

Metody hydrogeologického výzkumu

I.

Měření a přístrojové vybavení v hydrogeologii



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



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 – srážkoměr – 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 (Petropavlovská pevnost)

následuje Labe, Temže, apod.

1790 – Voltmanova hydrometrická vrtule

1831 – patent zapisovacího hladinoměru – Temže



Hladové kameny

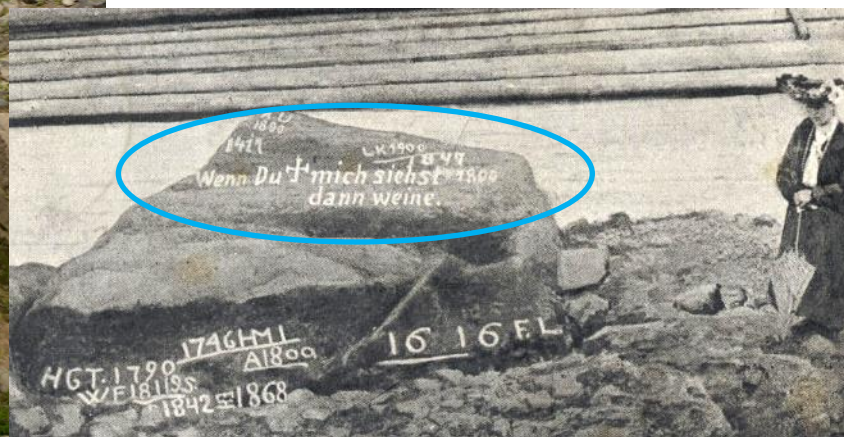
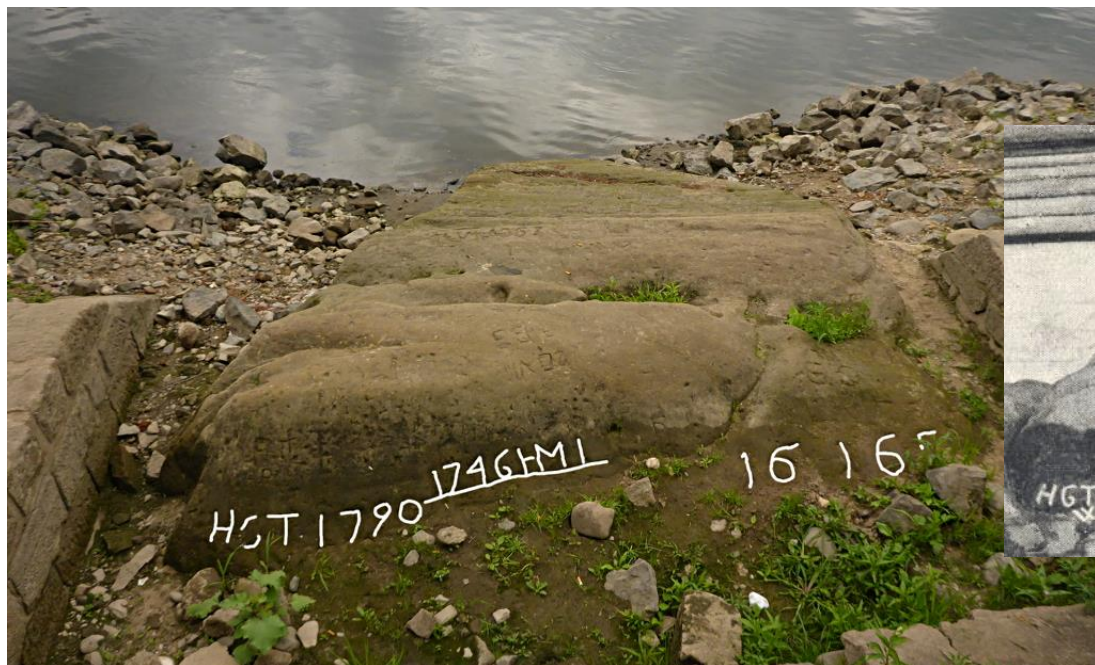
Hungerstein – Labe, Děčín u Tyršova mostu

nejstarší záznam z roku 1159

nejstarší čitelný nápis z roku 1616

1800 – *Wenn du mich siehst, dann weine = Spatříš-li mne, plač*)

1938 – reklama společnosti na výrobu pump: *Neplač holka, nenaříkej, když je sucho, pole stříkej*



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 MEŘÍCIHO 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 blížící 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
- 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

- udává, jakou nejmenší změnu dané veličiny lze přístrojem zjistit
- 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)

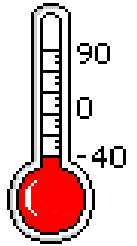
- nejmenší změna měřené veličiny, která vyvolá zjistitelnou změnu údaje na přístroji

Spolehlivost přístroje

- schopnost udávat za stanovených podmínek měřenou hodnotu v požadovaných mezích přesnosti

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
- přesnost měření může být rozdělena i podle provozních podmínek

