

Metody hydrogeologického výzkumu

I.



**Základem práce hydrogeologa
je získání správných údajů
o kvalitativních a kvantitativních
vlastnostech
podzemních vod**



HISTORIE

Vitruvius (1. stol. př. n. l.)

- 10 knih o architektuře – popis vyhledávání míst pro hloubení studní (výstup vodních par, rosa, geobotanické metody, apod.)
- popis kvality podzemní vody – odparek + obyvatelé (sulfidická ložiska)
- popis stavebních prací – chorobates – nivelace akvaduktů

Evropa – vývoj myšlení až v renesanci – Alberti - identické přístroje

Egypt - niloměry

- první značky na Nilu – 3000 – 5000 př.n.l.
- schodiště
- místnosti se sloupy propojené šachtami s Nilem (Rodah – 640 – 1890 n.l.)

staré Řecko – popisy meteorologických jevů bez jejich kvantifikace

Indie – první dokumentované měření srážek – Kautilius – vyměření daní a setí obilovin

Palestina - celoroční měření srážek – dělení na období roku

Korea – moderní „dešťoměr“ – 1441

Leonardo da Vinci – měření průtoků, stopovací zkoušky pomocí barviv – nenapsal spis, jen poznámky

17. stol – **Castelli** – O měření vod tekoucích – kyvadla, váhy, lopatkové kolo

Halley *17. stol* – bilance vod na Zemi – velký hydrologický cyklus

1716 – měření hladin na povrchových tocích a v přístavech – Něva (P.P. pevnost)

následuje Labe, Temže, apod.

1790 – Voltmanova hydrometrická vrtule

1831 – patent zapisovacího hladinoměru – Temže

METROLOGIE

- obecné zásady měření
- definuje měrné jednotky
- zabezpečuje etalonová měřidla nejvyšších řádů
- národní ústavy
- sestavení metrologických řádů a jejich kontrola
- podnikové etalony, kontrolní provozní měřidla

VLASTNOSTI PŘÍSTROJŮ

- indikační – udávají okamžitou hodnotu
- registrační – zaznamenávají časové změny měřené veličiny

PŘESNOST MEŘÍCÍHO PŘÍSTROJE

- schopnost měřidla stanovit údaje blízké pravé hodnotě měřené veličiny
- *pravá hodnota* - dokonale definovaná za daných podmínek – v praxi nezměřitelná
- pojem *konvenčně pravá hodnota* – hodnota blízká se pravé hodnotě měřené veličiny tak, že pro daný účel lze rozdíl mezi pravou a konvenčně pravou veličinou zanedbat

kontrola přesnosti

vždy měřidlem s přesností o řád vyšší

(např. přesnost ± 1 cm měřidlem s přesností $\pm 0,1$ cm)

Chyba měření

- rozdíl mezi naměřenou a konvenčně pravou hodnotou měřené veličiny Y
- absolutní chyba – v jednotkách
- relativní chyba – poměr absolutní chyby a konvenčně pravé hodnoty – v %

Třídy přesnosti přístrojů

nejčastěji se vyjadřuje nejvyšší dovolenou chybou přístroje

Citlivost přístroje

- pro danou hodnotu je určena přírůstkem proměnné veličiny a příslušným přírůstkem měřené veličiny
- stupnice – podíl délky dílku stupnice a jeho hodnoty
- digitální přístroje – změna hodnoty vyvolávající změny nejmenšího digitu

Rozlišovací schopnost (práh citlivosti, práh pohyblivosti)

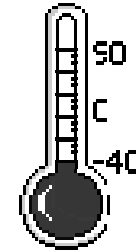
nejmenší změna měřené veličiny, která vyvolá zjistitelnou změnu údaje na přístroji

Spolehlivost přístroje

- schopnost udávat za stanovených podmínek měřenou hodnotu v požadovaných mezích přesnosti
- požaduje se max. 2,7 %

Rozpětí přístroje

rozmezí měřené veličiny,
které je schopen přístroj zaznamenat a zobrazit



Provozní podmínky

- rozmezí přírodních podmínek které ovlivňují měření dané veličiny, za kterých je přístroj schopen udávat měřenou hodnotu s požadovanou přesností
- často – přesnost měření rozdělena podle podmínek

Životnost přístroje

- charakterizuje spolehlivost přístroje
- pravděpodobnost správné činnosti a bezporuchovosti přístroje

CHYBY MĚŘENÍ

Chyby nahodilé

- jejich hodnota i znaménko se při velkém počtu měření téže hodnoty dané veličiny za prakticky stejných podmínek mění nepředvídaným způsobem
- lze je eliminovat pouze statistickým vyhodnocením souboru měření po skončení měření
- zpravidla – konvenčně pravá hodnota je aritmetický průměr
- typicky Gaussovo rozdělení měřených hodnot (rozptyl, kvadratická odchylka, ...)

Chyby systematické

- za týž podmínek mají stejné absolutní hodnoty i znaménko, případně se mohou měnit podle určitého zákona
- způsobená měřidlem nebo prostředím
- je možné je odstranit kontrolním měřením a cejchováním (s měřidly vyššího řádu nebo etalony)
- např. elektrochemie (pH), chyby plovákových hladinoměřů jednorázově kontrolované elektrokontaktními (i se stejnou třídou přesnosti)

Chyby hrubé

- chyby které přesahují rozmezí nahodilých chyb
- jsou způsobeny nesprávným měřením (omylem, záměnou rozsahu, apod.)
- zjištění chyby logickým zhodnocením souboru nebo kontrolním měřením
- nejlépe vyloučení měření ze souboru, případně použití opravené hodnoty

Možné případy použití statistického vyhodnocení měřených dat a vyloučení chybných měření

- čerpací zkoušky
- měření hladin na dlouhodobě exploatovaných objektech
- měření průtoků na dlouhodobě exploatovaných objektech
- dlouhodobé sledování koncentrací ukazatelů v případě použití stejné metodiky vzorkování
- atd.

MĚŘENÍ HLADIN PODZEMNÍCH A POVRCHOVÝCH VOD

Rozdělení hladinoměrů podle způsobů měření

Hladinoměry pro jednorázová měření

Hladinoměry indikační bez dálkového přenosu údajů

Hladinoměry indikační s dálkovým přenosem

Hladinoměry registrační bez dálkového přenosu údajů

Hladinoměry registrační s dálkovým přenosem

Rozdělení hladinoměrů podle druhu čidla

Hladinoměry plovákové

Hladinoměry akustické

Hladinoměry manometrické

Hladinoměry elektrokontaktní

Hladinoměry kapacitní

Hladinoměry pneumatické

Hladinoměry bezdotekové

Akustické

- při kontaktu s hladinou vydávají zvuk
- Rangova píšťala
- jen jednorázová měření

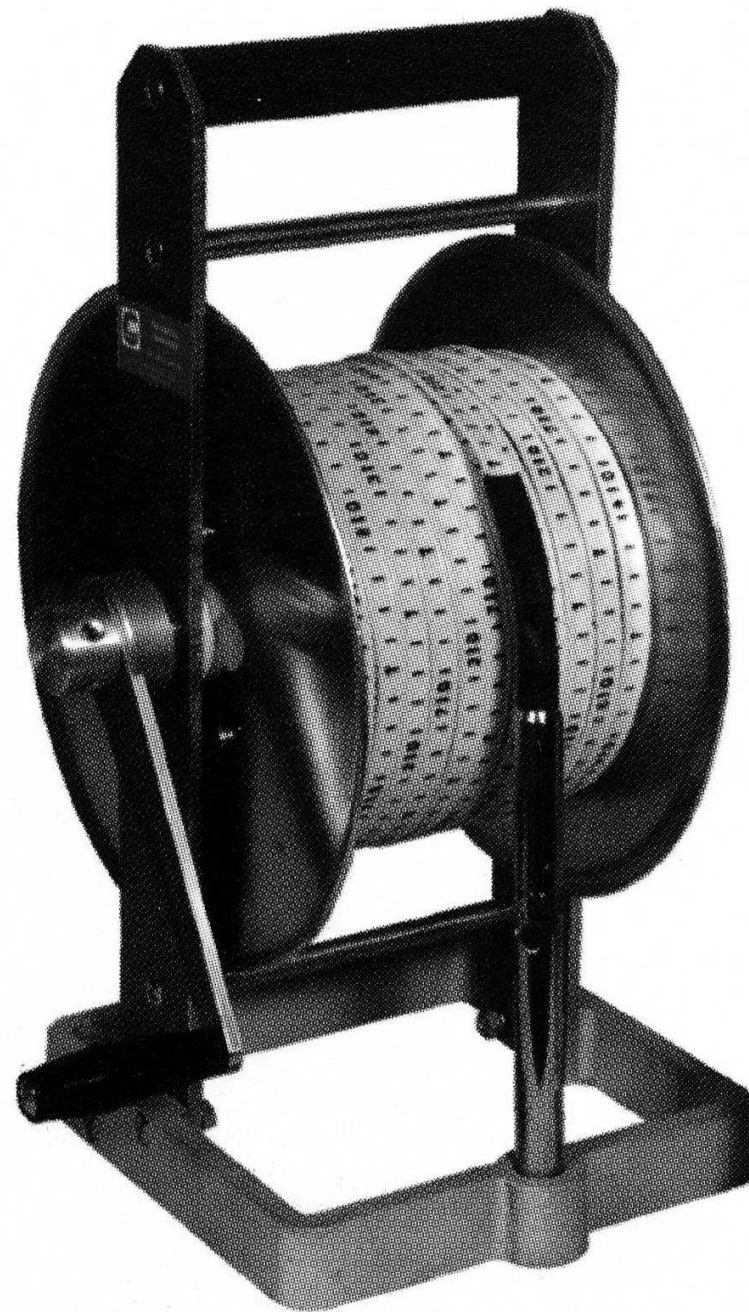
Elektrokontaktní

- dotyk s hladinou vytvoří v elektrodách vodivé spojení
- minimálně cca 80 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- jednorázová měření - nejlevnější při dostatečné přesnosti (i kontrolní měření)
- průběžná měření - posun čidla zajišťuje elektromotor
 - čidlo sleduje hladinu v rozmezí dvou kontaktů (cca 2 cm)
 - čidlo se pohybuje z výchozího bodu k hladině a zpět



výrobce – Geospol Uhřínov

délky pásma od 20 do 700 metrů



Termistorové

- rozlišení prostředí s různou tepelnou vodivostí – ohřívání čidla el. proudem
- velmi přesné ($\pm 0,1$ mm)
- čidlo málo mechanicky odolná
- průběžná měření – podobně jako elektrokotaktní

