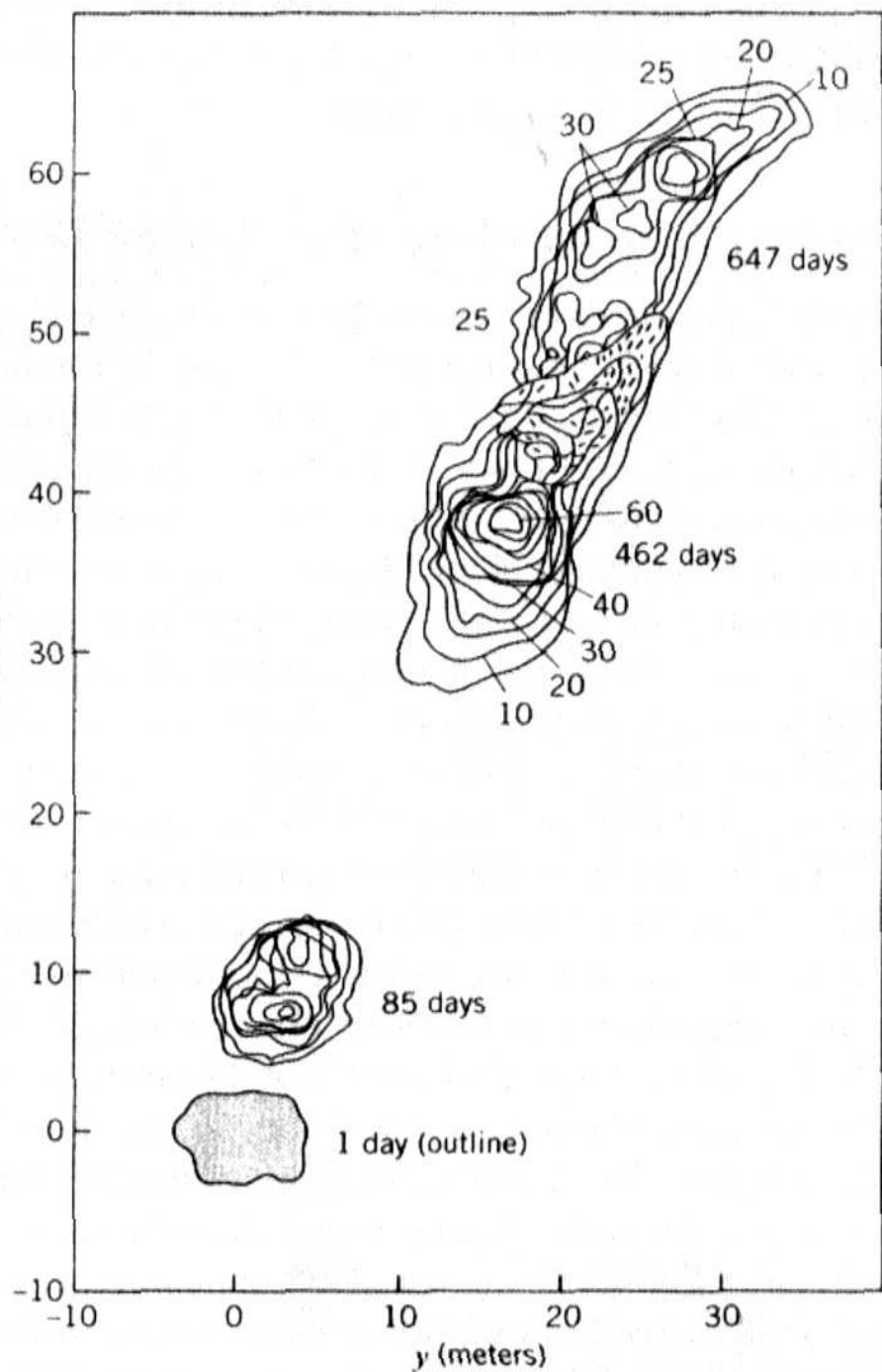
tyto vztahy potvrzují teoretické předpoklady i experimenty v kolonách

POSTUP

- vykreslení rozsahu kotaminačního mraku
- stanovení průměru, rozptylu a směrodatné odchylky
- při známé rychlosti proudění výpočet disperzivity – nejčastěji α_L , případně i $\alpha_{T(y)}$

