

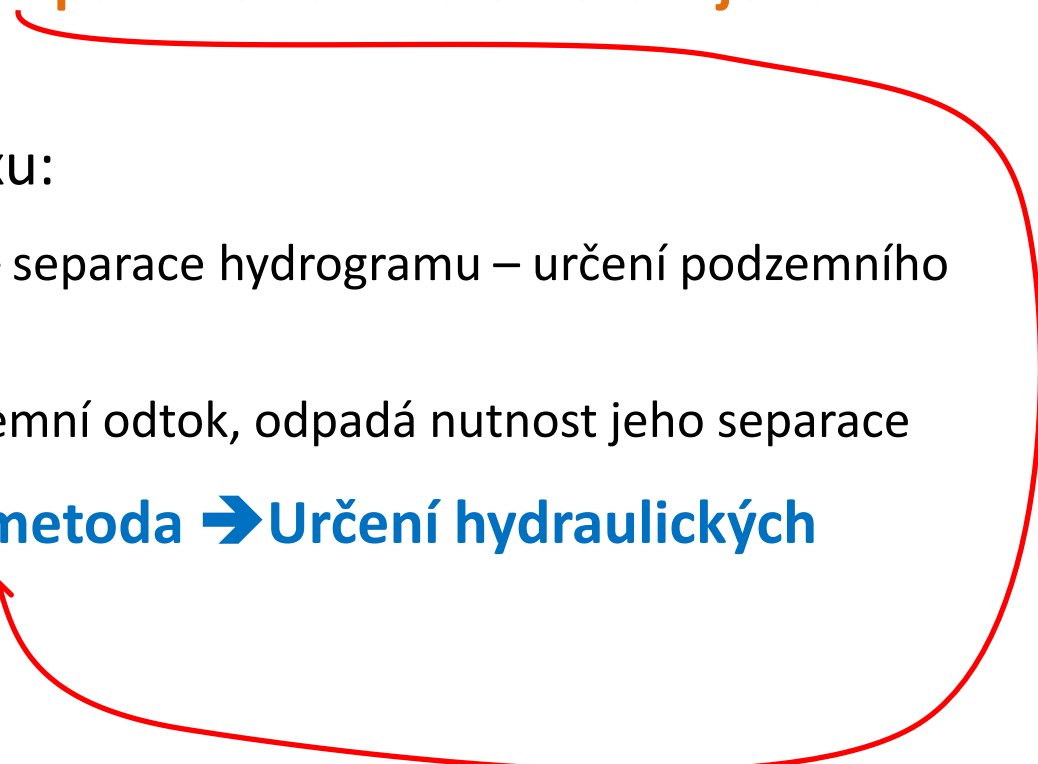
Metody hydrogeologického výzkumu V.

Analýza hydrogramu:

**Určení hydraulické vodivosti a
drenážní pórovitosti kolektoru**

Analýza hydrogramu

Analýza recesní (sestupné) části hydrogramu (záznam průtoků v čase) → Recesní index

- **odpovídá hydraulickým parametrům kolektoru a jeho geometrii**
 - **určení recesního indexu:**
 - *povrchové vodní toky* – separace hydrogramu – určení podzemního odtoku
 - *prameny* – 100% podzemní odtok, odpadá nutnost jeho separace
 - **Brutsaert-Nieberova metoda → Určení hydraulických parametrů kolektoru**
- 

Brutsaert-Nieberova metoda

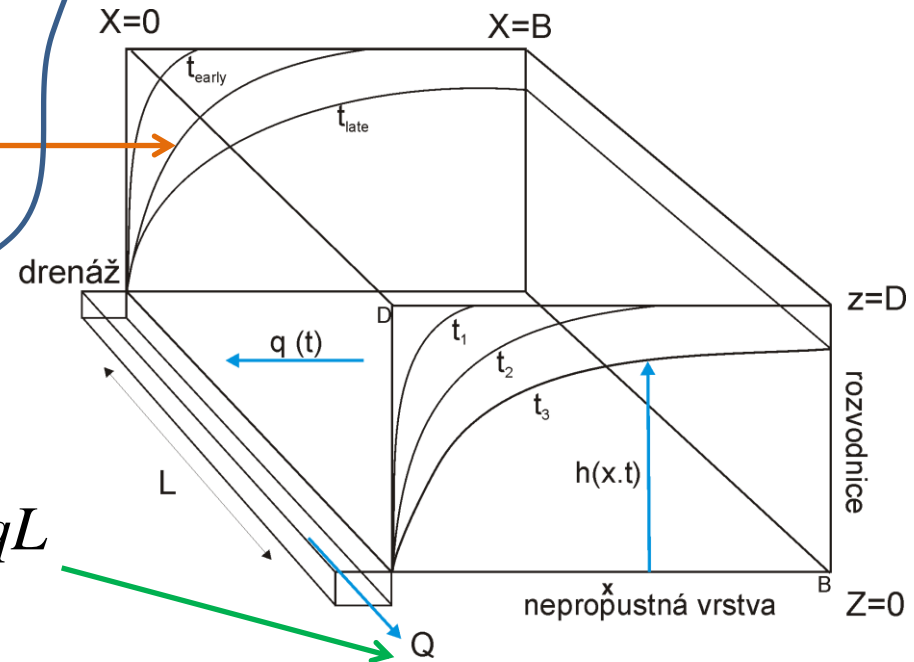
Joseph Boussinesq (1877)