Fotoelektrické

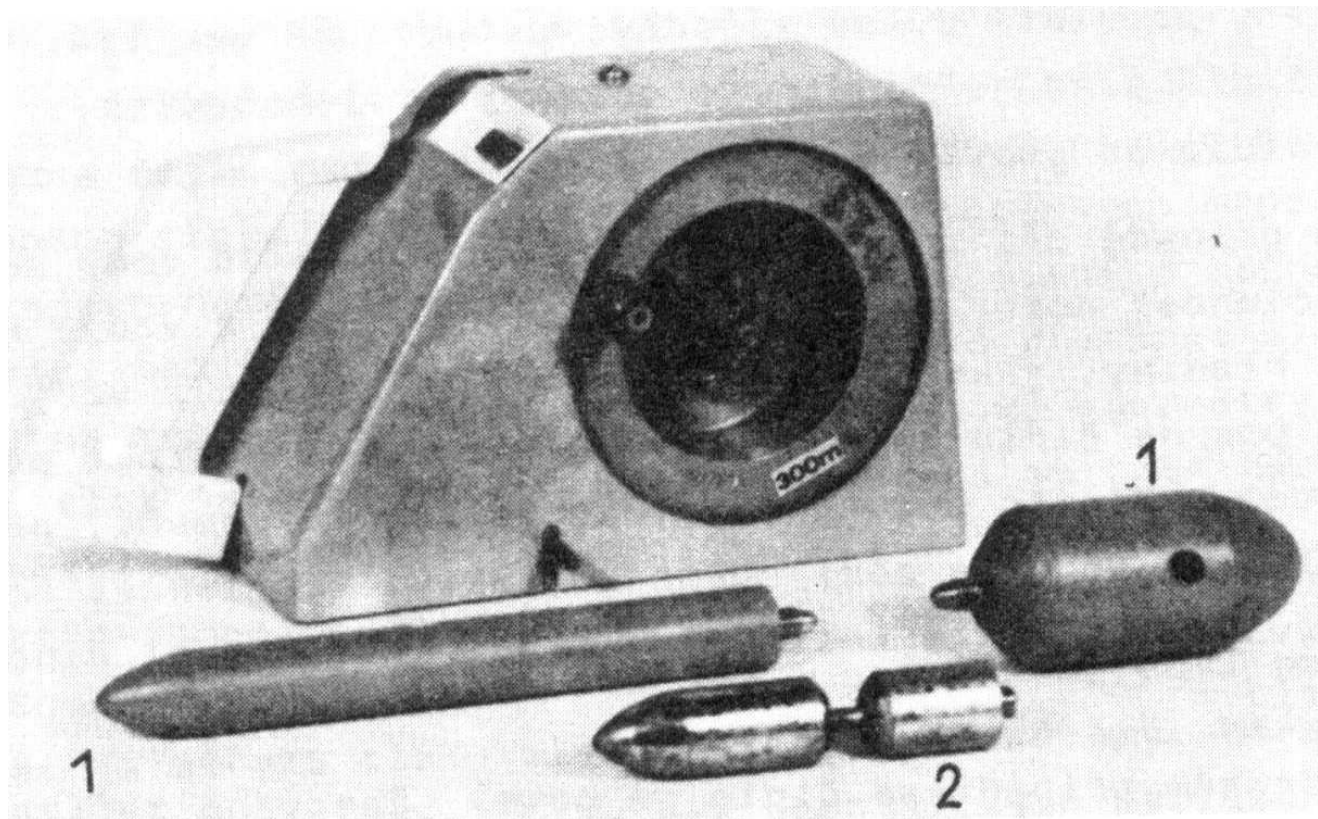
- rozlišení prostředí podle různého fotoodporu na čidlo
- velmi přesné (± 1 mm) – ovlivněno vzlínáním
- průběžná měření – podobně jako elektrokotaktní

Ultrazvukové

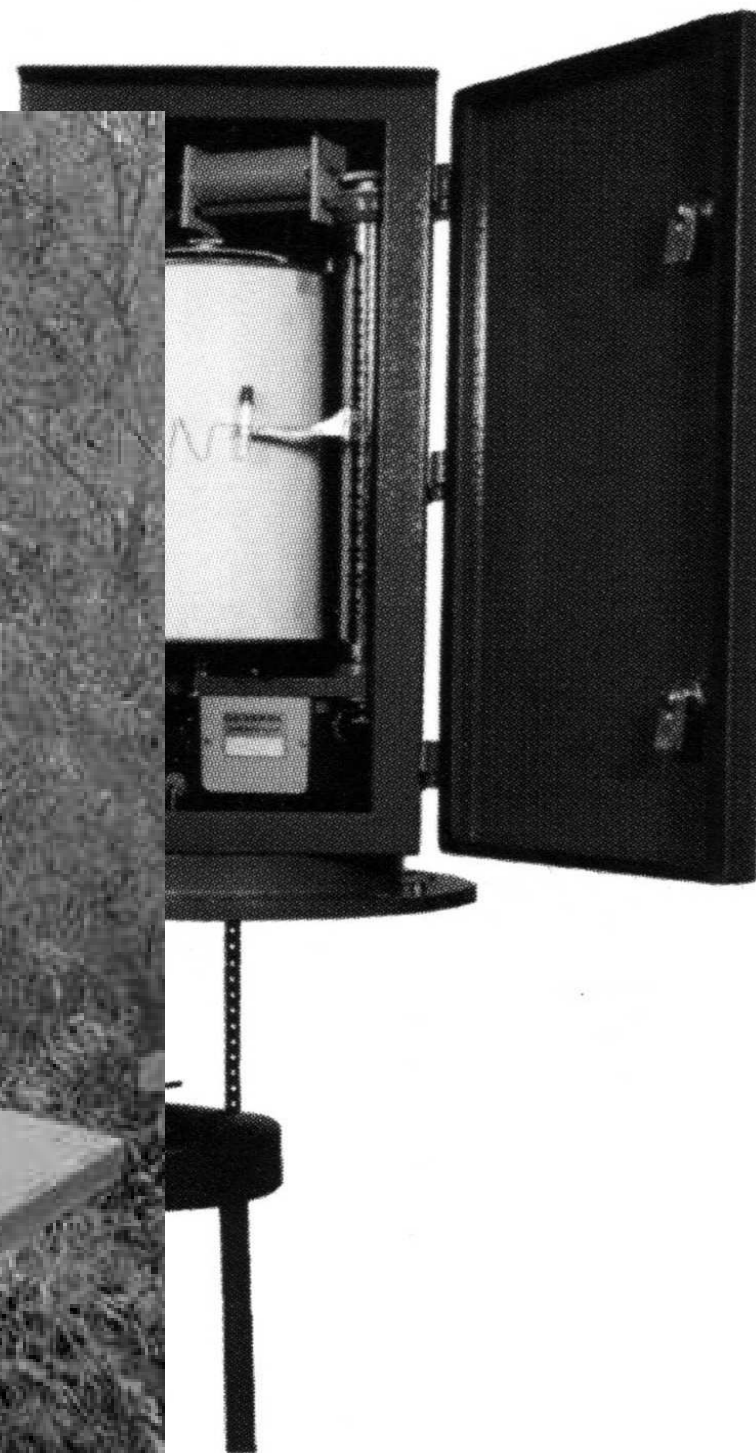
- měření času odraženého signálu od vodní hladiny
- velmi přesné
- málo používané

Mechanické

- na závěsném lanku je zátěžka, konstantní rychlost sestupu lanka
- náraz na hladinu – zmenšení tahu v lanku a aretace hladinoměru
- málo přesné (± 1 cm) – ovlivněno vzlínáním
- průběžná měření – podobně jako elektrokontaktní