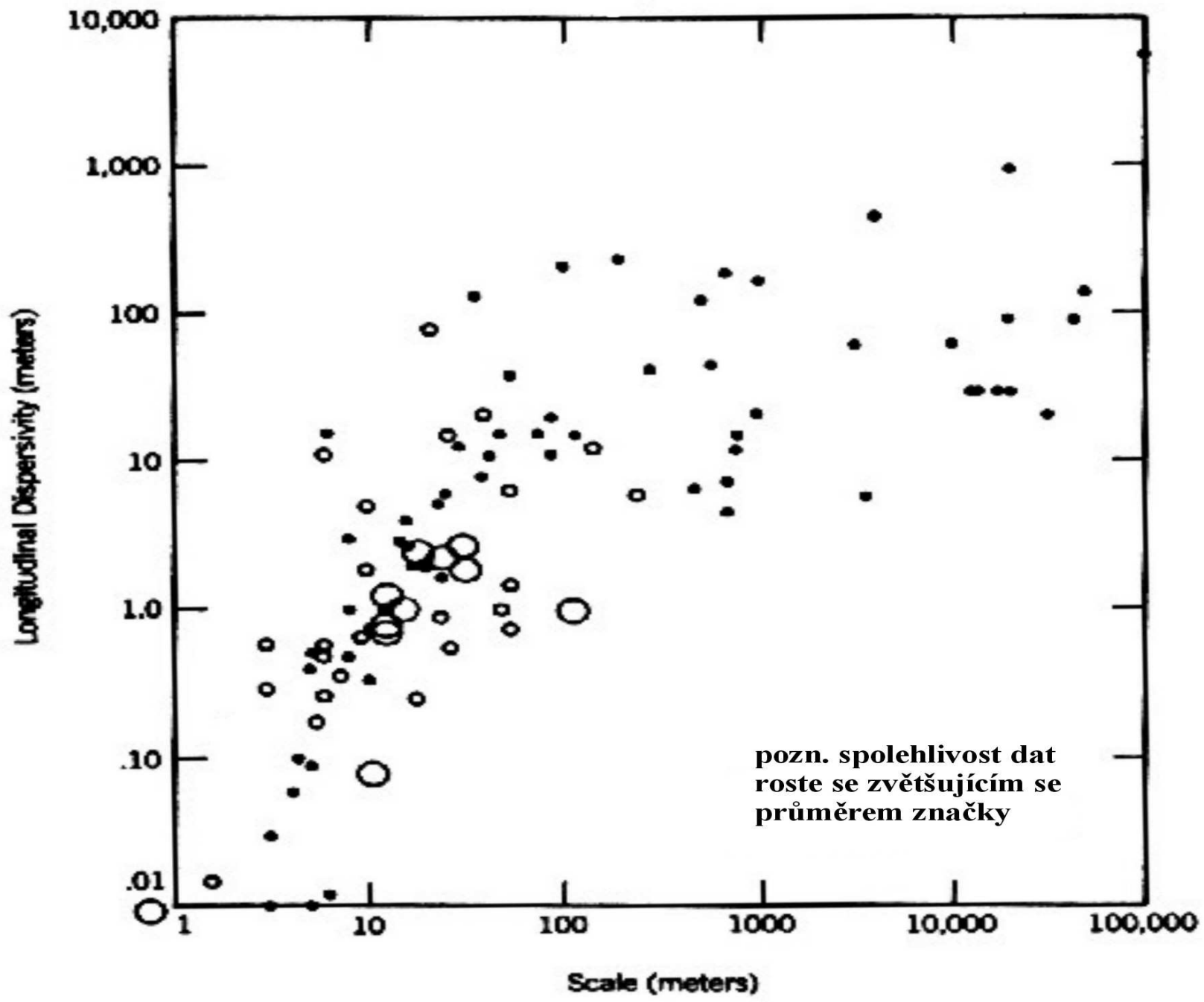
nepřesnosti metody

- zjednodušení – uvažuje homogenní podmínky (konstantní rychlost proudění)
- disperzivita je ovlivněna délkou (časem) působení
čím delší je vzdálenost, tím větší jsou výsledné hodnoty disperzivit



nepřesnosti metody

- zjednodušení – uvažuje homogenní podmínky (konstantní rychlost proudění)
- disperzivita je ovlivněna délkou (časem) působení
čím delší je vzdálenost, tím větší jsou výsledné hodnoty disperzivit