Rovnice pro neustálený režim drenáže z počátečního zcela saturovaného stavu idealizovaného kolektoru (Dupuit-Forcheimerovy předpoklady platnosti rovnice)

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{k}{\varphi} \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right)$$

Polubarinova-Kochina (1962)

Proudění v polo-nekonečném kolektoru $X=\infty$, platnost pro část hydrogramu neovlivněnou okrajovou podmínkou, problém určení doby začátku recese



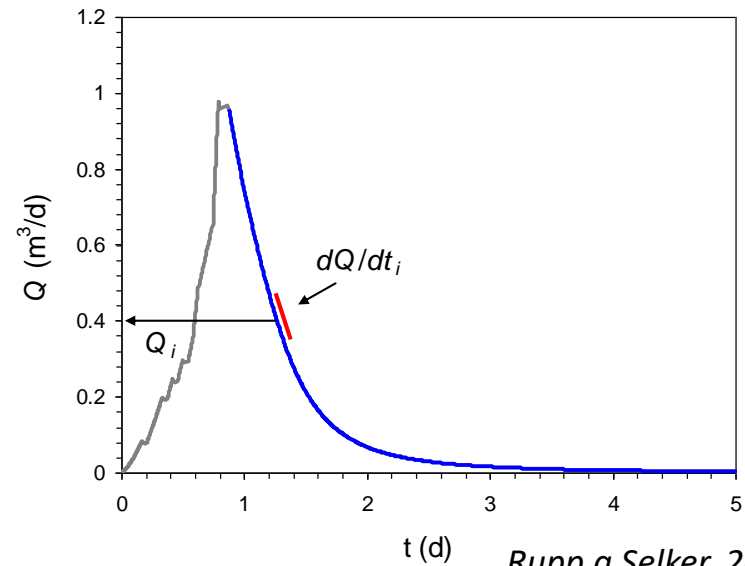
Brutsaert-Nieberova metoda

Brutsaert a Nieber (1977)

analýza sklonu hydrogramu (dQ/dt) jako funkce vyprazdňování struktury Q
→ *eliminace závislosti na čase*. Sклон sestupné větve hydrogramu jako funkce drenáže kolektoru

$$Q = f(t) \longrightarrow -\frac{dQ}{dt} = f(Q) \longrightarrow \boxed{\frac{dQ}{dt} = -aQ^b}$$

kde Q je odtok, t je čas, a a b jsou konstanty pro jednotlivé režimy recesního proudění



Brutsaert-Nieberova metoda

$$\frac{dQ}{dt} = -aQ^b$$

Zjednodušení analýzy pomocí **log transformace** rovnice, která se tak stává lineární

Graficky bylo potvrzeno, že nejvíce poklesů Q lze charakterizovat sklonem 1,5 a 3

→ to je v souladu s nelineárním Dupuit-Boussinesq modelem

Konstanta a – charakteristika rezervoáru podzemních vod

Exponent b jeho hodnota závisí na čase → dva časově odlišné režimy recese:

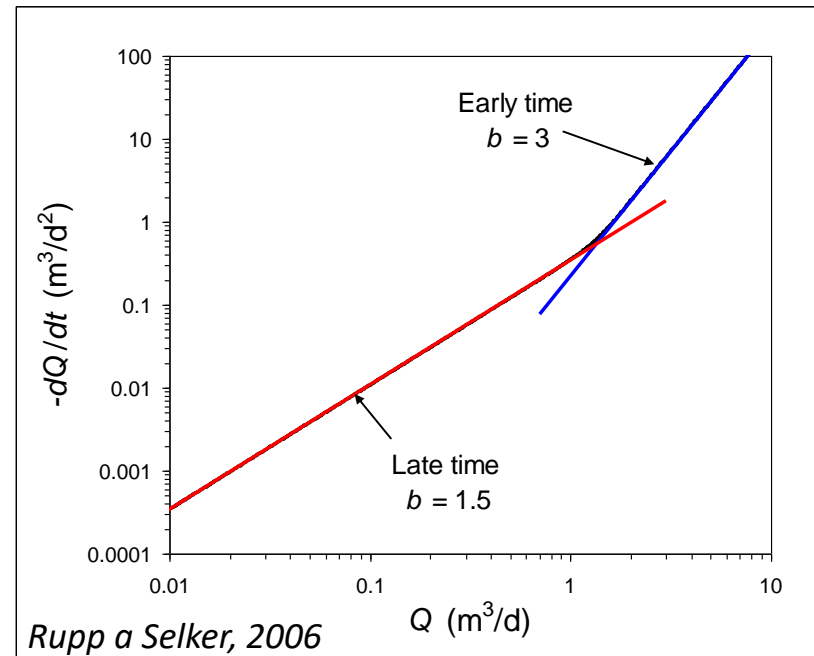
Časný režim – v krátkém čase vysoké průtoky, typická hodnota $b = 3$

$$\frac{-dQ}{dt} = a_e Q^3, \quad b_e = 3$$

Pozdní režim – nízké průtoky v čase, konstanta $b = 1,5$

$$\frac{-dQ}{dt} = a_l Q^{1,5}, \quad b_l = 1,5$$

$\log(dQ/dt)$ proti $\log(Q)$ tvoří dvě přímky s hodnotou konstanty $b = 3$ a $b = 1,5$