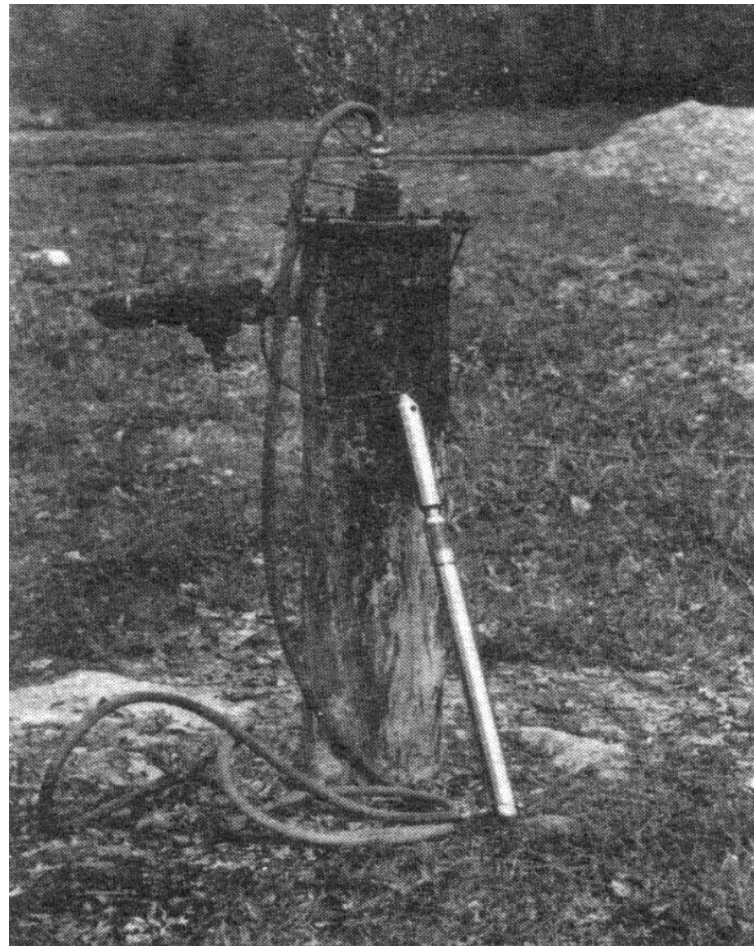


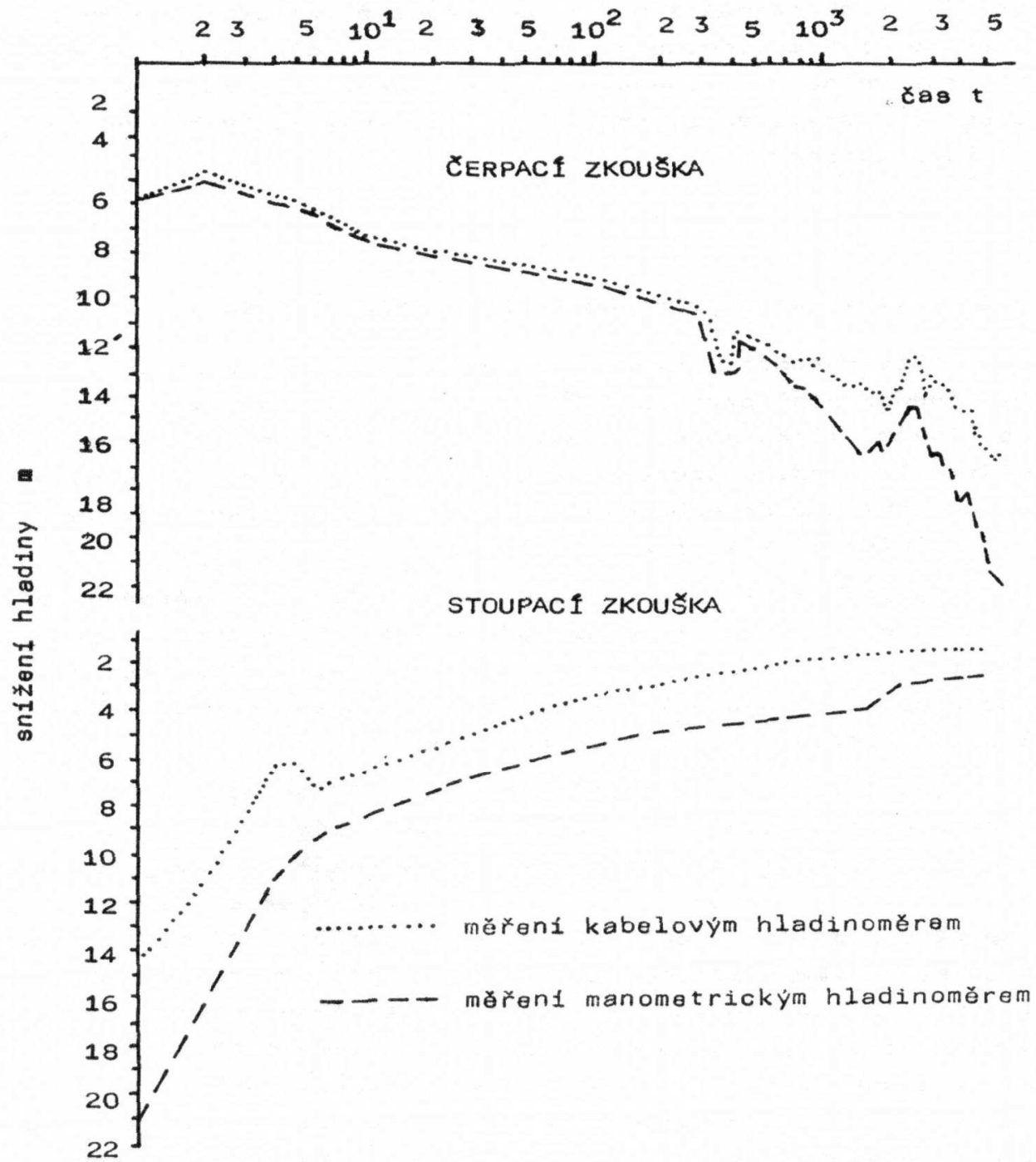
Plovákové



Manometrické

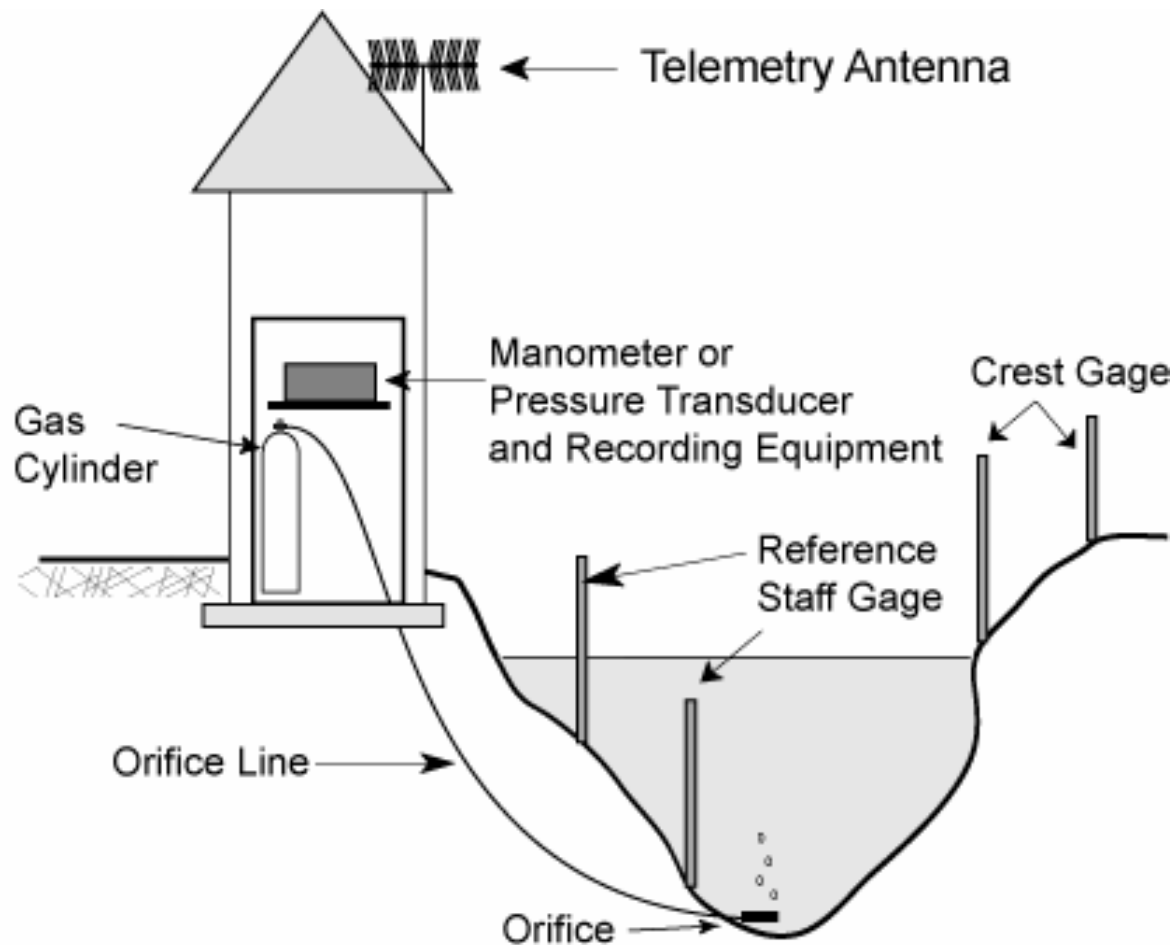
- měří tlak v určité hloubce pod hladinou
- při kolísání hladiny se mění i hydrostatický tlak – registrace změn hladin
- kalibrace úrovně hladiny jiným hladinoměrem
- řada typů čidel – mechanická, elektromechanická, elektronická, ...
- jediné přesně měřící v proplyněných minerálních vodách (ČZ, registrace, apod.)