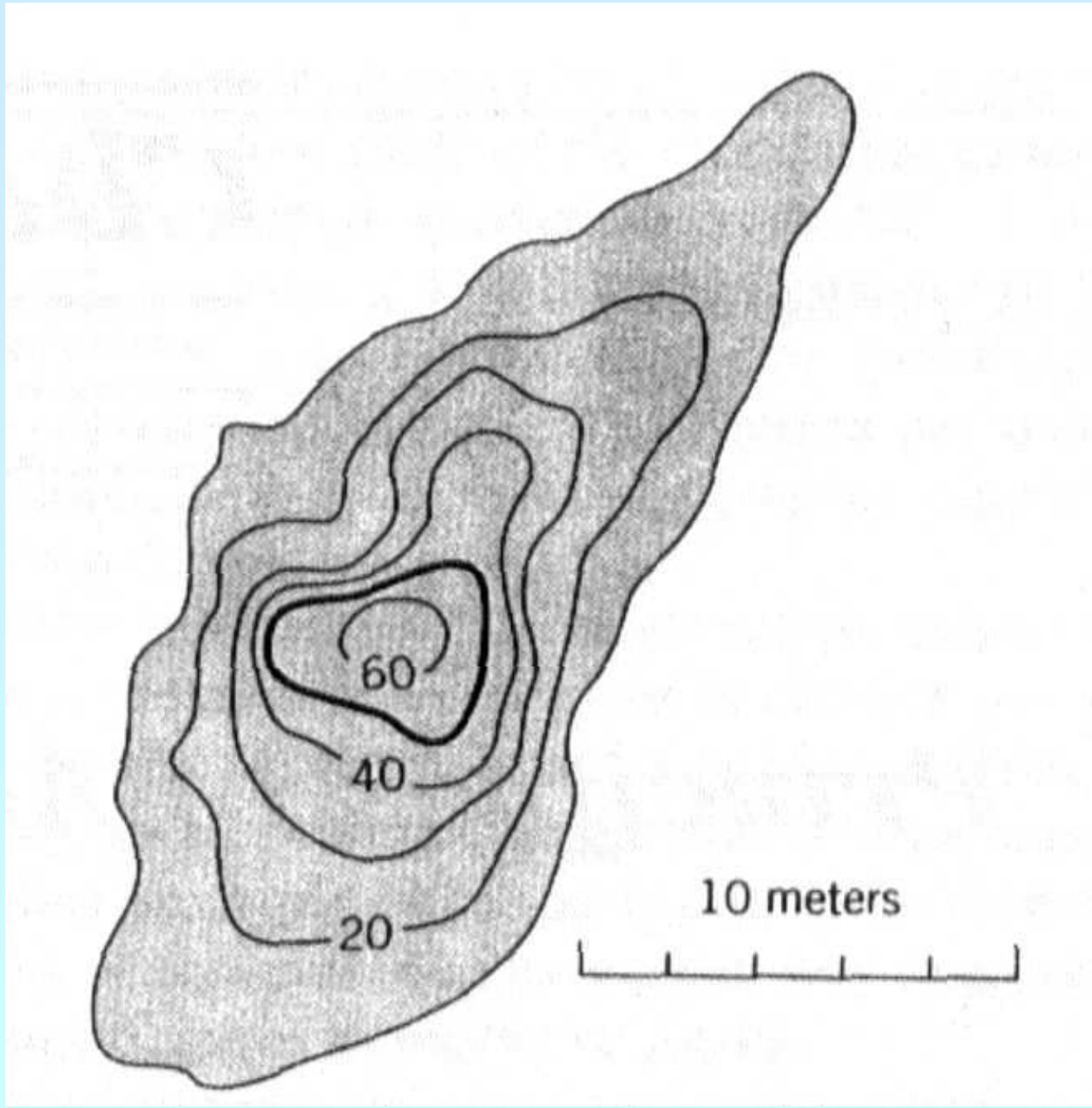


Projev longitudiální disperze v přírodních podmínkách ve zvodněném prostředí (Gelhar et al. 1985)

závislost disperzivity na vzdálenosti (délce a tím i času působení hydrodynamické disperze)
vedla k formulování obecného empirického vzorce

$$\alpha_L = 0,83(\log L)^{2,414}$$

pouze orientační použitelnost



TERÉNNÍ EXPERIMENTY

2. použití stopovacích látek injektovaných do vrtů – metoda jednoho vrtu

nejprve infiltrace roztoku se stopovací látkou do vrtu o známém průtoku a známé konstantní koncentraci a potom následovaná přiměřeně dlouhou infiltrací čisté vody, pak následuje čerpání vody z vrtu při stejném průtoku, rychlosti proudění vody při vtoku do zvodně a jejím následném odběru musí být mnohonásobně větší než přírodní rychlosti proudění ve zvodni

použité vrty – úzkoprofilové a bez obsypu, úplné s perforací přes celou mocnost zvodně

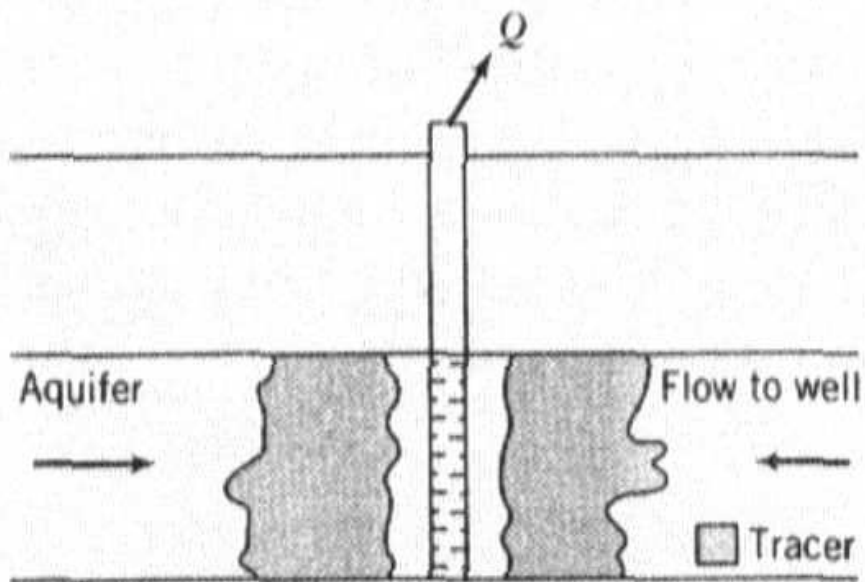
vhodné pro stanovení podélné disperzivity