Brutsaert-Nieberova metoda

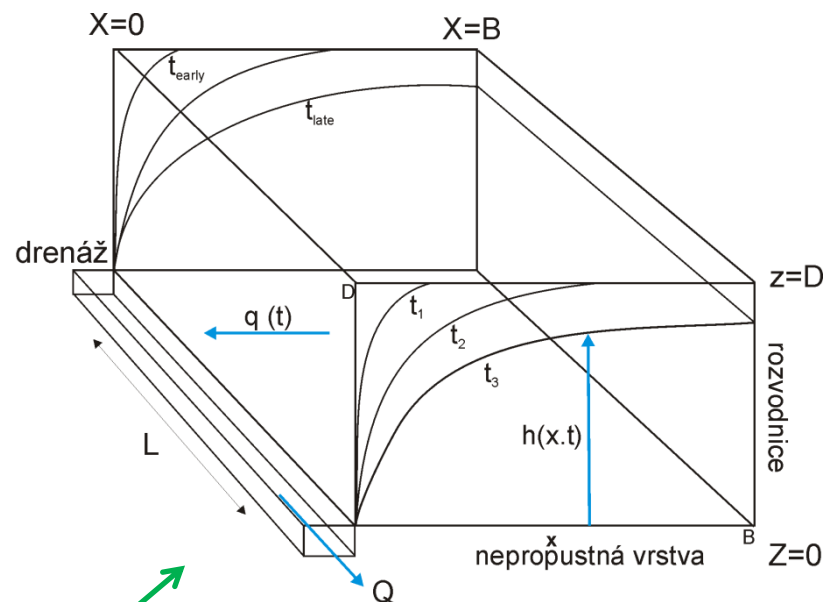
Výpočet hydraulické vodivosti a drenážní pórovitosti povodí:

Určení konstanty a_e pro časnou fázi recese podle Brutsaerta a Lopeze (1998):

$$a_e = \frac{1,133}{k\varphi D^3 L^2}, \quad b_e = 3$$

Určení konstanty a_l pro pozdní fázi recese podle Szilagyi a Parlange (1998):

$$a_l = \frac{4,804 k^{0,5} L}{\varphi A^{1,5}}, \quad b_l = 1,5$$



$$A = 2BL$$

Brutsaert-Nieberova metoda

Určení konstanty **a**

- omezení subjektivity prokládání recesních dat – zahrnutí všech měření a proložením pomocí „envelope line“ (obalové linie)
- obalové linie se prokládají podél spodních okrajů shluku dat – nejnižší recesní rychlost pro dané Q - tedy předpoklad podzemního odtoku bez vlivu povrchového či hypodermického odtoku

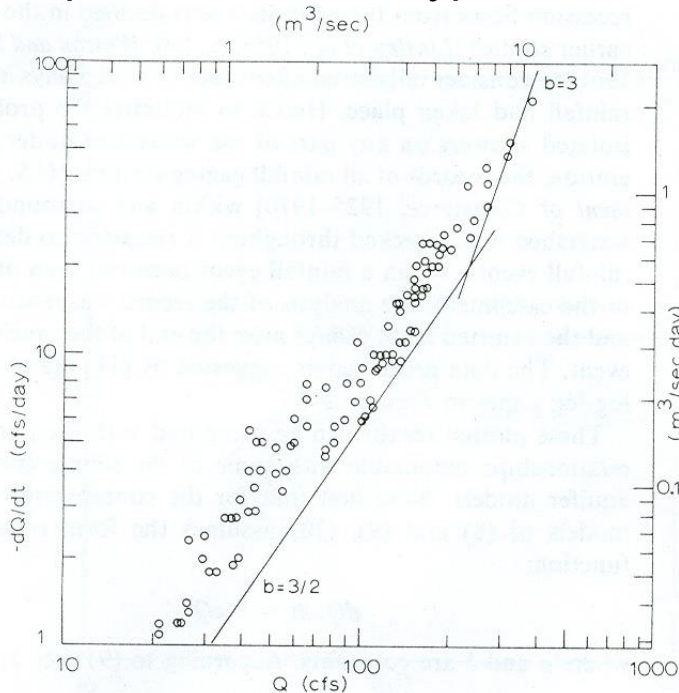


Fig. 2. Plot of $-dQ/dt$ versus Q data for Fall Creek and the lower envelopes according to (12).