Pneumatické

- měření tlaku v určité části sloupce vody ve vrtu pomocí tenké trubičky
- ustanovení tlakové rovnováhy mezi ústím trubičky a vodou ve vrtu
- měření tlaku na povrchu
- výhoda – minimální prostor pro trubičku ve vrtu + minimální riziko poškození
- proplyněné vody- nutné umístit pod bodem evaze



MĚŘENÍ PRŮTOKŮ

Průtok

- množství vody proteklé daným profilem za jednotku času ($l \cdot s^{-1}$, $l \cdot \text{min}^{-1}$, $m^3 \cdot s^{-1}$)

Vydatnost

- množství vody, které je za daných podmínek objekt schopný dávat
- vydatnost pramene, vydatnost vrtu

Vývěr

- voda vyvěrající z horninového prostředí na zemský povrch (pramen) nebo do důlních děl
- vývěr vody může na zemský povrch může být přírodní, pak jej označujeme jako **pramen**

Přeliv

- samovolně přetékaající voda z vrtu (když vrt je vyhlouben do hornin s napjatou vodou s pozitivní piezometrickou úrovní)

Výtok

- množství vody vytékající z umělých děl (drenáž, štola)
- i vody vypouštěné z kanalizace nebo z čistírny do povrchových toků.

METODY MĚŘENÍ PRŮTOKŮ

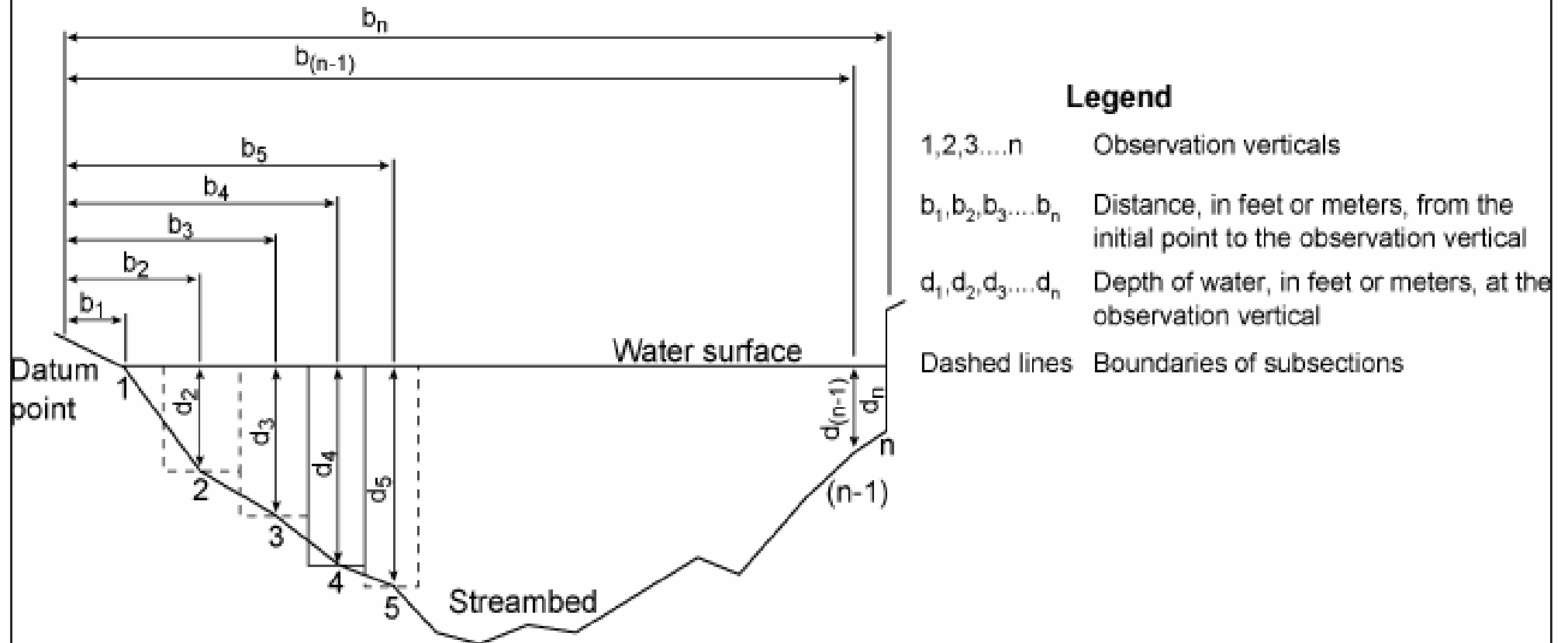
Metody měření jsou různé podle toho v jakých podmínkách se průtoky měří:

- měření průtoků v korytech
- měření průtoků v potrubích
- měření průtoků ve vrtech
- měření průtoků ve zvodněných horninách

Pro měření průtoků v korytech se používají následující metody:

- hydrometrování
- měrné žlaby
- měrné profily s vodočty
- měrné přelivy
- stopovací zkoušky
- měřené povrchové rychlosti proudění
- objemová měření

HYDROMETROVÁNÍ



$$Q = \sum_i^n q_i = \sum_i^n v_i a_i = \sum_i^n v_i (w_i d_i) \quad 5.1$$

where

Q = total stream discharge

q_i = discharge in subsection i

v_i = mean flow velocity normal to subsection i

a_i = cross-sectional area of subsection i

w_i = width of subsection i

$$= \begin{cases} \frac{b_2 - b_1}{2} & \text{if } i = 1; \\ \frac{b_{i+1} - b_{i-1}}{2} & \text{if } 2 \leq i \leq n - 1; \\ \frac{b_n - b_{n-1}}{2} & \text{if } i = n \end{cases}$$

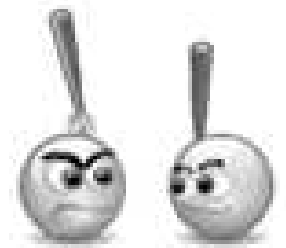
d_i = depth of subsection i

b_i = distance from shoreline datum to
center of subsection i

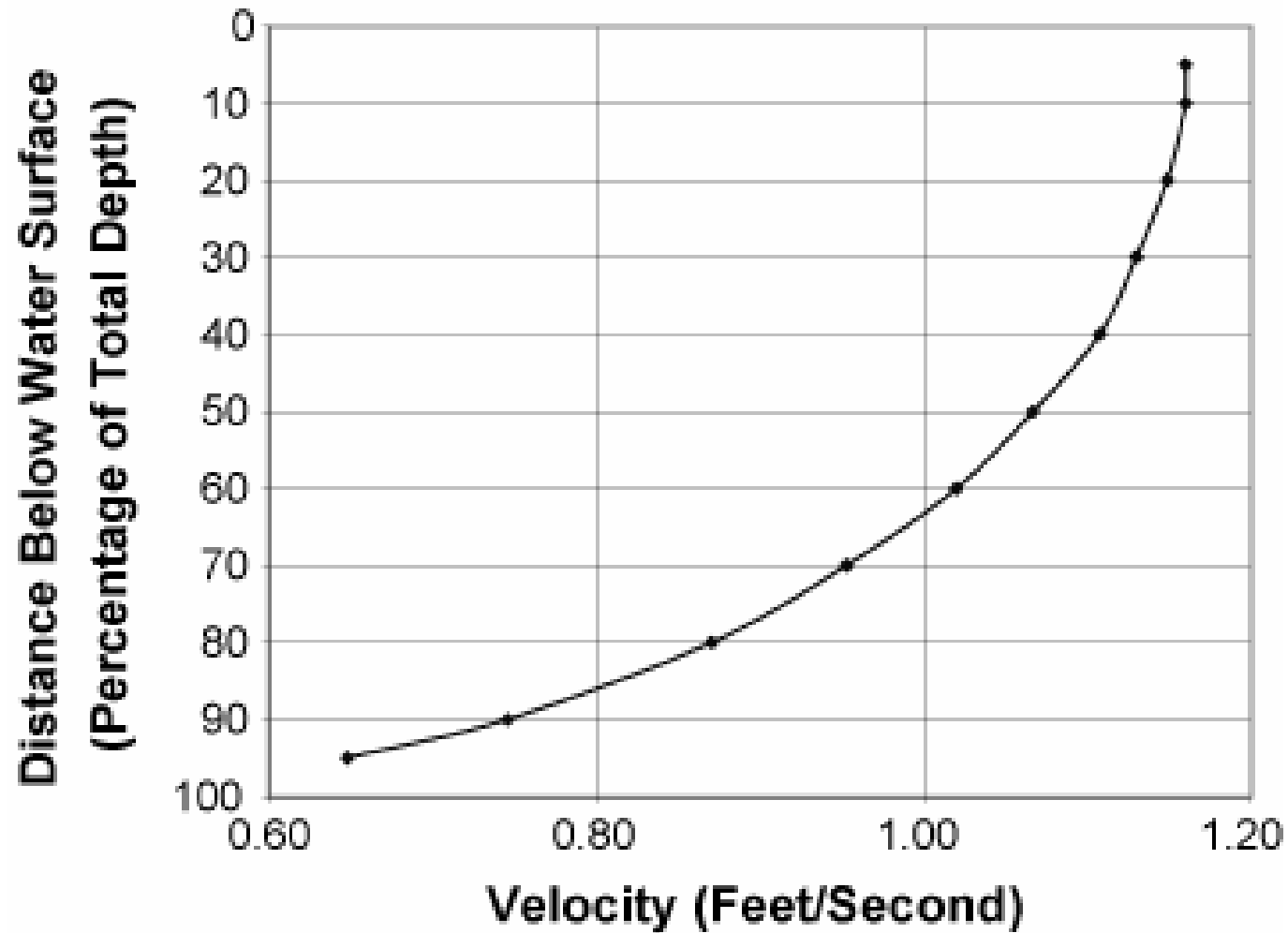
n = number of subsections dividing
the stream cross-section

Jak změřit rychlost proudění?