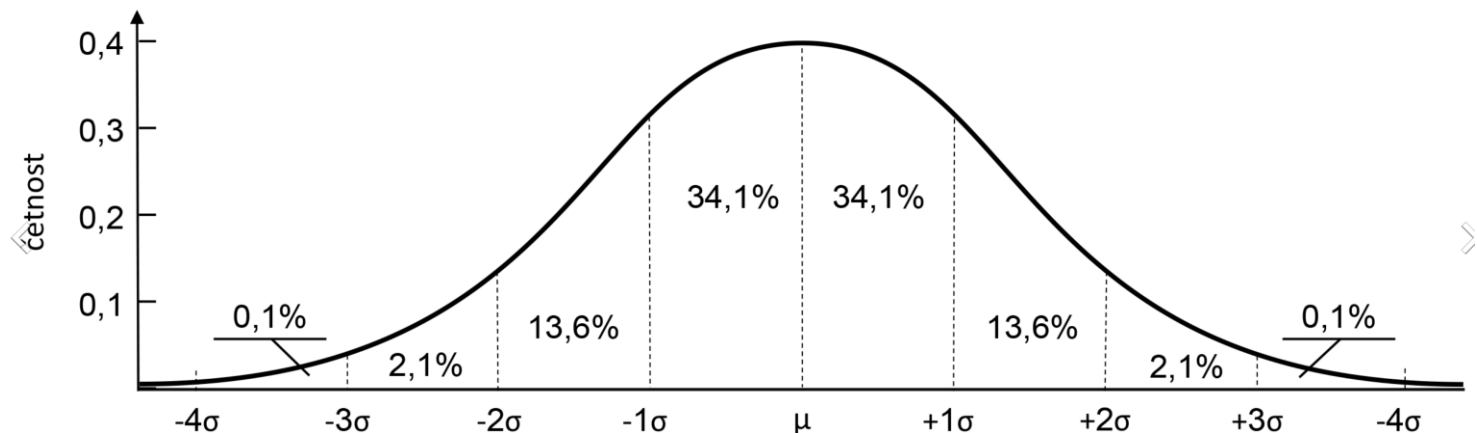
Životnost přístroje

- 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
- typicky Gaussovo rozdělení měřených hodnot:
- nejčastěji budou vycházet hodnoty okolo střední hodnoty měření μ
 - 68,2 % všech hodnot leží v rozmezí ± 1 směrodatné odchyly (σ) od střední hodnoty
 - 95 % všech hodnot leží v rozmezí $\pm 1,96$ násobku směrodatné odchyly od střední hodnoty
- zpravidla – konvenčně pravá hodnota je aritmetický průměr



CHYBY MĚŘENÍ

Chyby systematické

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



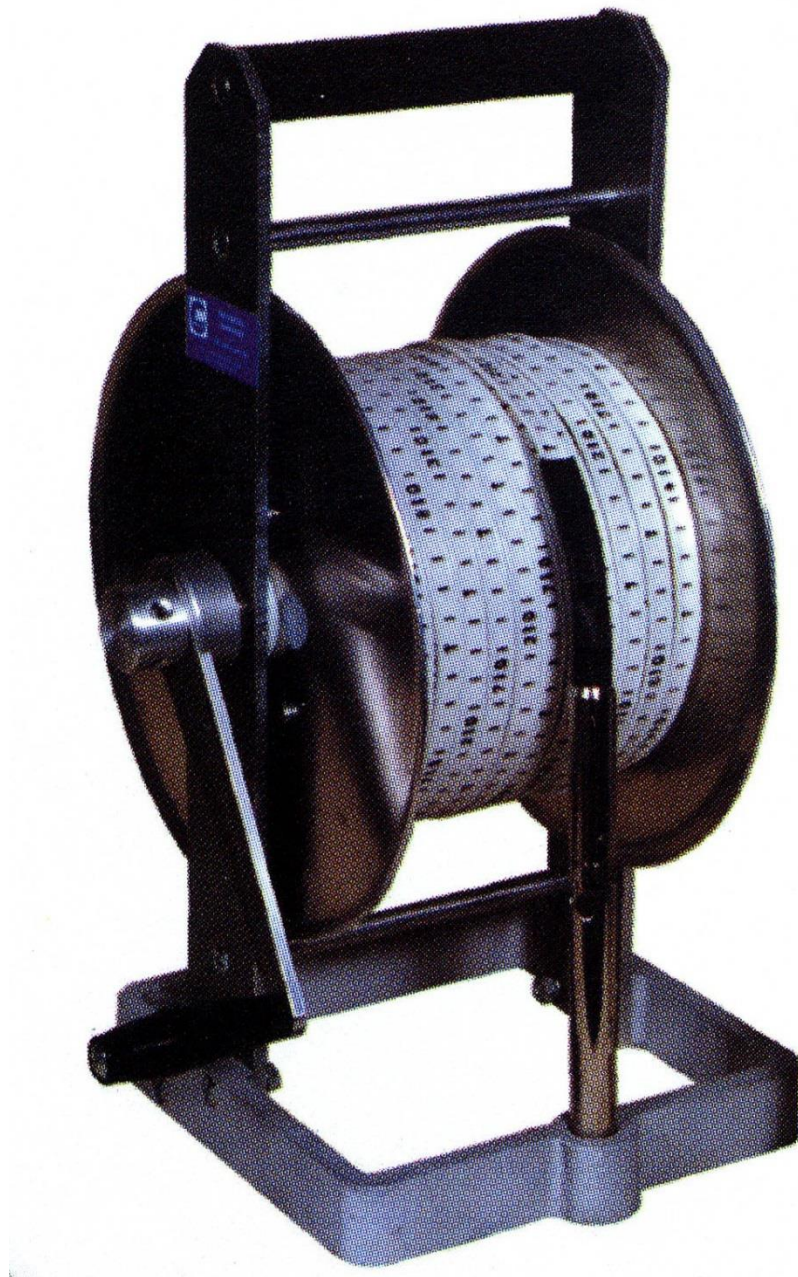
Elektrokontaktní

- dotyk s hladinou vytvoří v elektrodách vodivé spojení
- minimálně cca 80 mS/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 – Geopol 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 elektrokontaktní