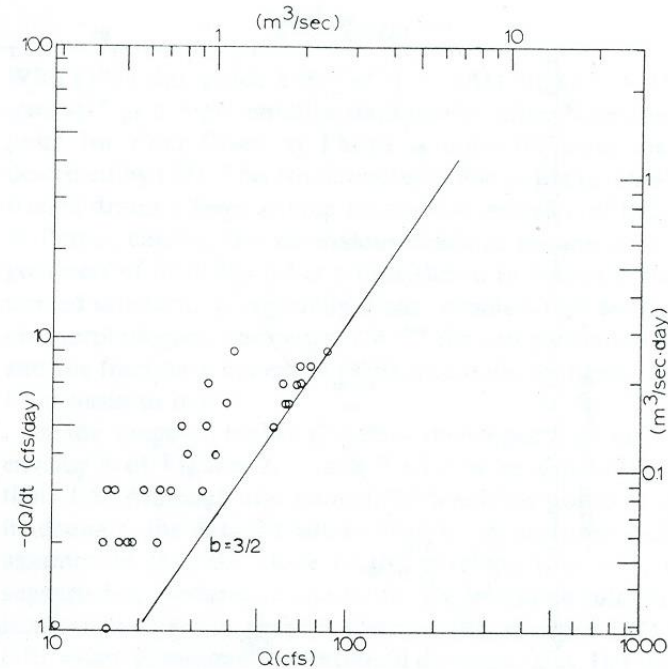


Fig. 4. Same as Figure 2 but for Salmon Creek.

Praktická aplikace metody

Vynesení do grafu změny průtoku v čase:

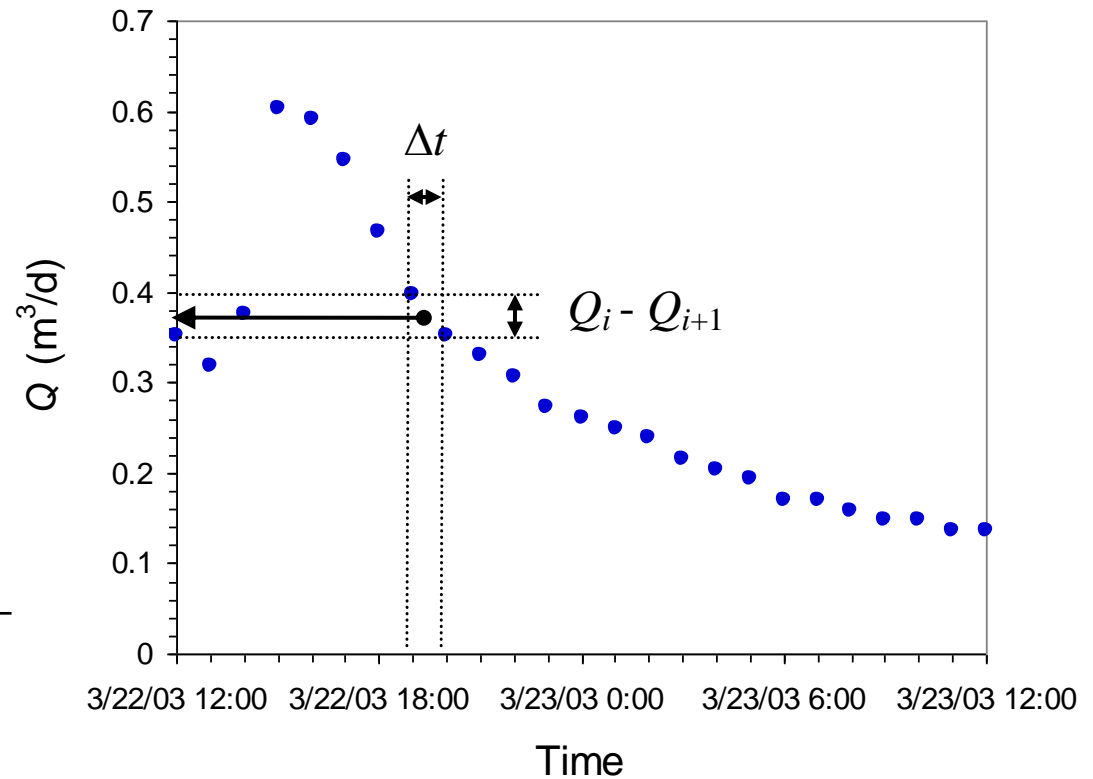
$$-\frac{dQ}{dt} = f(Q)$$

↓

$$-\frac{dQ}{dt} \approx \frac{Q_i - Q_{i+1}}{\Delta t}$$

↓

$$Q \approx \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2}$$

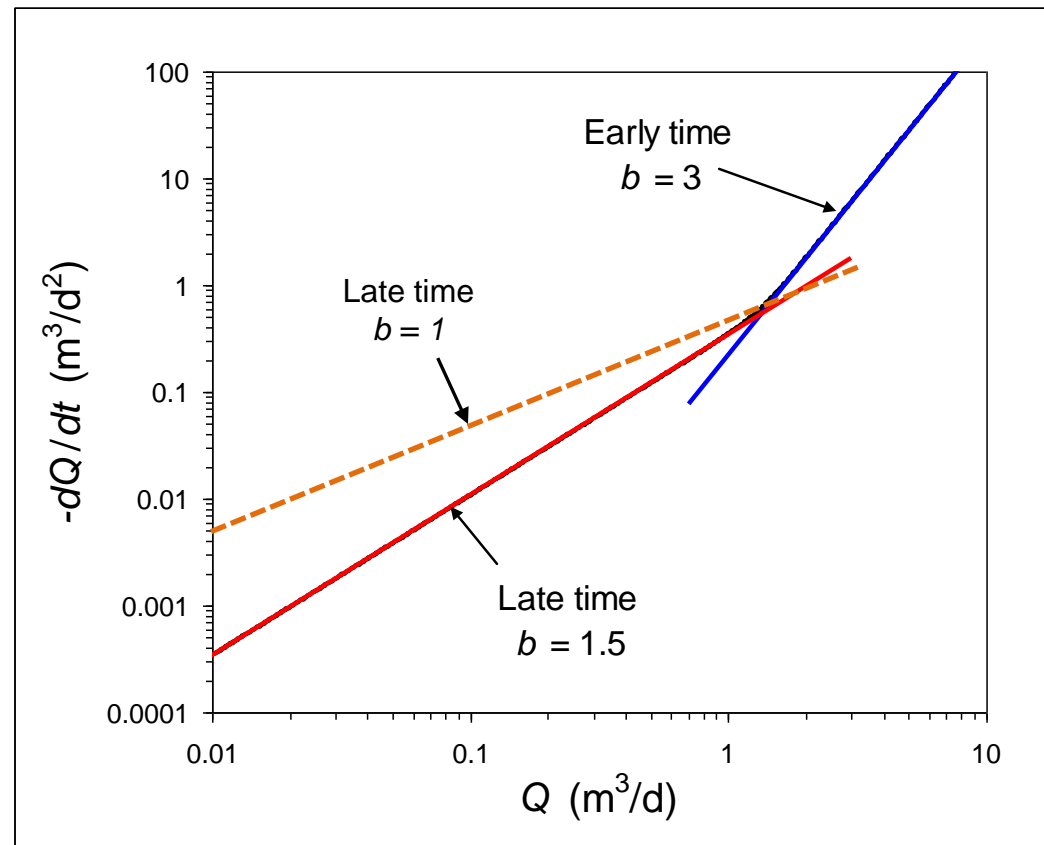


Praktická aplikace metody

- vynesení do grafu jako $\log(-dQ/dt)$ vs. $\log(Q)$
- proložení časnou a pozdní fází recese „obalovými liniemi“
- ověření souběžnosti přímek s danou konstantou b k vynesným datům

Za určitých podmínek odpovídá vývoj recese linearizované podobě Bousinessqovy rovnice - hodnota exponentu **$b = 1$** :

- je to obvykle u kolektoru, kde je pokles hladiny na odtokové hranici mnohem menší než počáteční saturovaná mocnost zvodně
- výskyt rovněž u ukloněných zvodních



Praktická aplikace metody

Výpočet hydraulické vodivosti z časně fáze recese

určení konstanty a z hydrogramu je-li $b = 3$

$$a_e = \frac{dQ}{dt} / Q^3, \quad b_e = 3$$



$$a_e = \frac{1,133}{k\varphi D^3 L^2}$$



výpočet k

$$k = \frac{1,133}{a_e \varphi D^3 L^2}$$

Výpočet hydraulické vodivosti z pozdní fáze recese

určení konstanty a z hydrogramu je-li $b = 1,5$

$$a_l = \frac{dQ}{dt} / Q^{1,5}, \quad b_e = 1,5$$



$$a_l = \frac{4,804k^{0,5}L}{\varphi A^{1,5}}$$



výpočet k

$$k^{0,5} = \frac{a_l \varphi A^{1,5}}{4,804L}$$

určení konstanty a z hydrogramu je-li $b = 1$

$$a_l = \frac{dQ}{dt} / Q^1, \quad b_e = 1$$



$$a_l = \frac{0,35\pi^2 k D L^2}{\varphi A^2}$$



výpočet k

$$k = \frac{a_l \varphi A^2}{0,35\pi^2 D L^2}$$

Praktická aplikace metody

Výpočet hydraulické vodivosti ze sestupné větve kolektoru s hodnotou exponentu b pro pozdní fázi = 1

Pokud lze pozdní fázi sestupné větve hydrogramu charakterizovat hodnotou exponentu $b = 1$, je možné určit hydraulickou vodivost (k) i drenážní pórovitost (S_y) nezávisle na sobě 😊:

- k tomu je využito určení konstant a_{early} pro $b = 3$, a_{late} pro $b = 1$
- dále je nutné odhadnout podíl mocnosti kolektoru v místě drenáže k maximální saturevané mocnosti kolektoru p
- parametr p odráží průměrnou mocnost saturevané zóny, kde lze obvykle použít hodnotu $p = 0,35$ pro $D_c \ll D$ (D_c je mocnost saturevané zóny pod drenáží a D v místě rozvodnice)