nepřesnosti metody

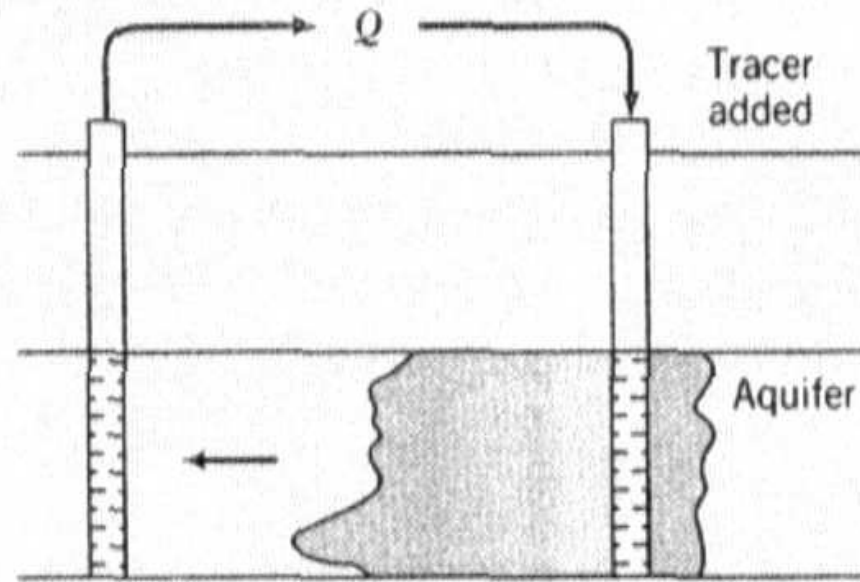
- výrazně vyšší rychlosti proudění než ve skutečnosti
- stanovení jen v malých vzdálenostech okolo vrtů

disperzivita je ovlivněna délkou (časem) působení

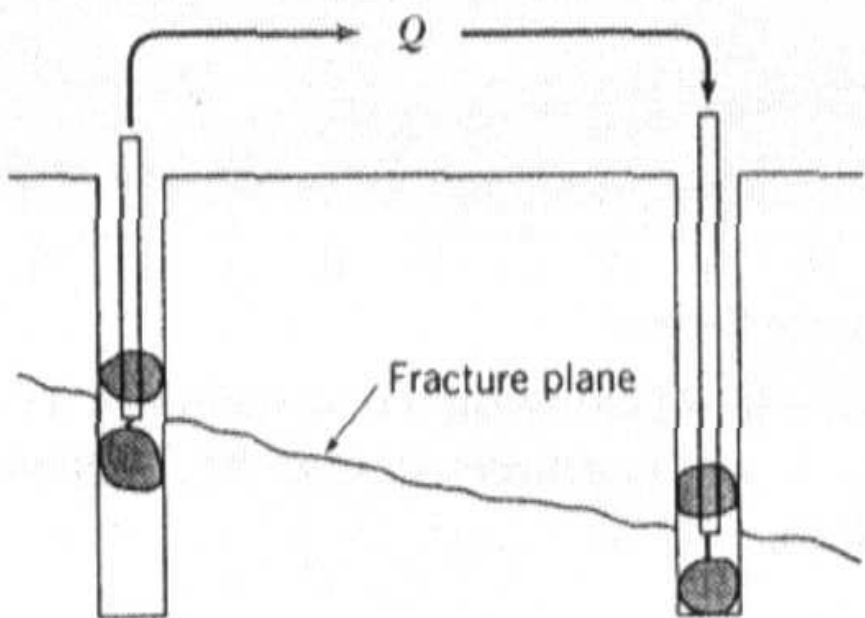
čím delší je vzdálenost, tím větší jsou výsledné hodnoty disperzivit