Fotoelektrické

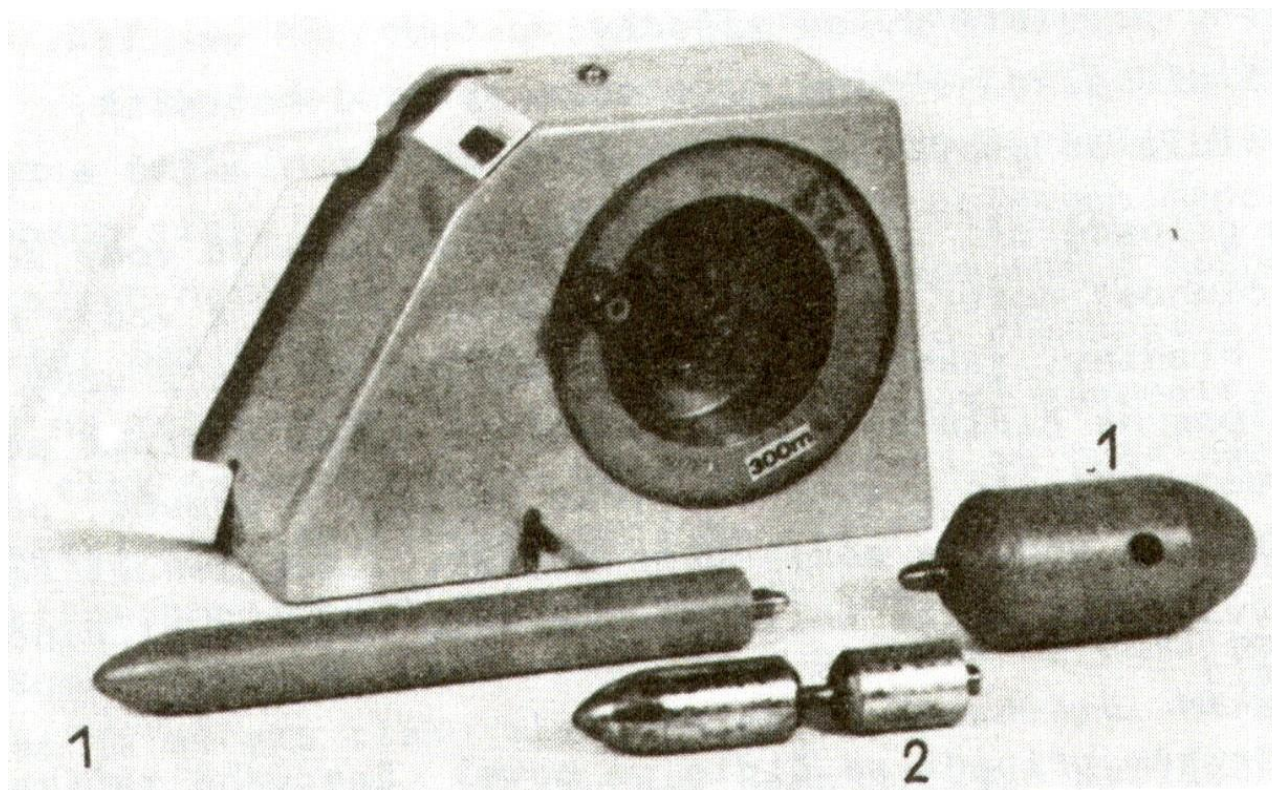
- rozlišení prostředí podle různého fotoodporu na čidlo
- velmi přesné (± 1 mm) – ovlivněno vzlínáním
- průběžná měření – podobně jako elektrokontaktní

Ultrazvukové

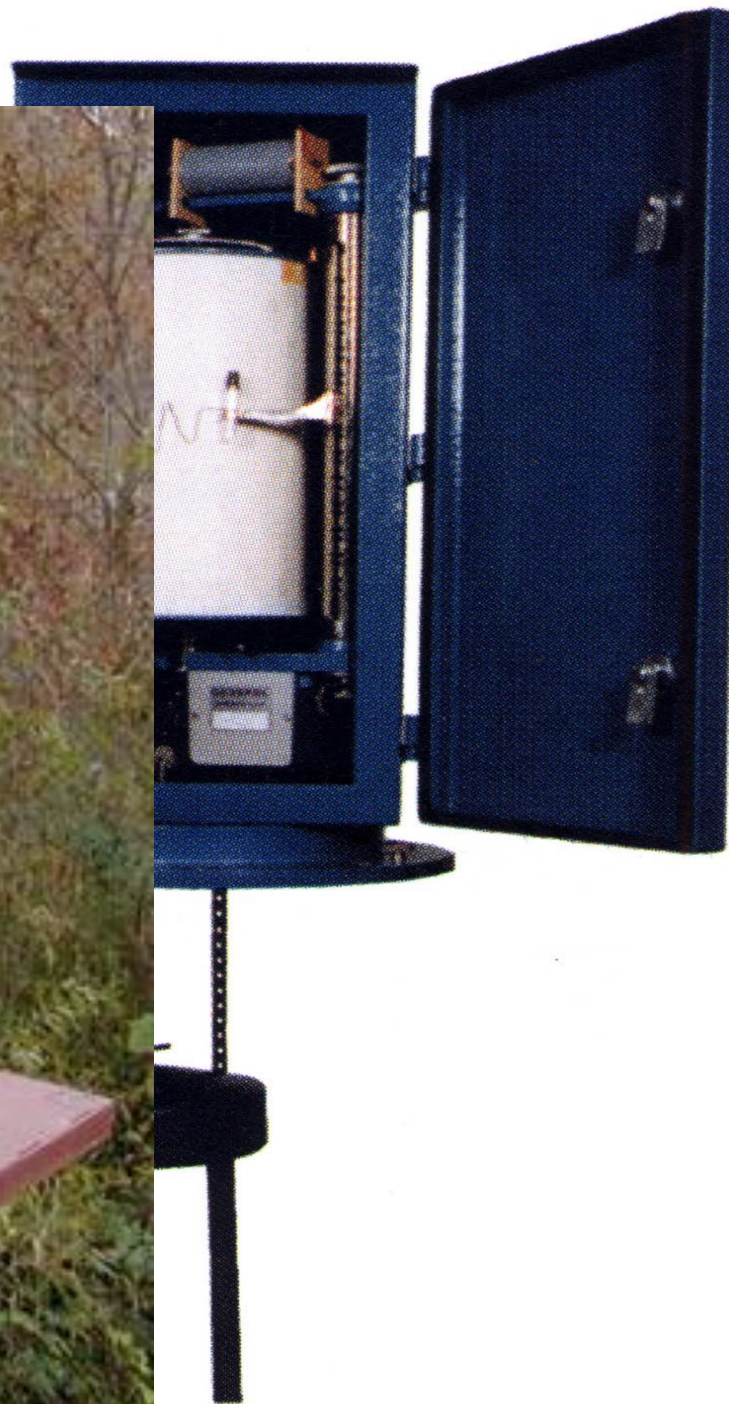
- měření času odraženého signálu od vodní hladiny
- velmi přesné
- málo používané