$$p \cong (D + D_c) / (2D)$$

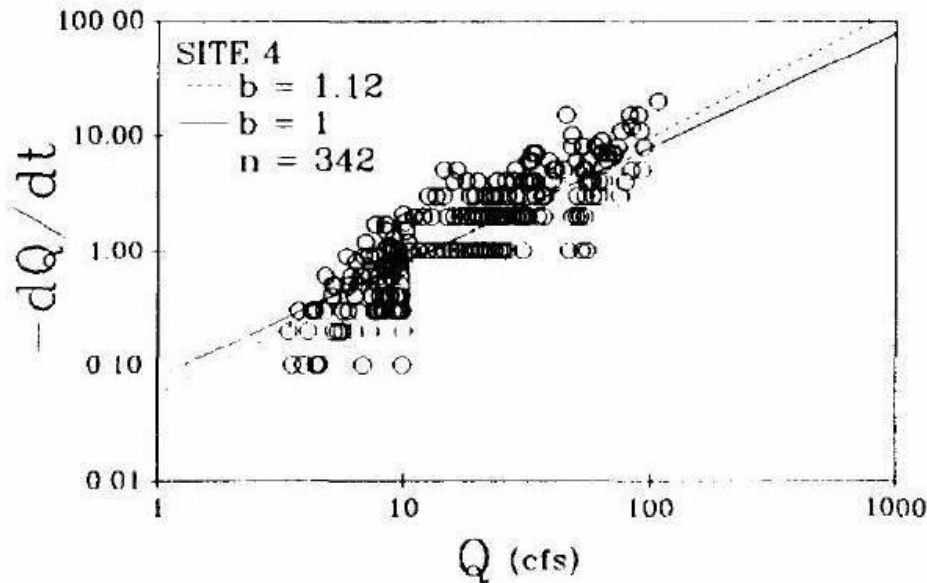
$$k = \frac{1,1336}{\pi \sqrt{p}} \sqrt{\frac{a_3}{a_1}} \frac{A}{(LD)^2}$$

$$S_y = \pi \frac{\sqrt{1,1336p}}{\sqrt{a_3 a_1}} \frac{1}{DA}$$

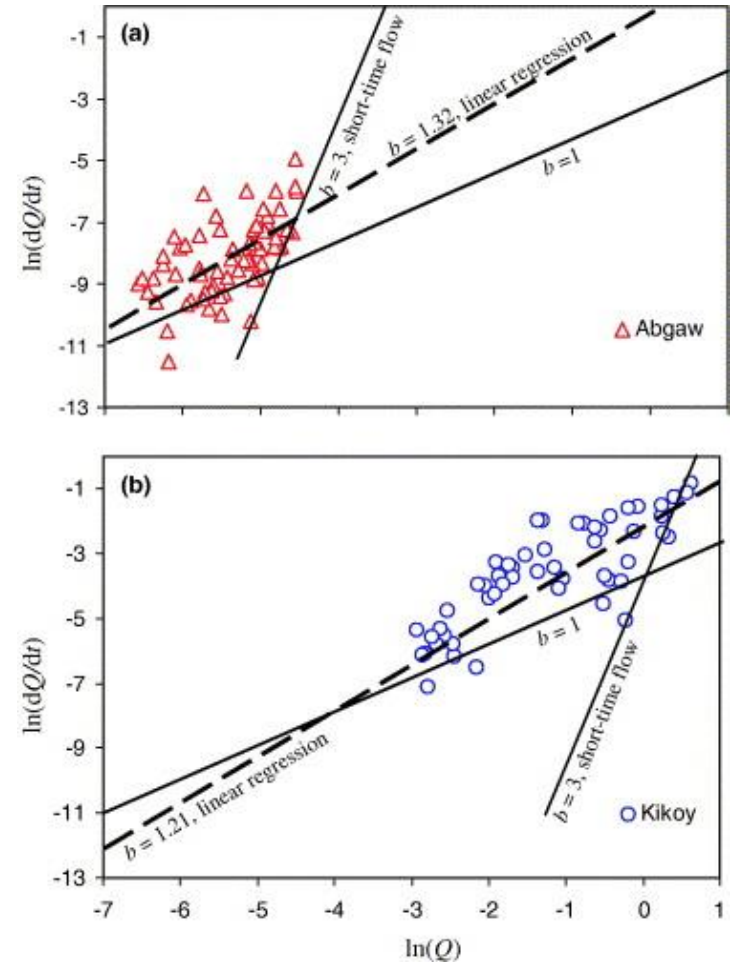
Odchyly hodnot parametru b

Odchyly vynesných hodnot od přímek určených hodnotou parametru b pro časnou fázi ($b = 3$) a pozdní fázi ($b = 1,5$) recese hydrogramu:

- způsob vynášení dat: volba kroku dQ a dT
- heterogenita horninového prostředí
- sklon zvodně



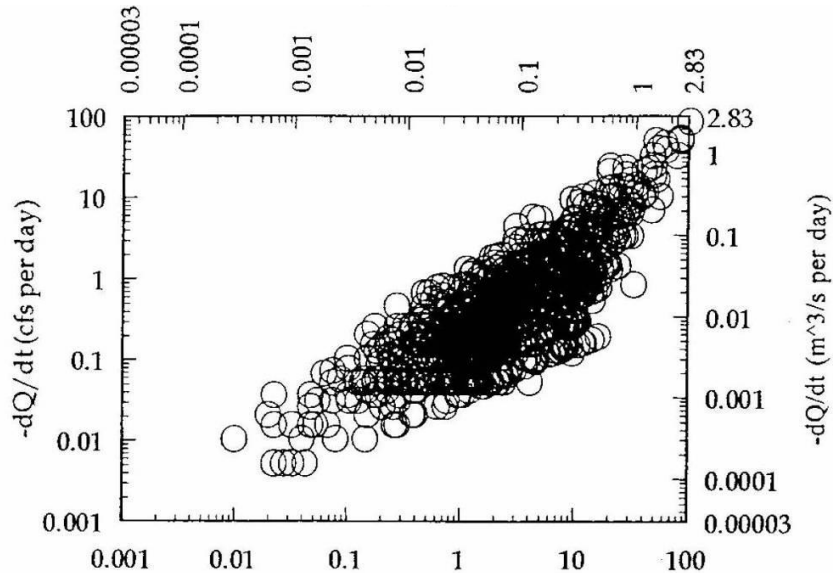
(Vogel and Kroll, *Water Resour. Res.*, 1992)