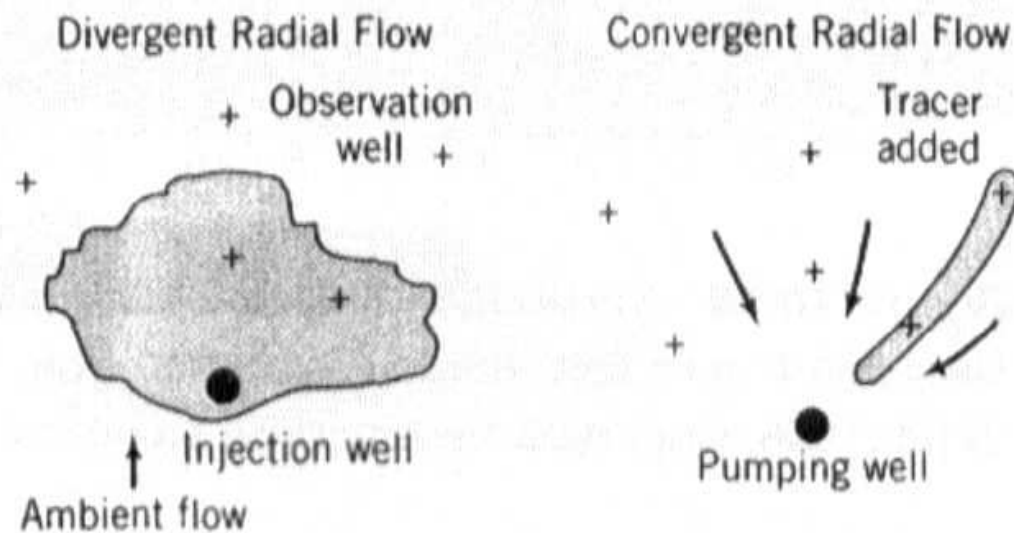
(a) Single-Well Pulse Test



(b) Two-Well Tracer Test



(c) Two-Well Tracer Test in Fractured Rock



(d) Single-Well with Multiple Observation Wells

použití vzorce pro analytické řešení

$$\frac{C}{C_o} = 0,5 \operatorname{erfc} \left(\frac{(U_p/U_i) - 1}{\left(\frac{16}{3} \left(\frac{\alpha_L}{R_f} \right) \left[2 - \left(1 - \frac{U_p}{U_i} \right)^{1/2} \right] \left[1 - \left(\frac{U_p}{U_i} \right) \right] \right)^{1/2}} \right)$$

U_p kumulativní objem odčerpané vody v jednotlivých časech

U_i celkový objem vody injektované do vrtu

R_f průměrná pozice fronty injektované vody na konci vsakování do zvodně

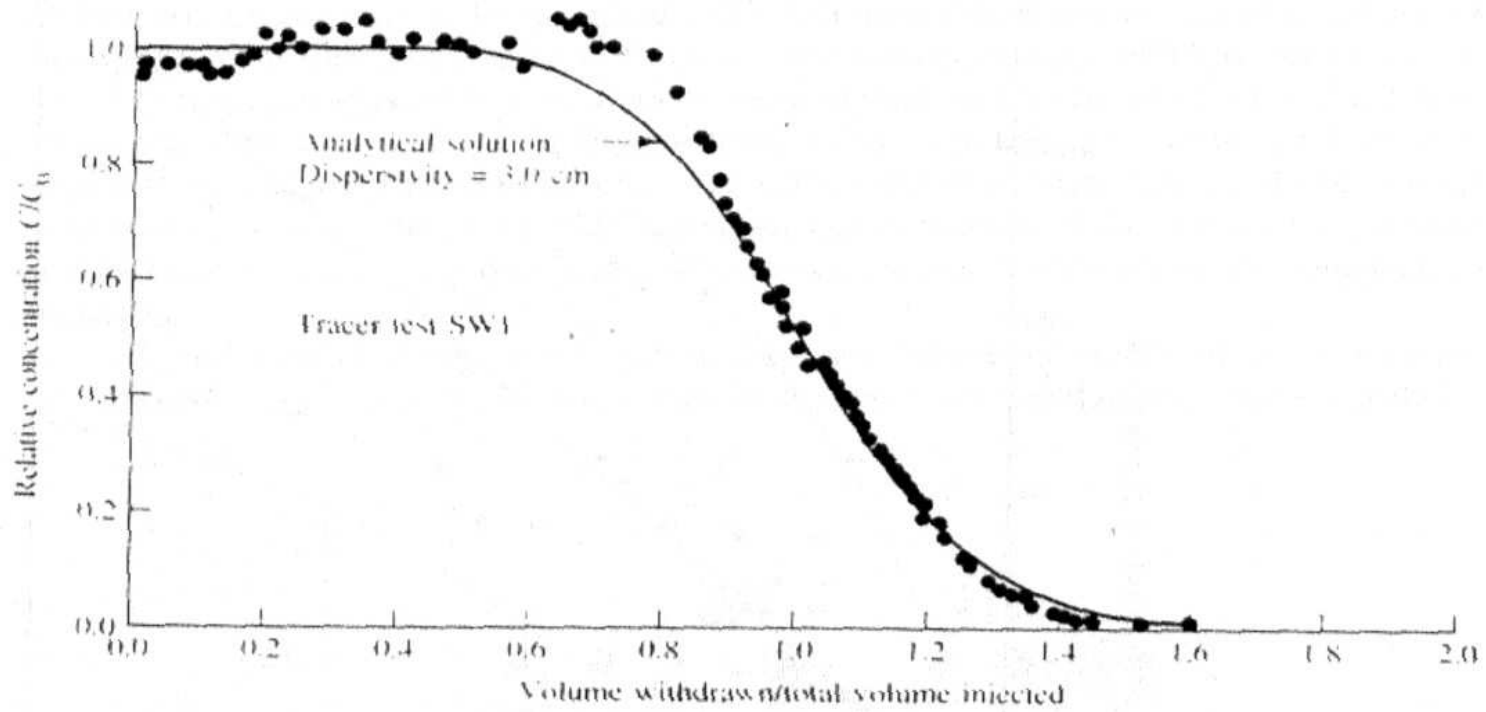
$$R_f = \left(\frac{Q \cdot t}{\pi \cdot b \cdot n} \right)^{1/2}$$