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



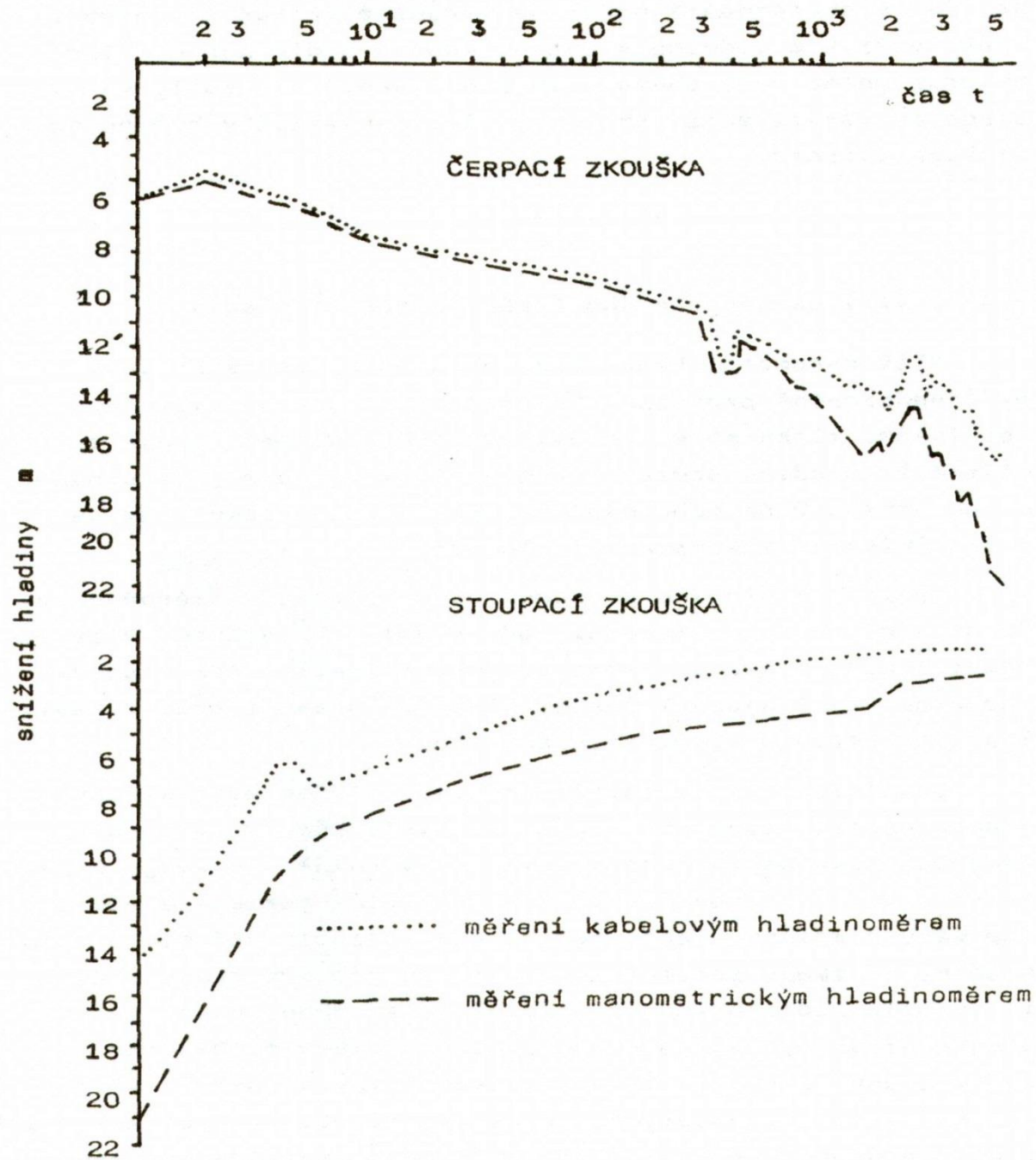
Plovákové



Manometrické

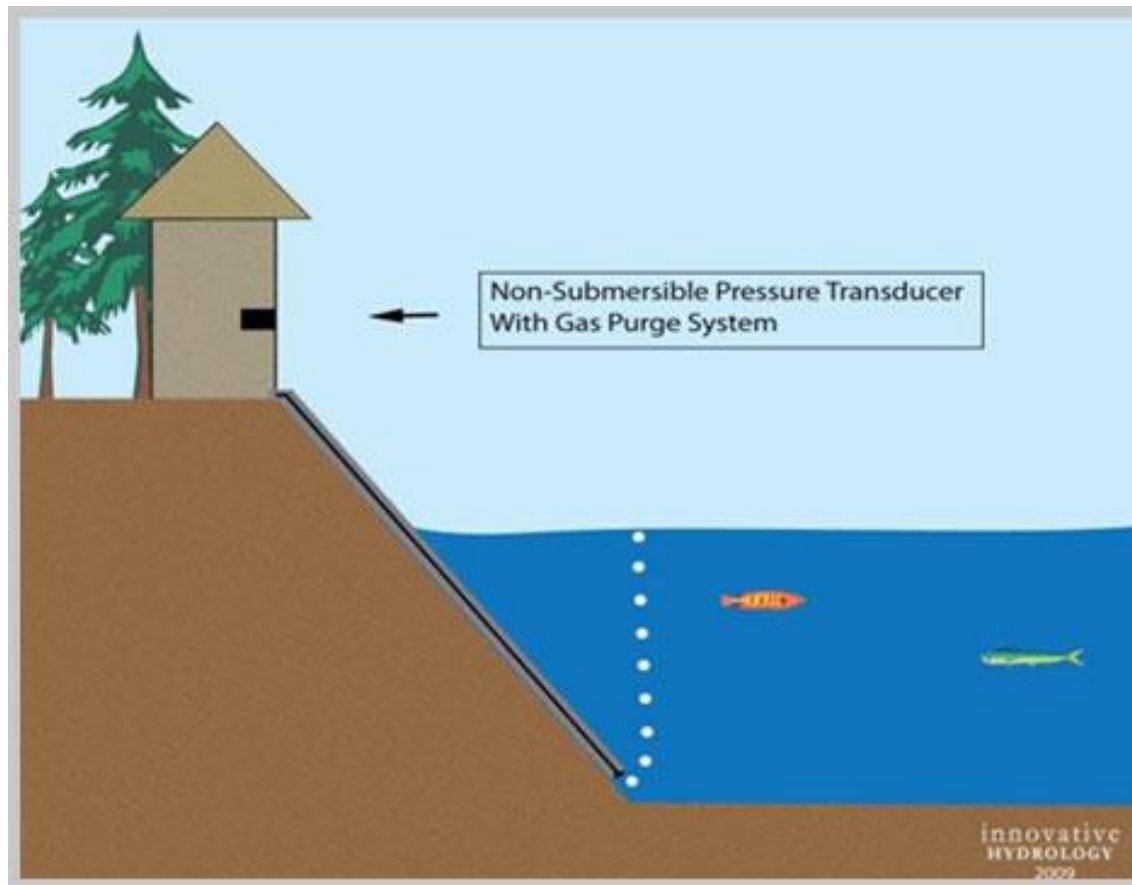
- měří tlak v určité hloubce pod hladinou
- při kolísání hladiny se mění i hydrostatický tlak – registrace změn hladin
- kalibrace úrovně hladiny jiným hladinoměrem
- řada typů čidel – mechanická, elektromechanická, elektronická, ...
- jediné přesně měřící v proplýněných minerálních vodách (ČZ, registrace, 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 ($\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$, $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)