Typická vertikální distribuce vektoru rychlosti ve vodním toku



Jak tedy určit průměrnou rychlost proudění?



ideálně měření v každém 0.1 násobku hloubky vodoteče (mezi 0.1 – 0.9)

- **metoda dvou bodů**

- průměrná hodnota z hloubek 0.2 a 0.8
- nejpoužívanější a velmi přesná metoda do hloubek cca 1 m

- **metoda šesti desetin**

- přesná metoda pro menší hloubky vodotečí

- **metoda tří bodů**

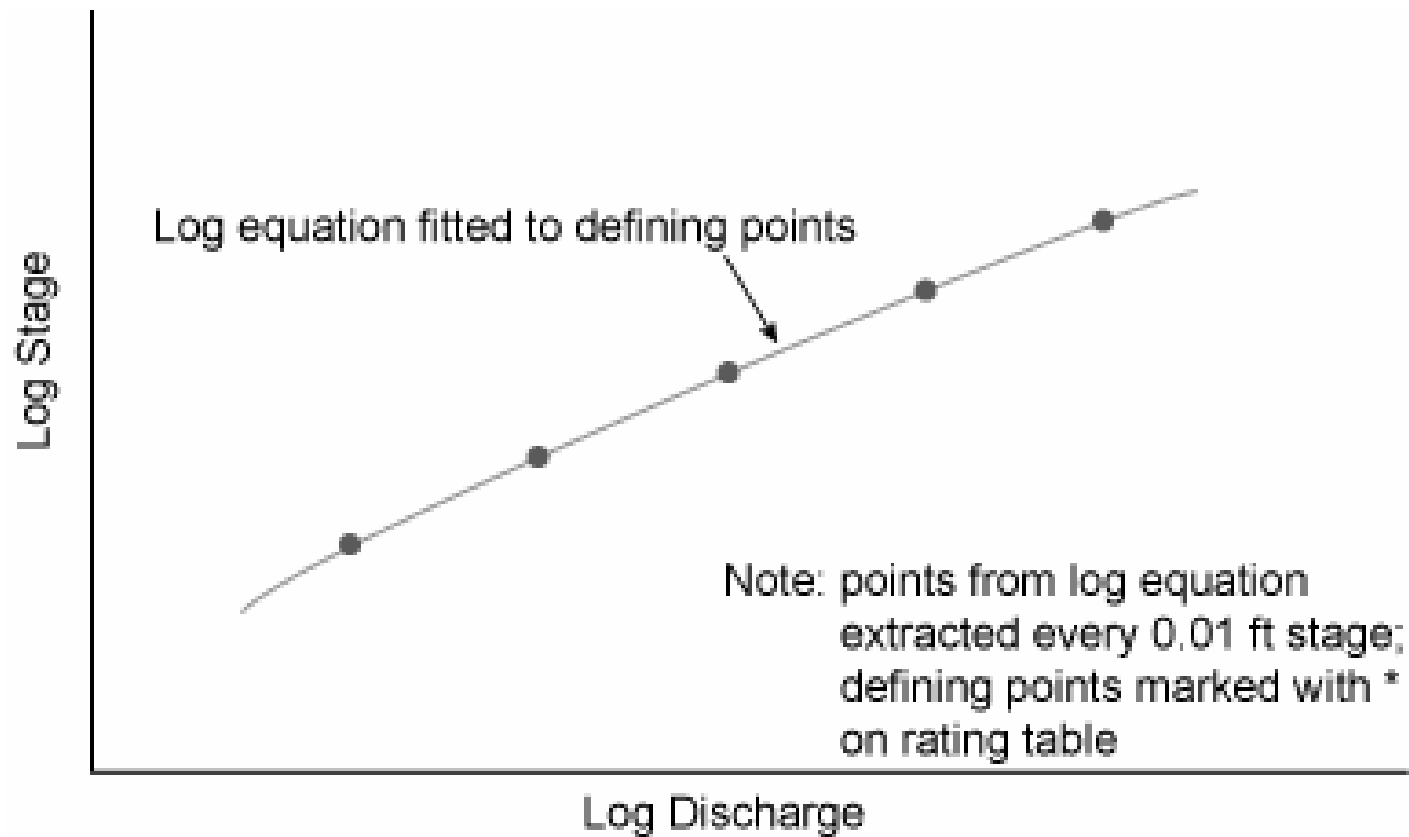
- $V_{str} = (V_{0.2} + V_{0.8})/4 + (V_{0.6})/2$
- vhodné zejména pro hlubší vodoteče

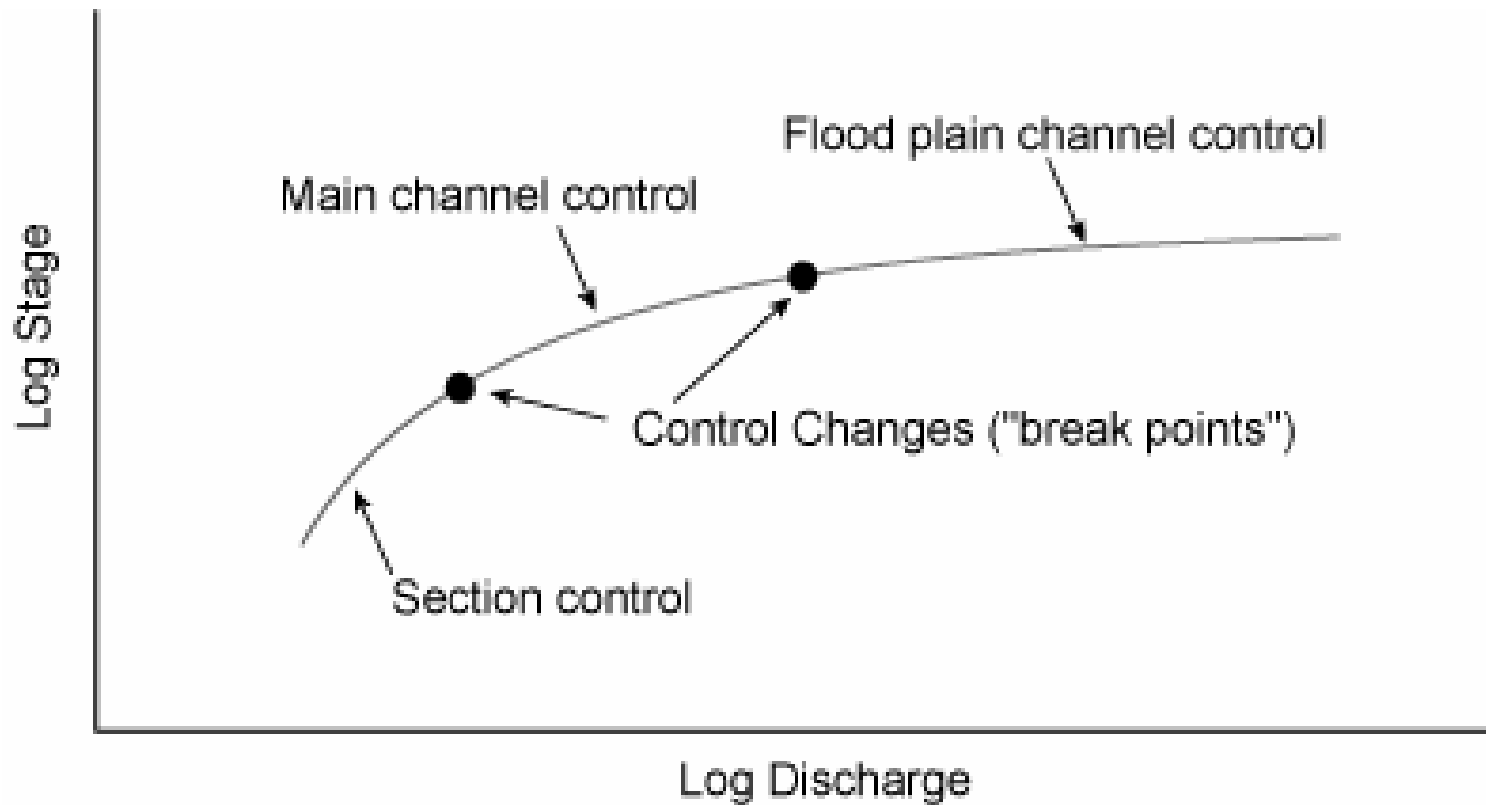
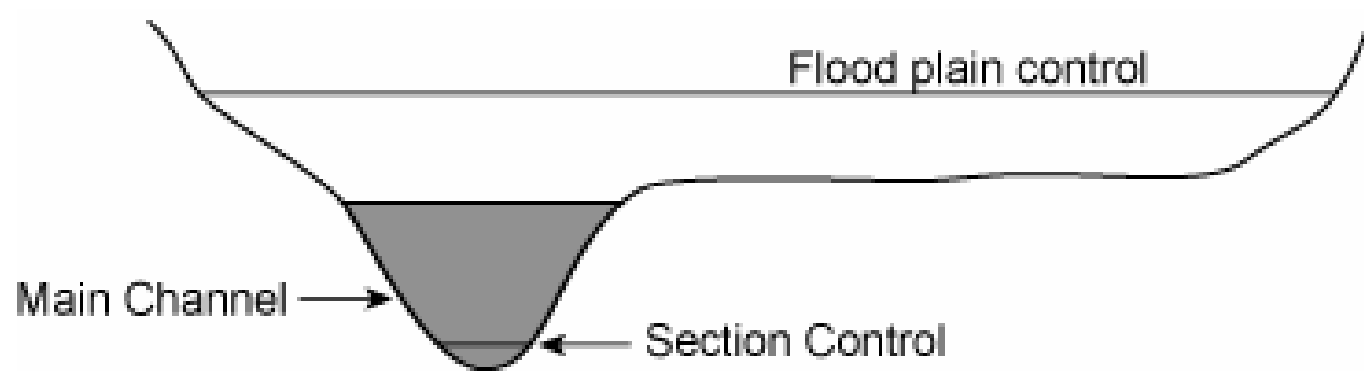
- **metoda určení povrchové rychlosti (splývající tělíska nebo optika)**