Q infiltrované množství (průtok)

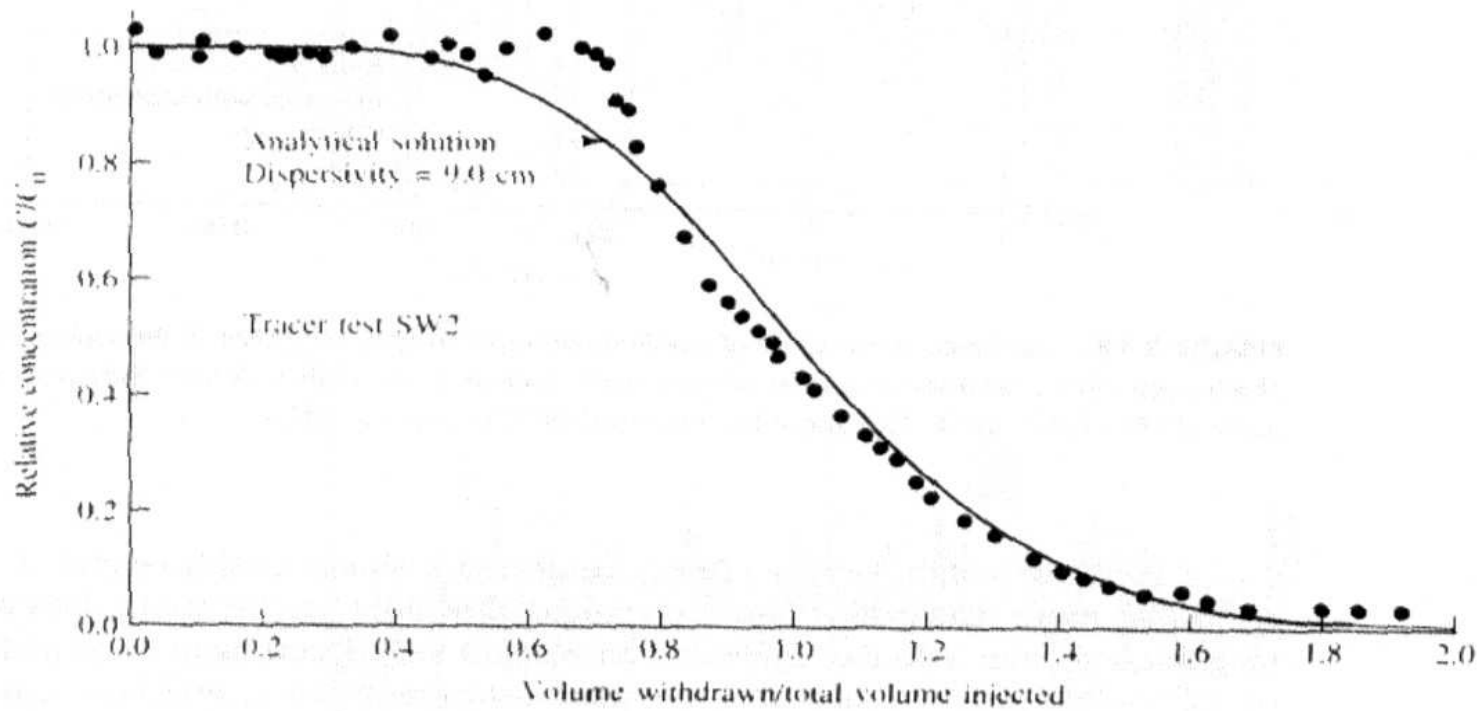
t celkový čas injektáže

b mocnost zvodně

n pórovitost



(a)



(b)

TERÉNNÍ EXPERIMENTY

3. použití stopovacích látek injektovaných do vrtů – metoda dvou vrtů

injektáž a čerpání stejného množství vody

použití 2 vrtů a vytvoření ustáleného proudění podzemní vody

nutný minimálně 1 pozorovací vrt (lépe několik)

metoda vhodná na vzdálenost několika stovek metrů v dobře propustných sedimentech