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

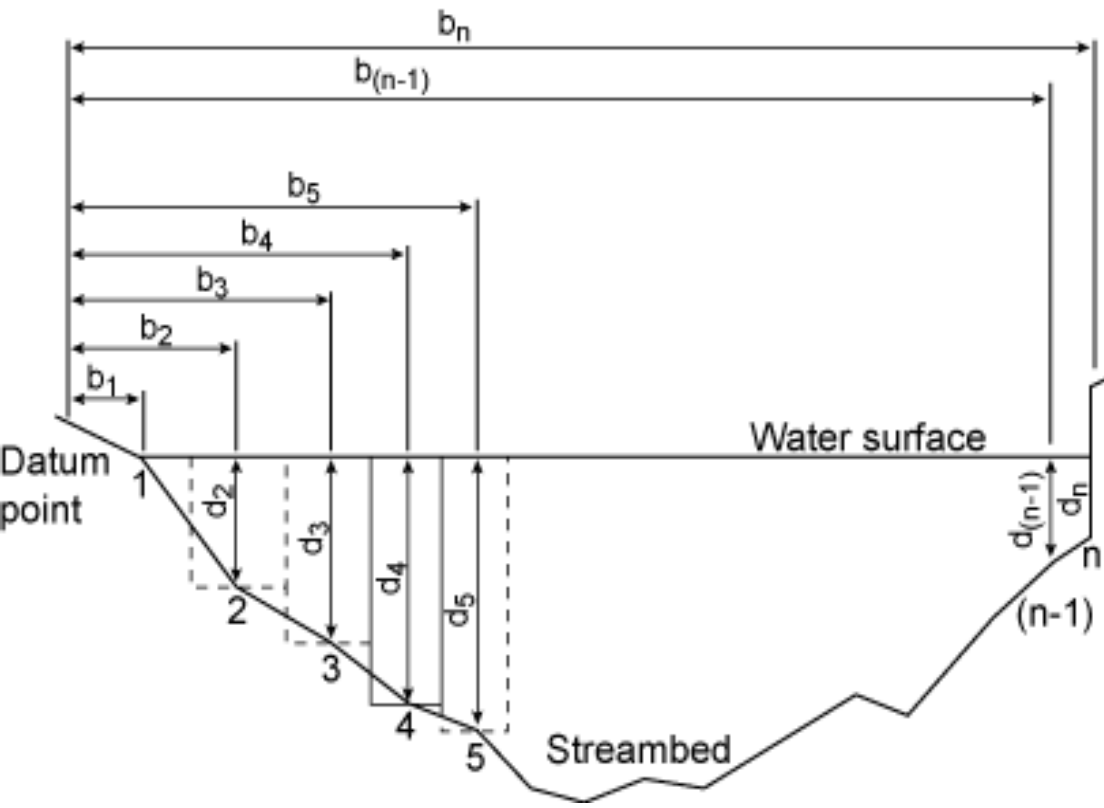
Metody měření jsou různé podle toho v jakých podmínkách se průtoky měří:

- 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
- měření povrchové rychlosti proudění
- objemová měření

HYDROMETROVÁNÍ



Legend

- 1,2,3....n Observation verticals
- $b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$ Distance, in feet or meters, from the initial point to the observation vertical
- $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ Depth of water, in feet or meters, at the observation vertical
- Dashed lines Boundaries of subsections

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

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

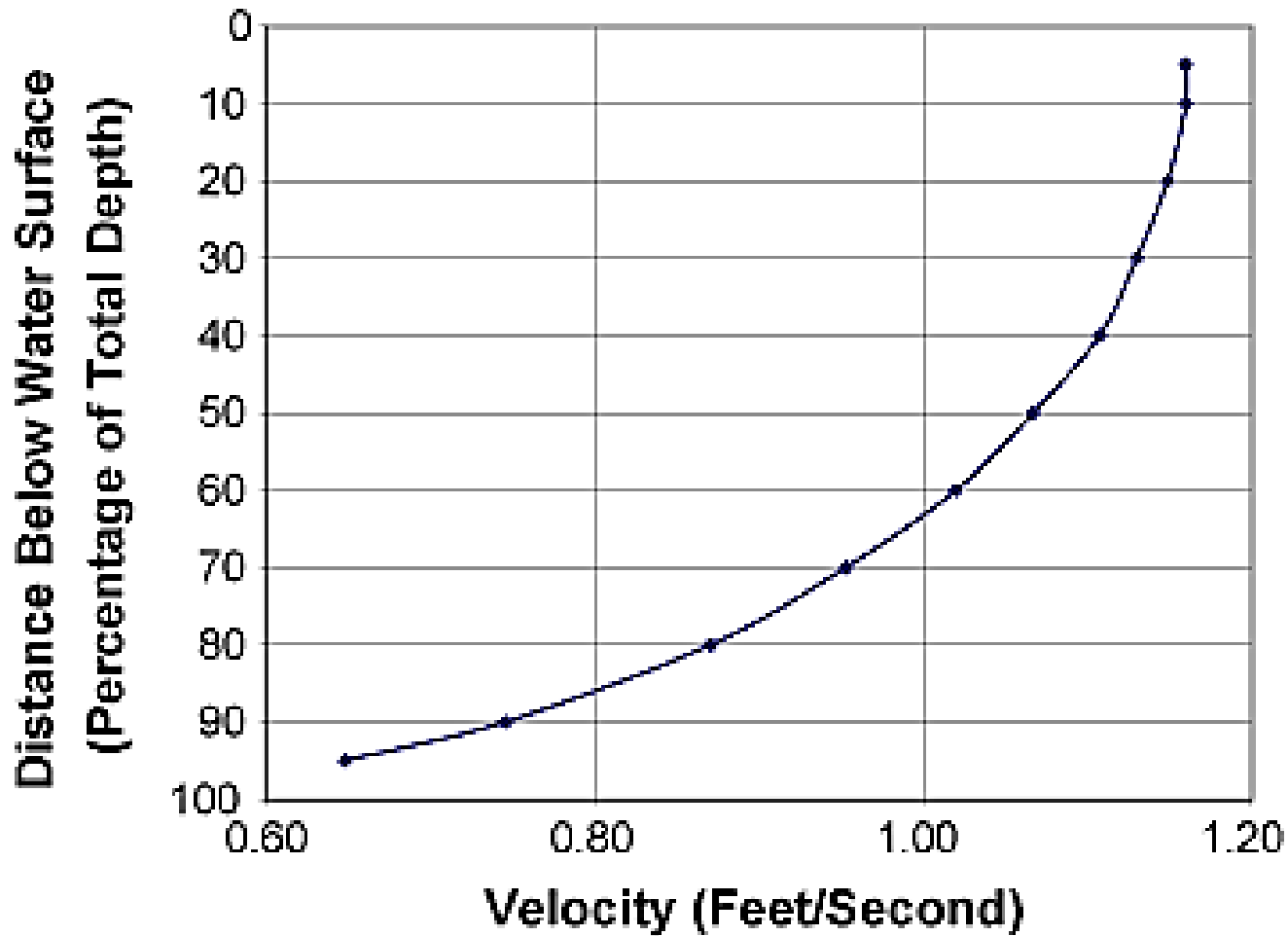
n = number of subsections dividing the stream cross-section