- přírodní koryta – násobení koeficientem 0.85
- klidné toky – násobení koeficientem 0.9

Základní výsledek hydrometrování – konzumpční křivka

- měrné profily
- měření průtoků při různých vodních stavech





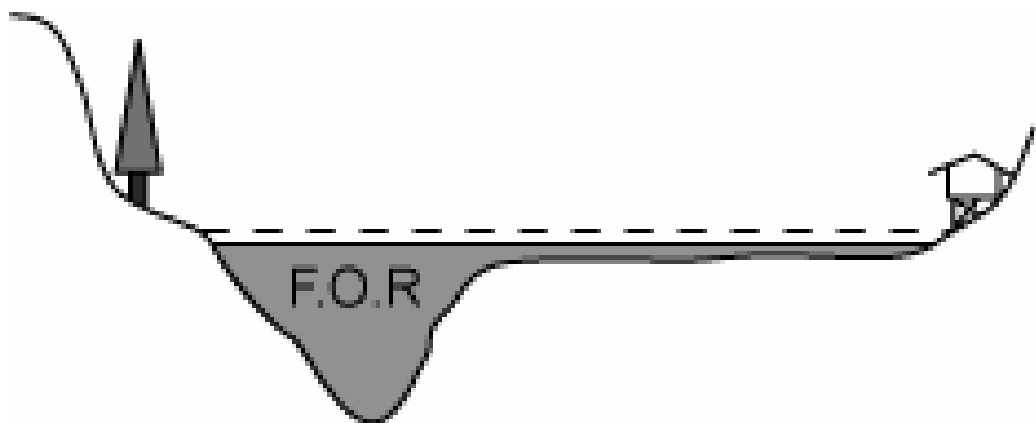
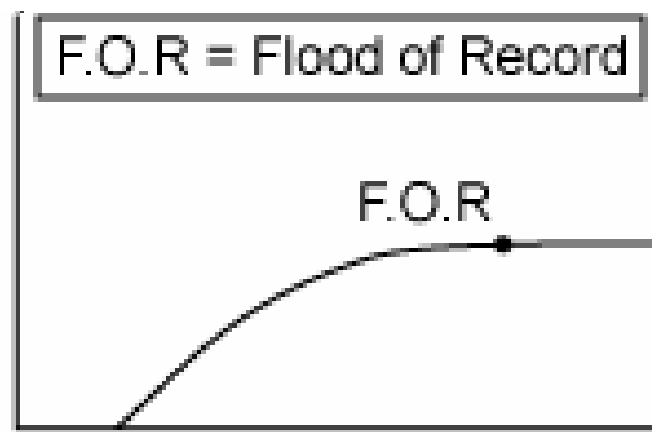


F.O.R = Flood of Record

Stage

F.O.R

Discharge



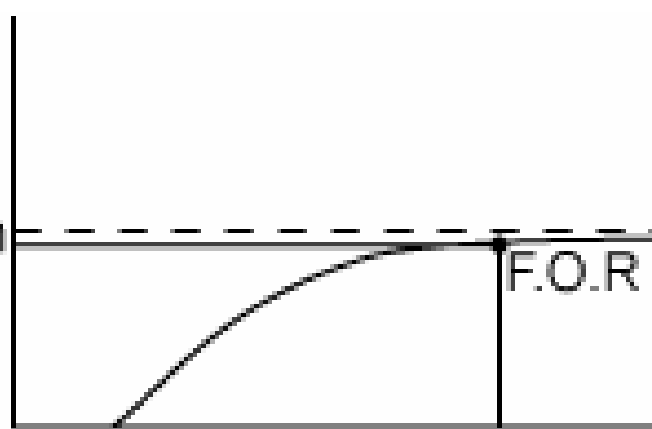
Stage

Δh

F.O.R

Discharge

ΔQ



Kde měřit průtoky ve vodotečích?



optimálně – vždy před každým soutokem



MĚRNÉ ŽLABY

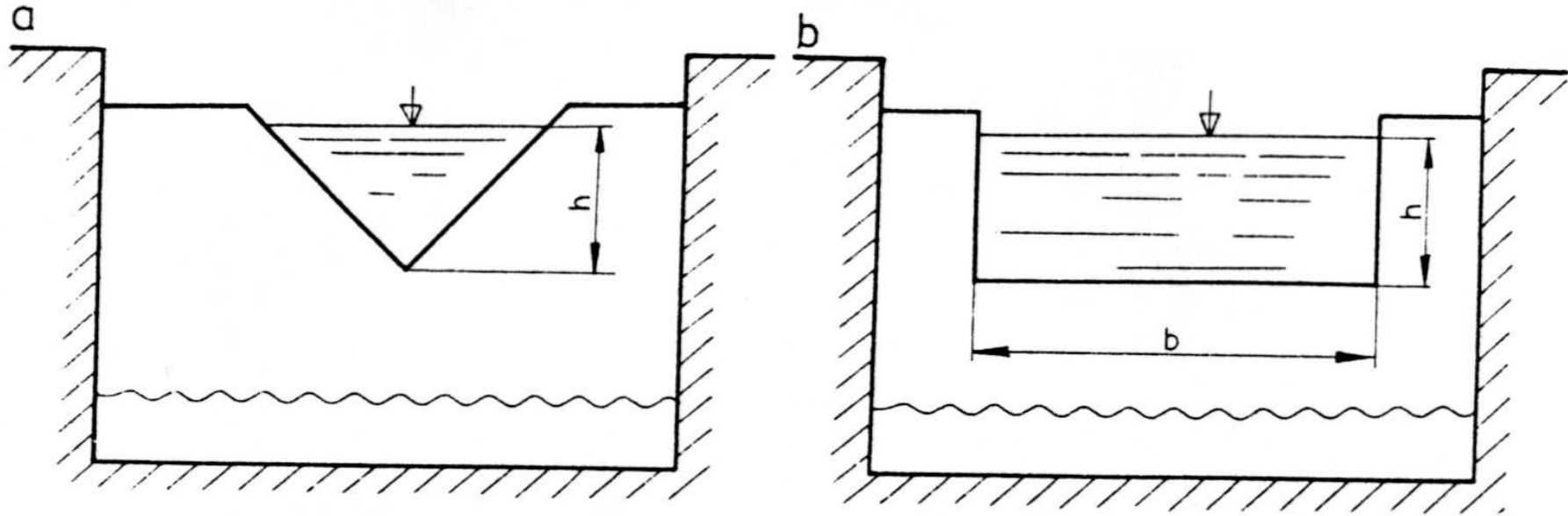
- žlab (koryto) se zúženým profilem
- měření výšky vodního sloupce v korytě před a za zúžením
- rozdíl hladin odpovídá průtoku
- např. Venturiho žlab