vhodné pro stanovení podélné disperzivity

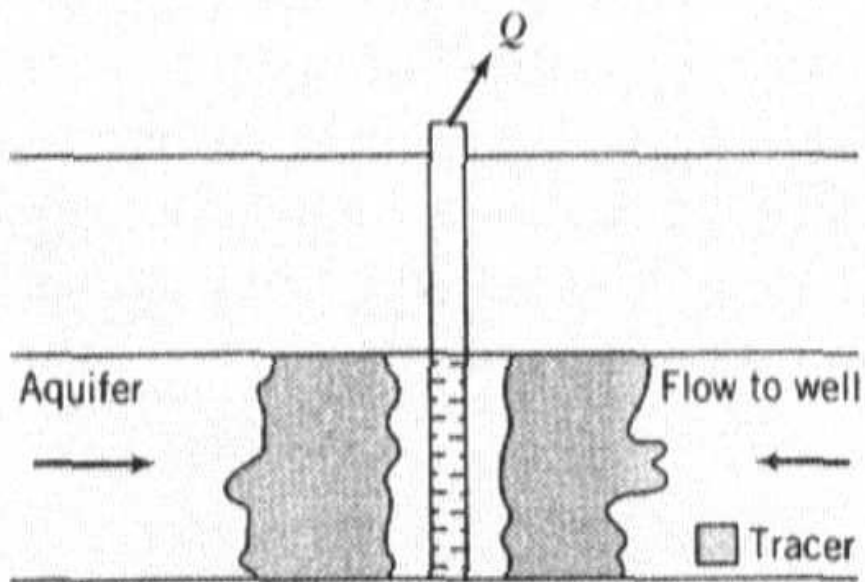
použití analytických rovnic řešení advekčně – disperzního transportu

nepřesnosti metody

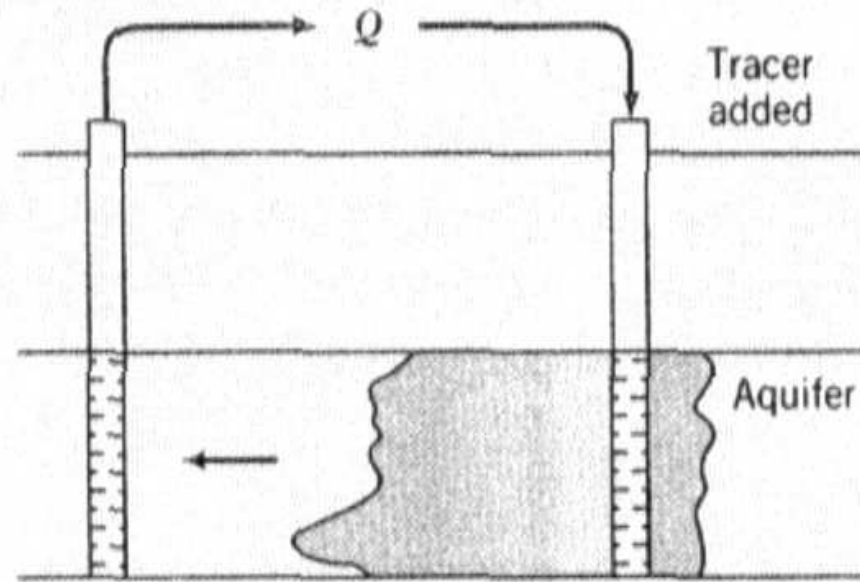
- mírně vyšší rychlosti proudění než ve skutečnosti
- stanovení jen v malých vzdálenostech okolo vrtů

disperzivita je ovlivněna délkou (časem) působení

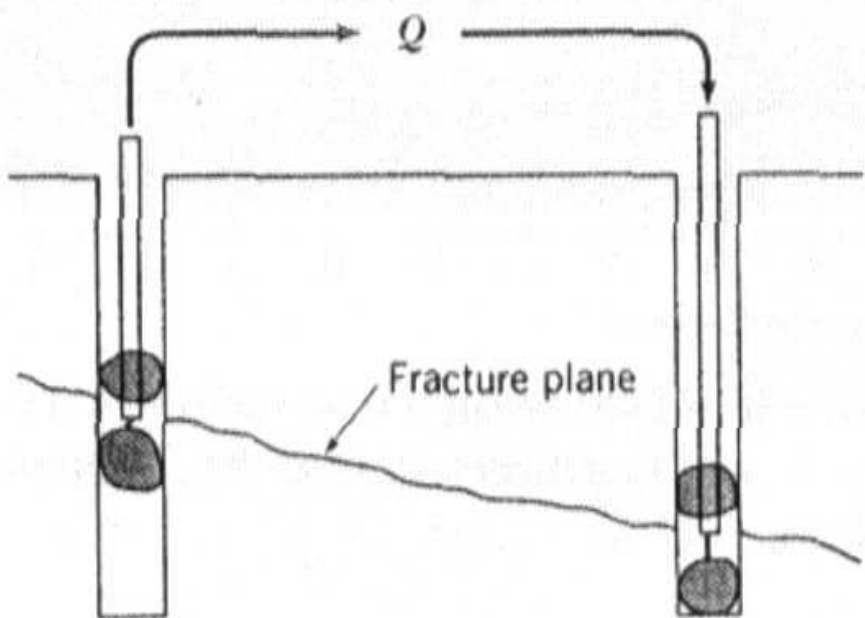
čím delší je vzdálenost, tím větší jsou výsledné hodnoty disperzivit