Jak změřit rychlost proudění?





Typická vertikální distribuce vektoru rychlosti ve vodním toku



Jak tedy určit průměrnou rychlost proudění?

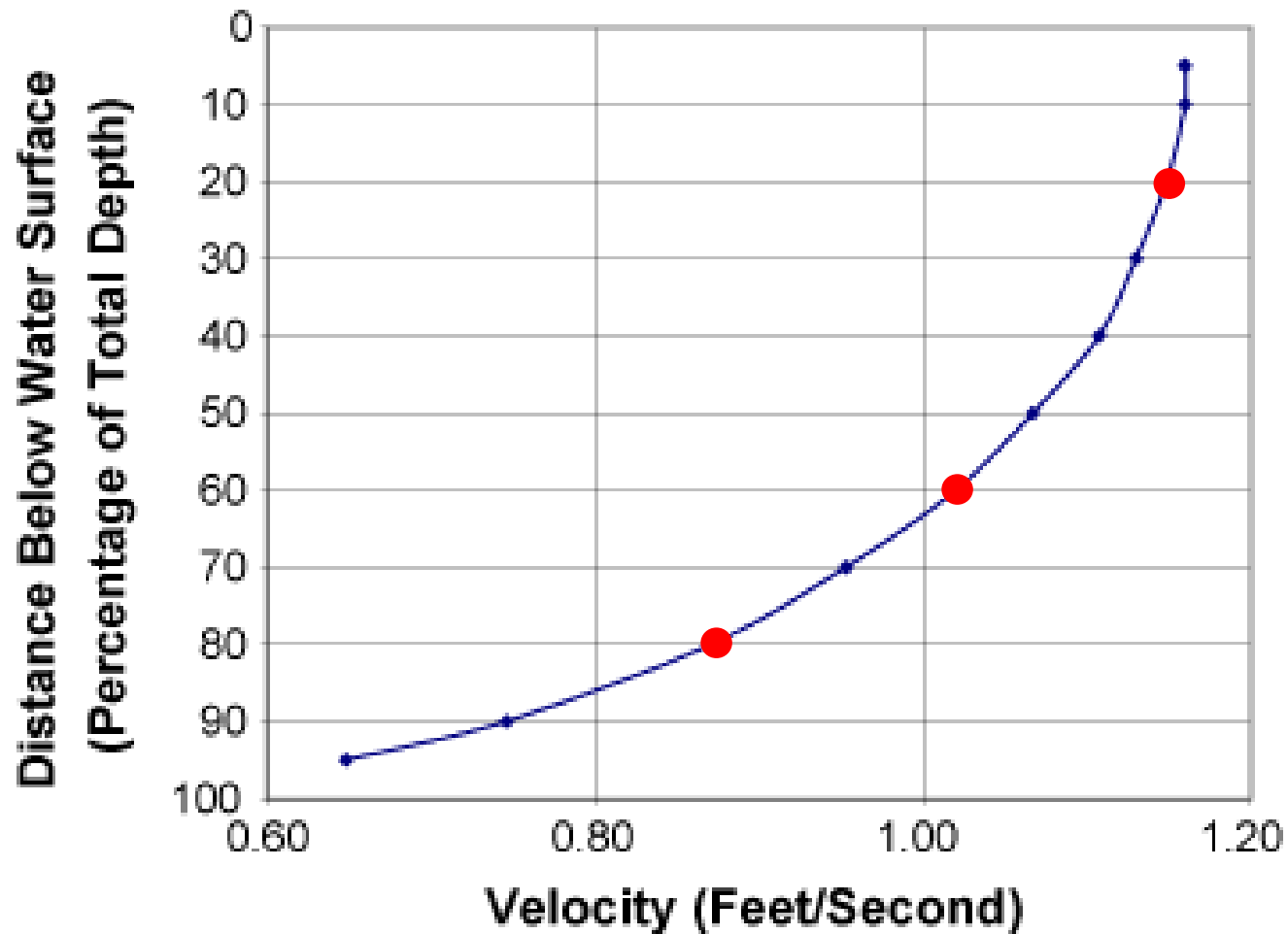
ideálně měření v každém 0.1 násobku hloubky vodoteče (mezi 0.1 – 0.9)

- **jednobodové měření** $H < 0,25$ m
hodnota z hloubky 0,4 výšky vodního sloupce (bráno ode dna, tedy 0 = dno a 1 = hladina)
- **dvoubodové měření** $H 0,25-0,5$ m
hodnota z hloubek 0.2 a 0.8
- **tříbodové měření** $H 0,5-1$ m
hodnota z hloubek 0.2, 0.4 a 0.8
- **vícebodové měření** $H > 1$ m