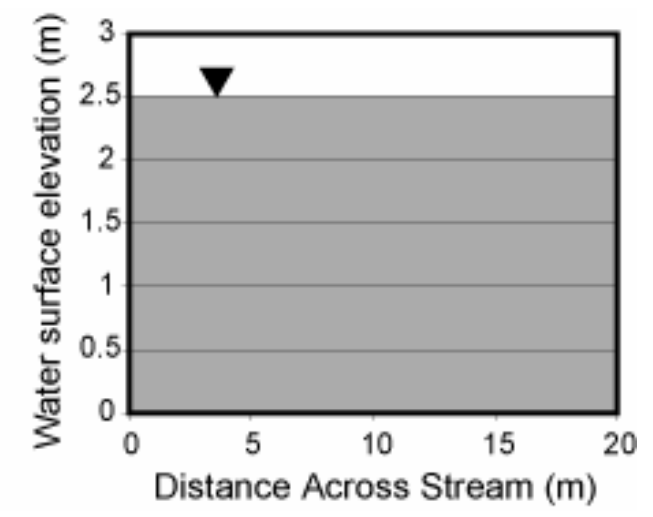
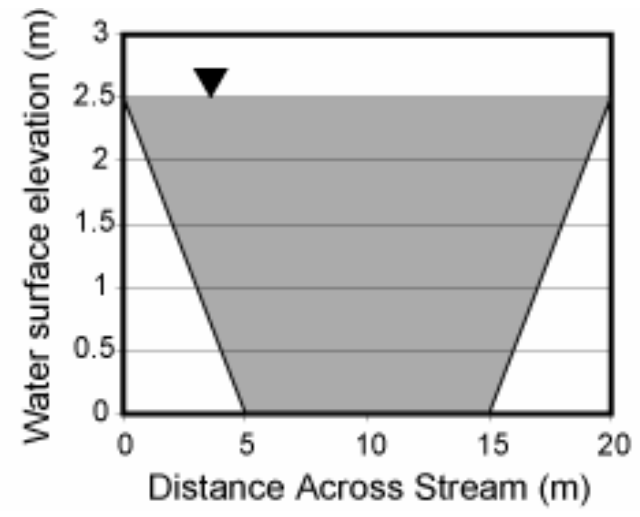
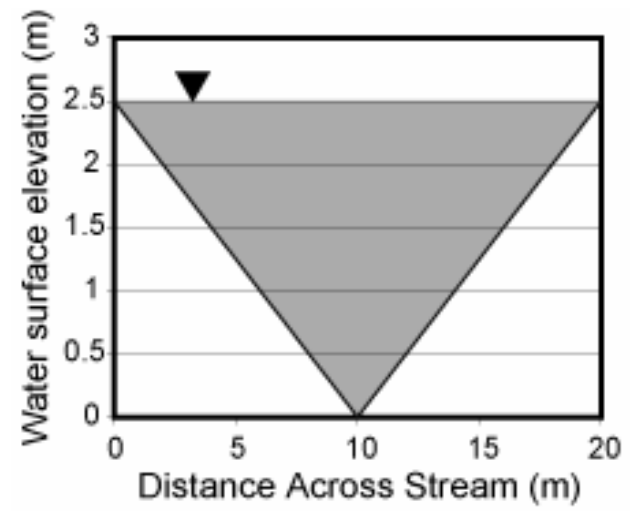
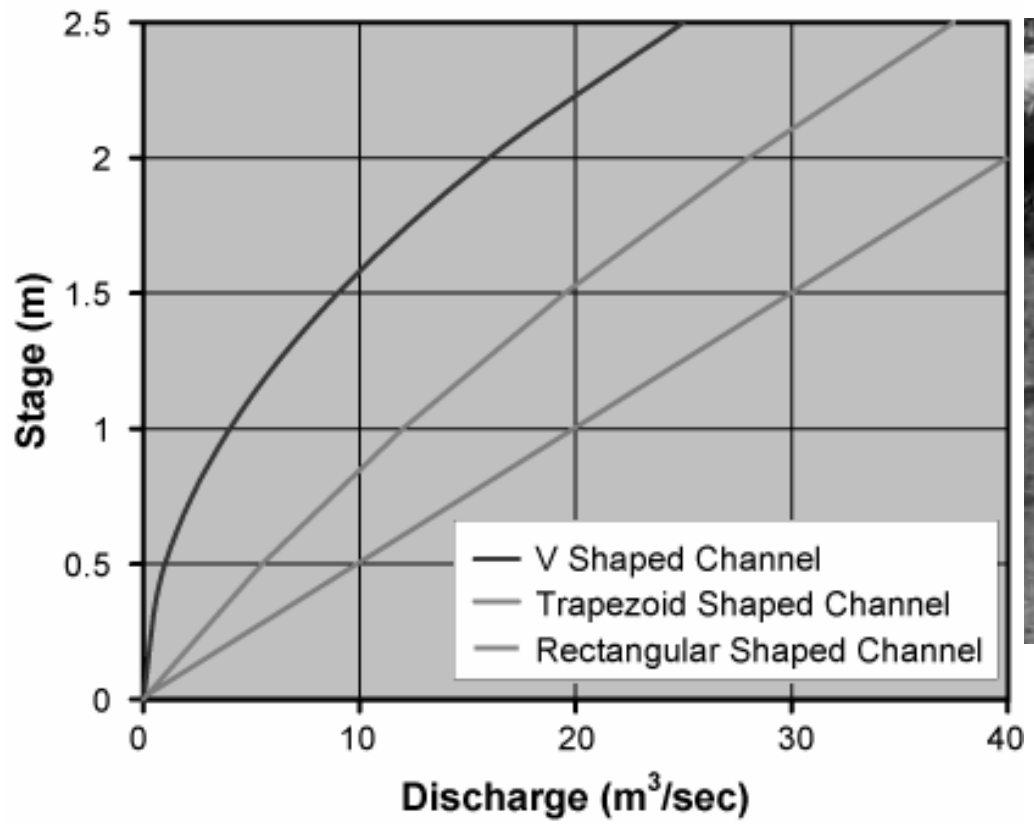
$$Q = \varphi \cdot b \cdot h_2 \cdot \sqrt{2g \cdot (h_1 - h_2)}$$

- kalibrace pro jednotlivé žlaby
- využití – instalace především při dlouhodobější exploataci, ČZ, apod.

MĚRNÉ PŘELIVY

- přenosné (jednorázová) nebo trvale instalované (dlouhodobá měření)
- řada typů podle tvaru výřezu
- pro každý typ použití příslušného vzorce
- měření výšky paprsku na přelivu





Thomsonův přepad

(rovnoramenný pravoúhlý trojúhelník)

$$Q = 2,362 \cdot \mu \cdot h^{5/2}$$

$$\mu = 0,62$$

Ponceletův přepad

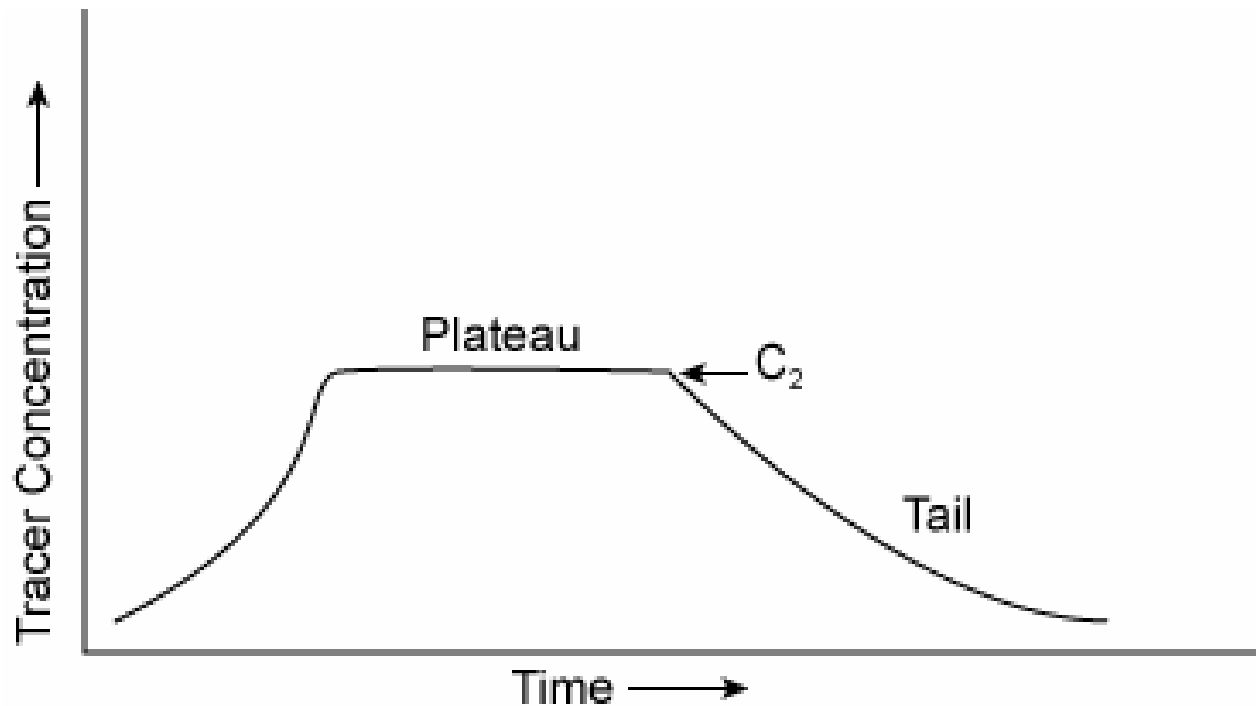
(obdélníkový přepad)

$$Q = 2/3 \cdot \mu \cdot b \sqrt{2g} \cdot h^{3/2}$$

$$\mu = 0,62$$

STOPOVACÍ ZKOUŠKY

- použití tzv. stopovače – inertní nerozpadající se chemická látka (chloridy - NaCl, bromidy, barviva, radioaktivní látky)
- směšovací metoda