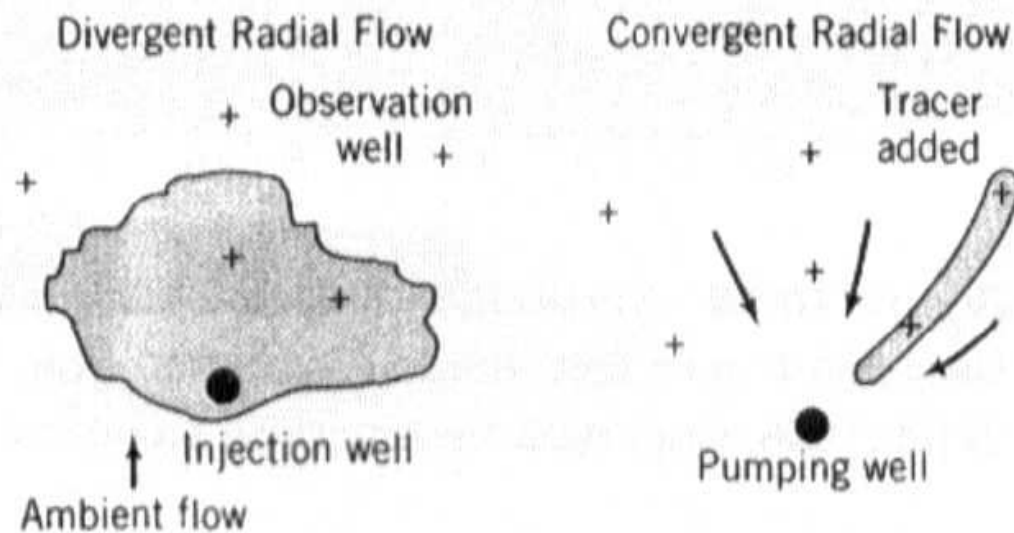
(a) Single-Well Pulse Test



(b) Two-Well Tracer Test



(c) Two-Well Tracer Test in Fractured Rock



(d) Single-Well with Multiple Observation Wells

STOCHASTICKÉ METODY

ZÁKLADNÍ PŘEDPOKLAD

hydrodynamická disperze je primárně důsledkem nehomogenity prostředí

pokud jsme schopni nehomogenitu prostředí statisticky definovat, jsme současně schopni určit hodnotu podélné disperzivity

ODHAD DISPERZIVITY NA ZÁKLADĚ KORELACE S HODNOTAMI HYDRAULICKÉ VODIVOSTI

určení tzv. asymptotické podélné disperzivity A_L

$$A_L = \frac{\sigma_y^2 \cdot \lambda}{\gamma^2}$$

σ^2 rozptyl logaritmicky
transformovaných hodnot
hydraulické vodivosti

λ korelační délka

γ faktor proudění (cca =1)

podélná asymptotická makrodisperzivita

$$A_L^* = A_L + \alpha_L + \cancel{\frac{D_d^*}{v}}$$

- uvažuje vliv pórové velikosti (mikrovliv)
- uvažuje vliv heterogenní struktury média (makrovliv)
- uvažuje vliv difúze

příčná asymptotická makrodisperzivita

$$A_T^* = \alpha_T + \cancel{\frac{D_d^*}{v}}$$

- příčná asymptotická disperzivita A_T je rovna nule – uvažuje, že heterogenita prostředí nevytváří příčnou disperzivitou

hodnota difuzivního členu je zpravidla velmi malá a zanedbává se

POSTUP

1. stanovení hodnot hydraulické vodivosti zvodněných hornin
 - nutný odběr několika desítek vzorků pro určení nehomogenity hornin
 - vzorky musí být odebírány v pravidelných intervalech vzdálenosti
 - odpadá nutnost stopovacích zkoušek

2. určení průměru a rozptylu logaritmicky transformovaných hodnot hydraulické vodivosti

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum Y_i$$

$$S_Y^2 = \frac{1}{n} \sum (Y_i - \bar{Y})^2$$

POSTUP

3. popis souboru dat pomocí autokovariance nebo autokorelace při určení kroku (odstupu mezi jednotlivými hodnotami), který charakterizuje soubor hodnot

- libovolný soubor dat je možné popsat pomocí autokovariance nebo autokorelace, kde krok je v podstatě nalezená konstanta udávající vzdálenost mezi dvěma hodnotami (separační interval)

- **autokovariační funkce** při hodnotě separačního intervalu

$$C_y(h) = \frac{1}{m} \sum (Y(y_i) - \bar{Y})(Y(y_i + h) - \bar{Y})$$

m počet párů hodnot
 h krok
(separační interval)

- získaná hodnota se podělí hodnotou rozptylu souboru a získáme **autokorelační funkci**

- nutné nalézt velikost kroku (vzdálenosti mezi hodnotami), která odpovídá **autokorelačnímu koeficientu 0,37**

- hodnoty kroku se mění tak dlouho, dokud není dosažena hodnota autokorelačního koeficientu 0,37