(Malvicini et al., *Adv. Water Resour.*, 2005)

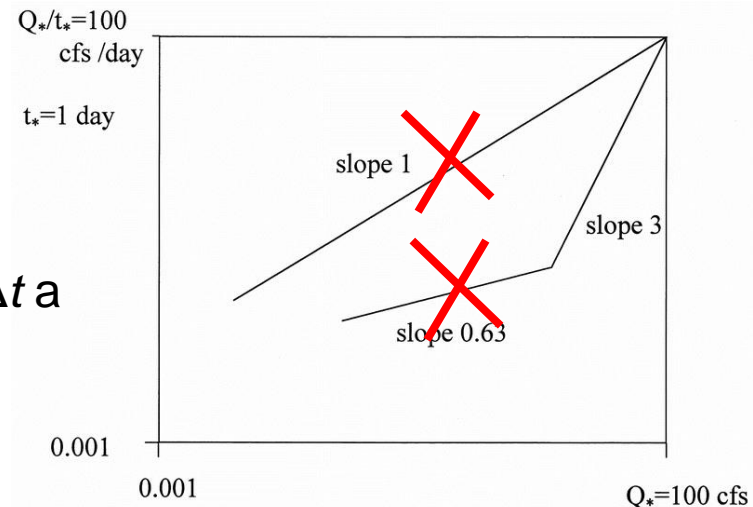
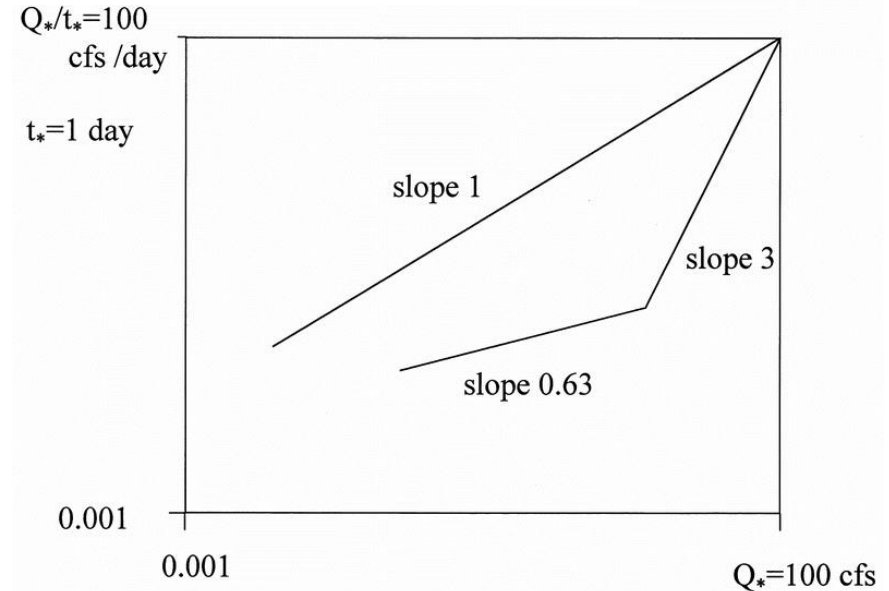
Odchyly hodnot parametru b

Ověření vlivu Δt aj. parametrů na výsledný exponent b



(Rupp and Selker, *Advances in Water Resources*, 2005)