Orientační metoda určení povrchové rychlosti proudu

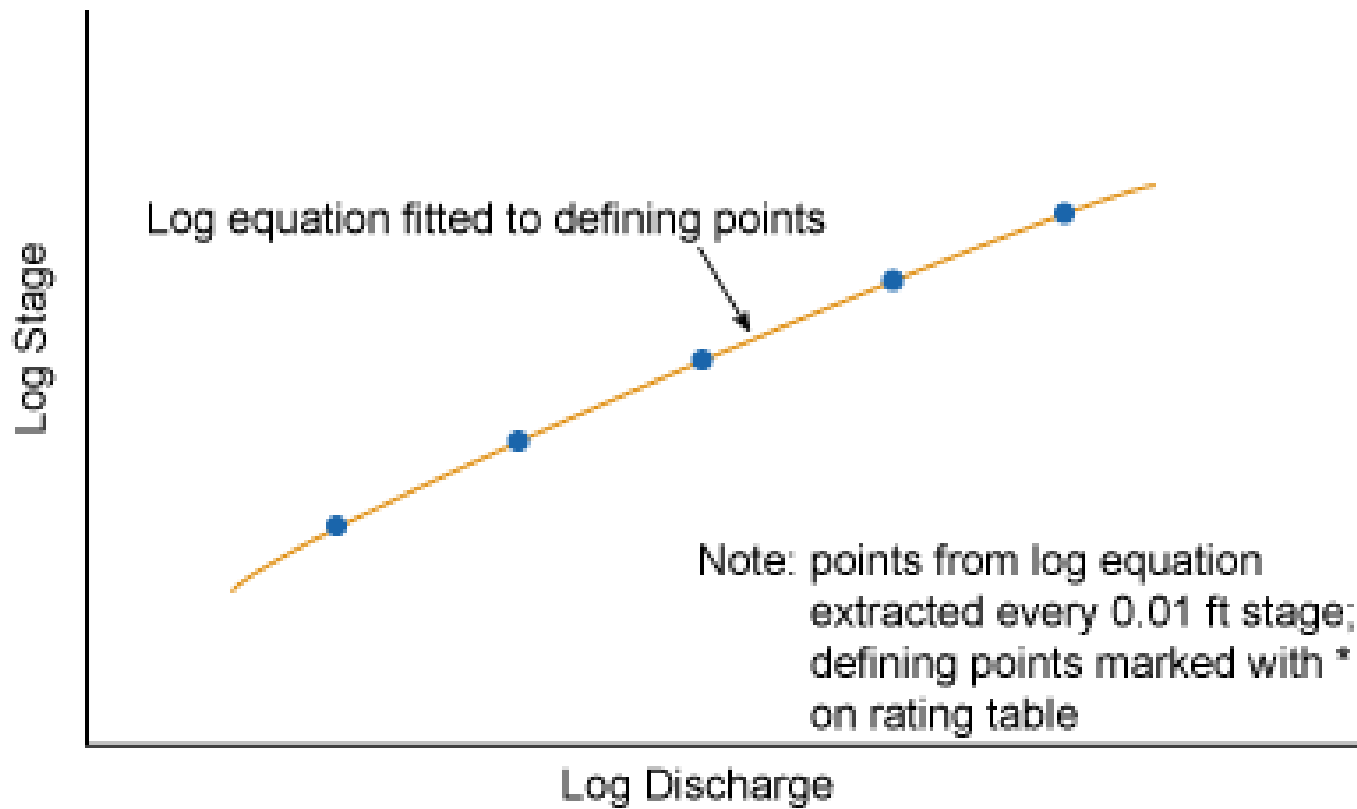
- splývající tělíska nebo optika
- přírodní koryta – násobení koeficientem 0.85
- klidné toky – násobení koeficientem 0.9

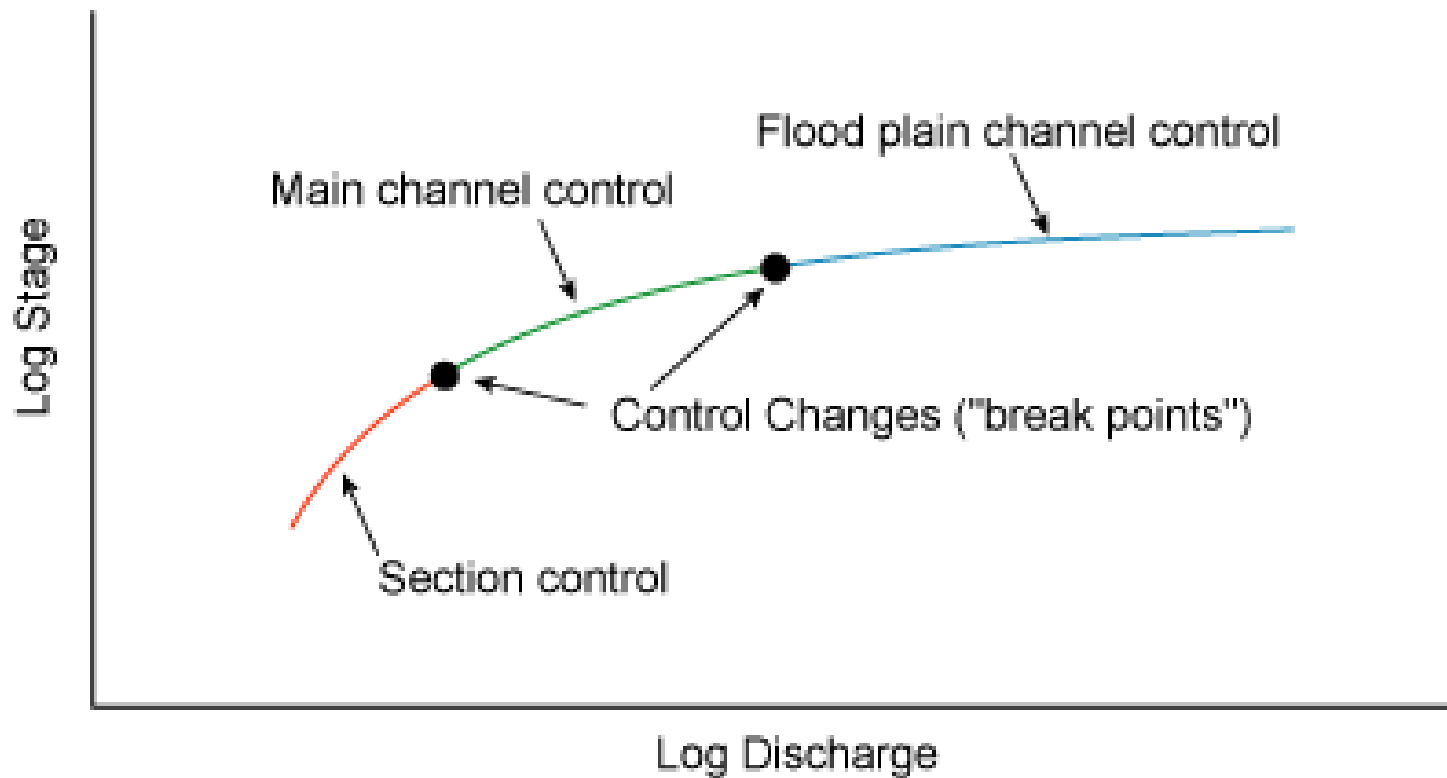
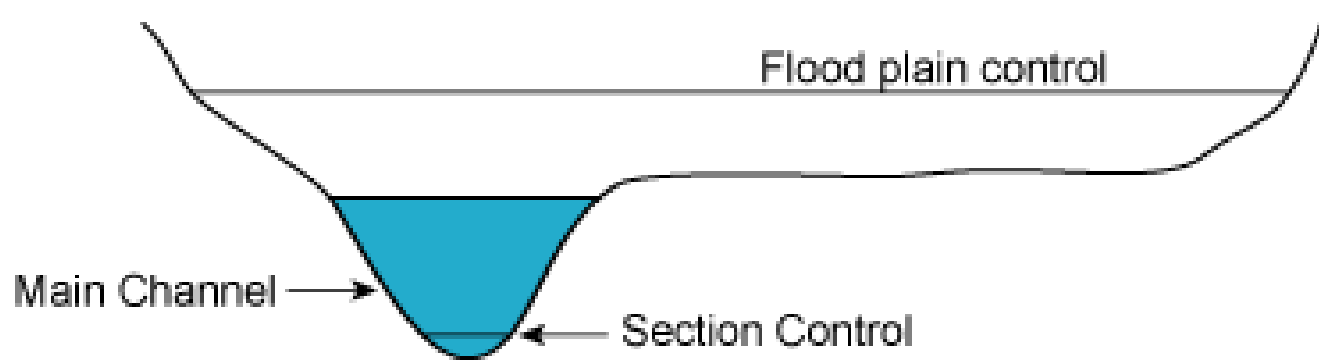
Měření rychlost proudu, metoda jednoho, dvou a tří bodů