$$Q = Q_1 \frac{(C_1 - C_2)}{(C_2 - C_0)}$$

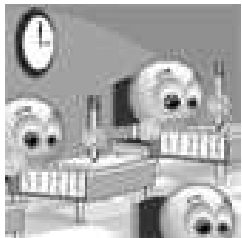
Q - zjišťovaný průtok

C_0 - koncentrace stopovače
v pozadí

Q_1 - dávkovaný průtok stopovače

C_1 - koncentrace dávkovaného
stopovače

C_2 - koncentrace stopovače
v měřeném profilu



PŘÍKLAD



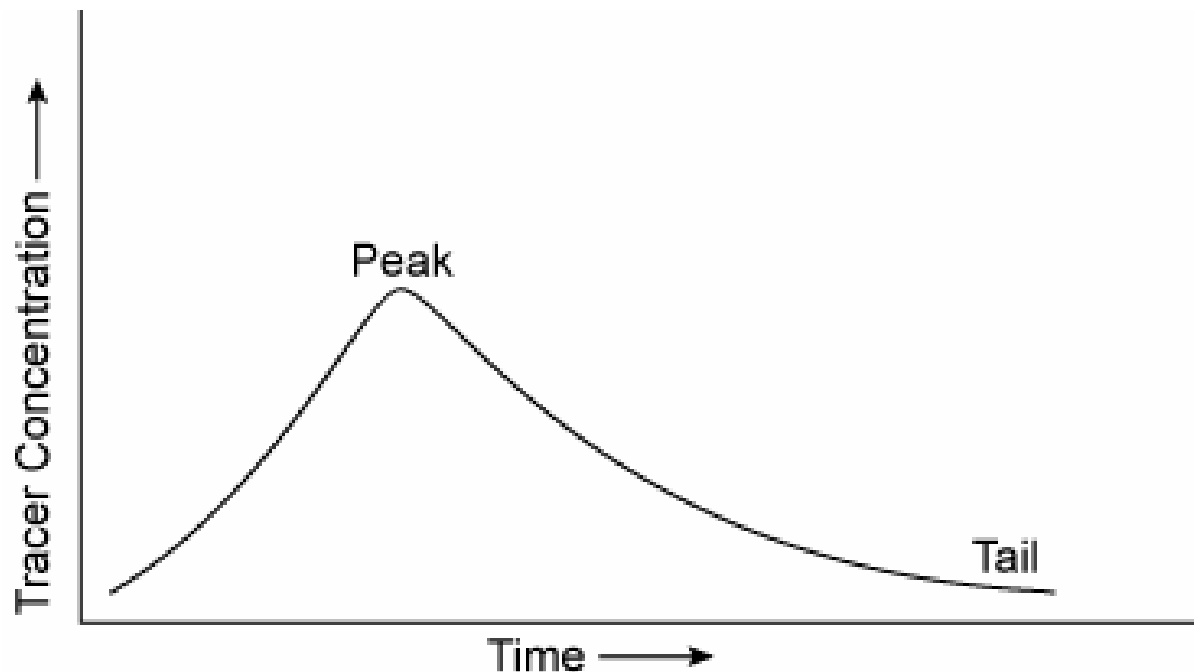
Určete průtok ve vodním toku, do kterého byl po dobu 30 s přidáno 100 l roztoku stopovače. Počáteční koncentrace stopovače ve vodním toku je nulová, koncentrace v roztoku byla 15 000 mg/l.

$$Q = Q_1 \frac{(C_1 - C_2)}{(C_2 - C_0)}$$

STOPOVACÍ ZKOUŠKY

- integrační metoda
 - jednorázový nálev stopovače
 - odečítání hodnot elektrické vodivosti v profilu v pravidelných intervalech času (cca 10 s)
 - naměřené hodnoty elektrické vodivosti se vynášejí jako funkce relativní vodivosti a času

$$P_w = 1000 \cdot \left[\frac{EC_{roztok} - EC_{voda}}{EC_{voda}} \right]$$

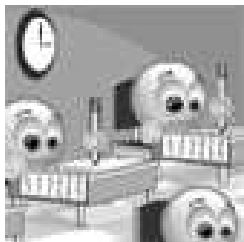


$$Q = \frac{V \cdot P_p}{F \pm \Delta F}$$

V - objem roztoku stopovače

P_p - relativní vodivost
roztoku stopovače

F - doba průtoku stopovače
profilem násobená sumou
hodnot relativní vodivosti
(integrál)



PŘÍKLAD



Určete průtoky ve vodním toku ve dvou měřených profilech. Objem roztoku stopovače byl 10 l, elektrická vodivost prvního roztoku byla 85,7 mS/cm a druhého 65,1 mS/cm. Relativní elektrické vodivosti změřené na dvou profilech jsou zobrazeny v grafech.

$$P_w = 1000 \cdot \left[\frac{EC_{roztok} - EC_{voda}}{EC_{voda}} \right]$$

$$Q = \frac{V \cdot P_p}{F \pm \Delta F}$$

OBJEMOVÁ MĚŘENÍ

- nejpřesnější měření
- použití spíše jako kontrolní měření všech druhů průtokoměrů
- $Q = V / t$

Měření průtoků v potrubí:

- vodoměry
- průtokoměry
- objemová měření

Měření průtoků ve vrtech:

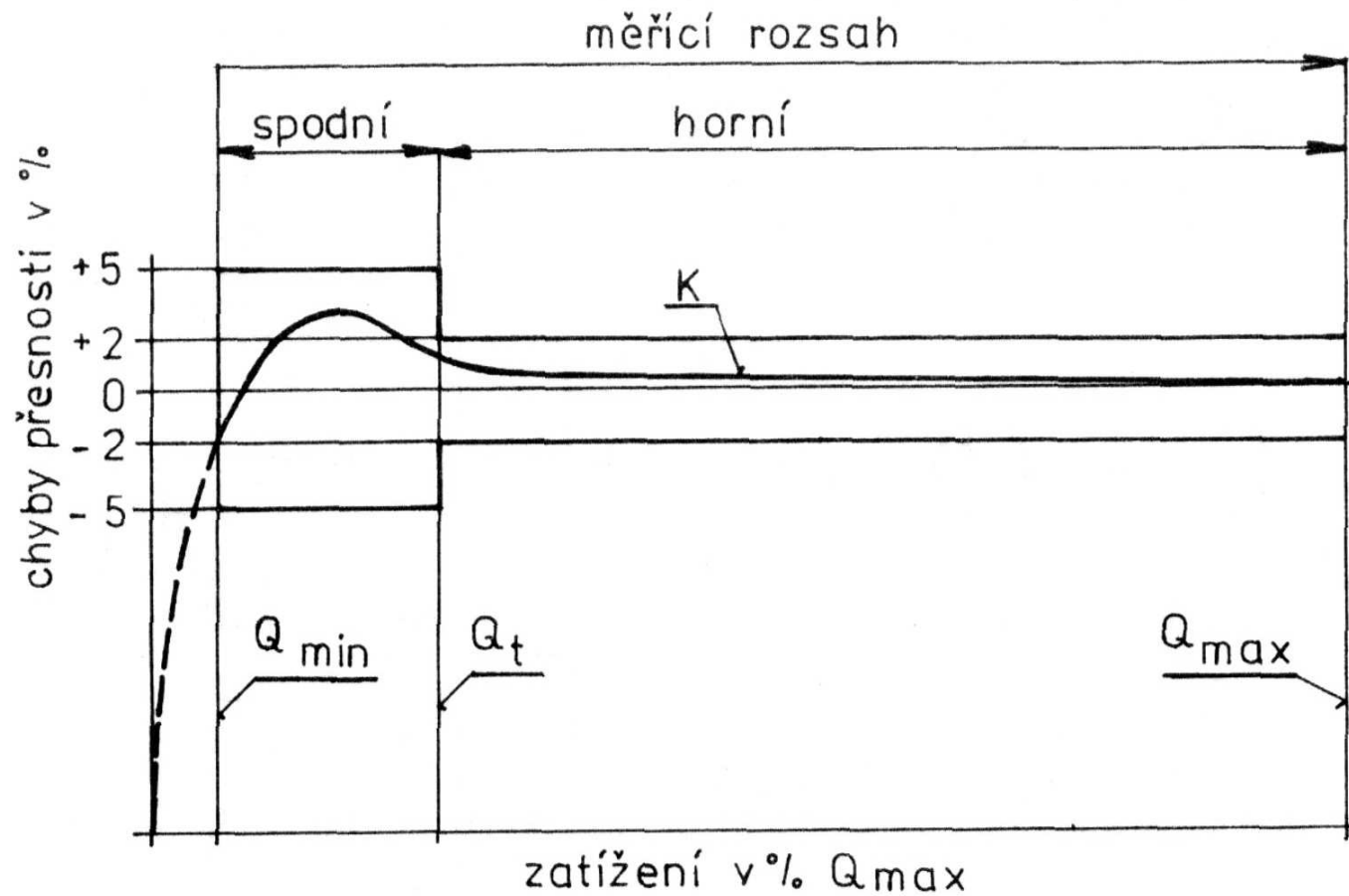
- floumetry – vertikální hydrometrické vrtule
- stopovací zkoušky
- termokarotáž

Měření průtoků ve zvodněné vrstvě:

- výpočet podle Darcyho zákona z koeficientu filtrace, plochy měřeného profilu a sklonu hladiny proudící podzemní vody
- poměrně nepřesné – nehomogenní a anizotropní prostředí

Vodoměry

- nejčastěji používané lopátkové vodoměry
- chyby při malých průtocích



- nutná instalace vodoměrů do vhodné pozice na potrubí

Průtokoměry

Indukční průtokoměry

- Faradayův zákon o elektromagnetické indukci
- $U_i = B \cdot l \cdot v$ (B ... magnetická indukce, l ... vzdálenost elektrod, v ... rychlost proudění)

Tepelný účinek proudu

- rovnovážný stav mezi přívodem tepla do čidla a prouděním
- zvýšení rychlosti proudění – zrychlený odvod tepla

Silový účinek proudu na pevné těleso

- obdoba např. Pitotovy trubice (stanovení dynamického tlaku)

Dopplerův princip

- změny rychlosti ultrazvukových vln po a proti proudu kapaliny
- u spojitě vysílaných ultrazvukových vln vzniká fázový posun nebo posun frekvence