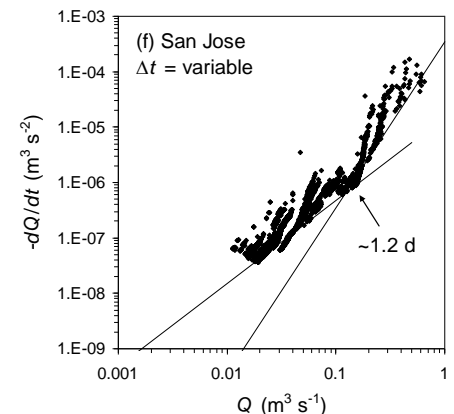
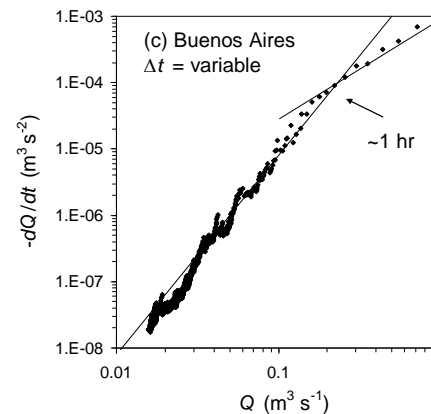
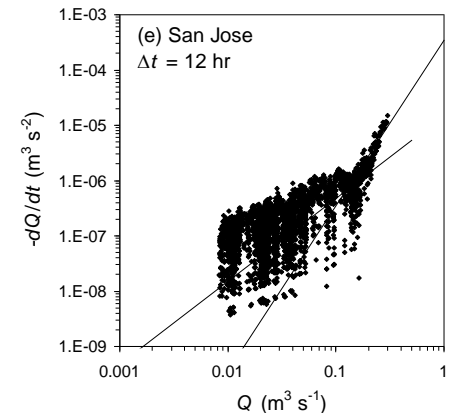
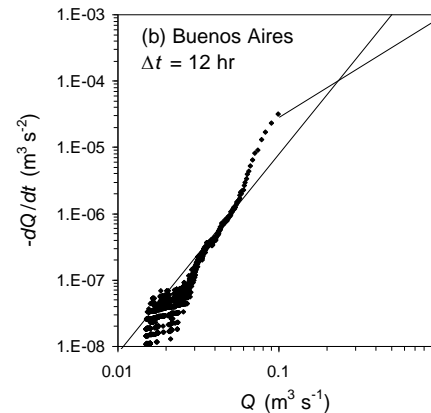
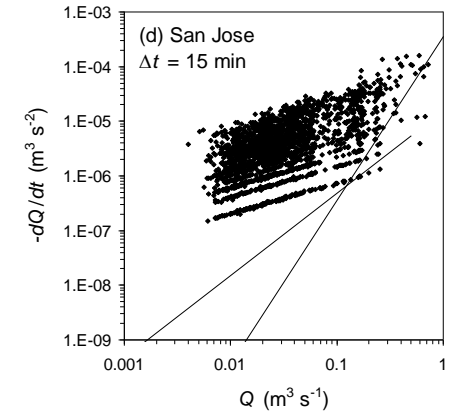
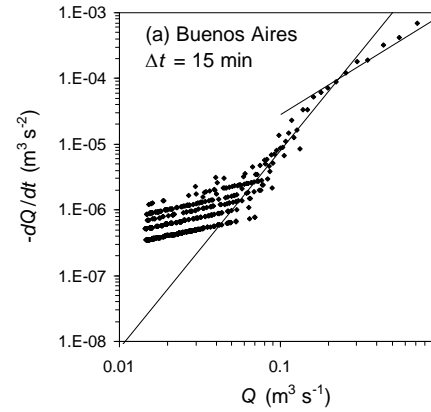
1. svrchní proložení ($b = 1$) je funkcí konstantního Δt
2. spodní proložení ($b = 0.63$) je funkcí Δt a přesností měření průtoků



Odchyly hodnot parametru b

- nevhodně zvoleným časovým intervalem mezi jednotlivými změnami průtoku dt při recesi
- Rupp a Selker (2005) doporučují při volbě dt zohlednit míru změny průtoku a v případě neshody s analyticky stanovenými konstantami b nepoužívat konstantní dt , ale zvolit *proměnlivý* dt na základě intenzity změn průtoku a preciznosti měření
- volba dt by podle Szilagyi a Parlange (1998) v principu neměla ovlivnit výsledek, přesto zvolení příliš malého časového intervalu může zdůraznit chyby způsobené nepřesnostmi v měření průtoků a naopak příliš velké intervaly mohou skrýt různé procesy přispívající k průtoku jako je povrchový odtok apod.
- odklon od konstanty b může být dále způsoben daty, která patří do jiného odtokového režimu (Mendoza et al. 2003)

Alternativní odhad sklonu hydrogramu



Odchytky hodnot parametru b

Vliv zvolení dQ

- preferovat ty části sestupné větve hydrogramu ovlivněné jen minimálně průběžnými srážkovými událostmi (odseparování krátkodobě rostoucích či stagnujících hodnot Q během hlavní recesní etapy)
- vynášet jen významnější hodnoty $-dQ/dt$, eliminace vlivu povrchového odtoku a průběžných dešťových srážek či při malých rozdílech dQ chyby měření průtoku
- hodnoty dQ/dt mohou být ovlivněny mírou předchozí saturace struktury, je tedy vhodné pro stanovení konstanty a vynést do grafu hodnoty $(dQ/dt)/Q$ z více recesních událostí

Použitelnost Brutsaert-Nieberovy metody

Nevýhody

- nutnost zjednodušení geometrie kolektoru a odhad jednoho z parametrů (k nebo φ), v případě hodnoty parametru $b = 1$ u pozdní fáze recese pak nutnost odhadu parametru p .
- omezení platnosti metody u ukloněných kolektorů a kolektorů s rychlým poklesem saturované mocnosti

Výhody

- určení hydraulické vodivosti v případě absence či nedostatku hydrogeologických vrtů (hydrodynamických zkoušek)
- charakter výsledné hydraulické vodivosti → průměrná hodnota celého sledovaného úseku povodí (kolektoru) → vhodné pro studie regionálního charakteru