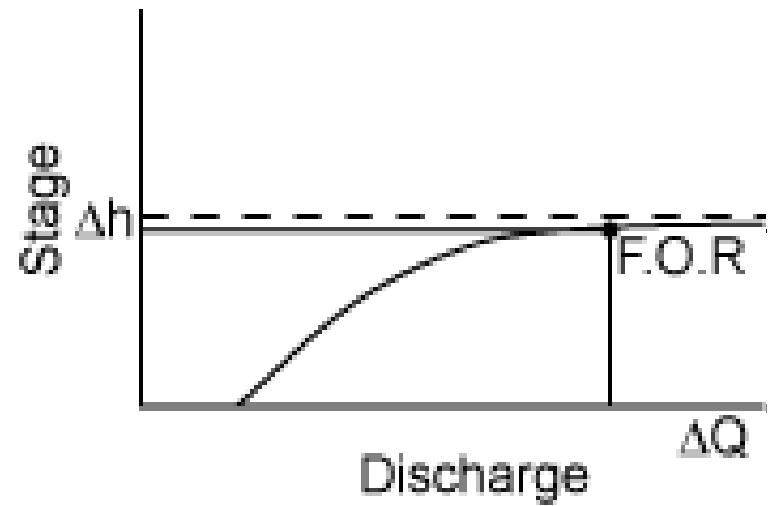
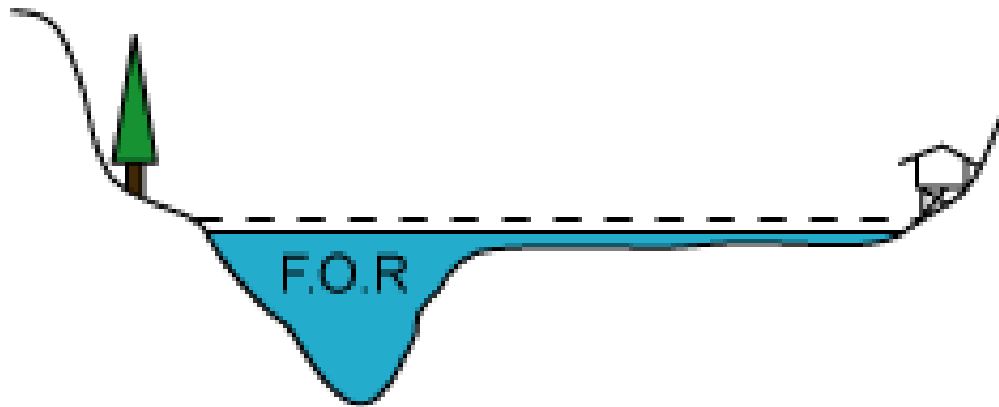
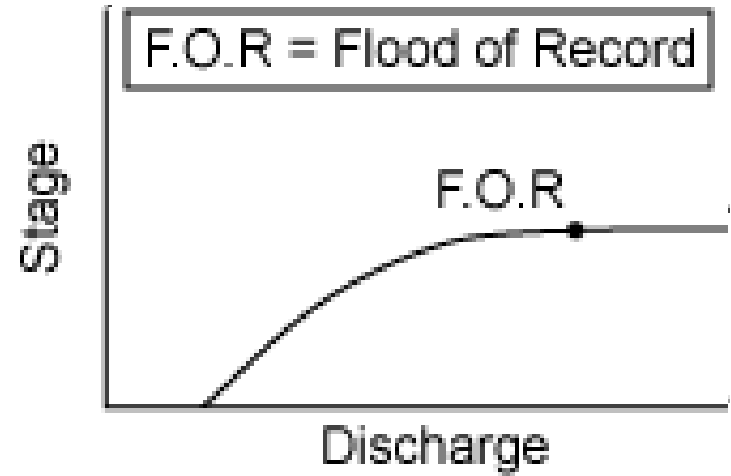
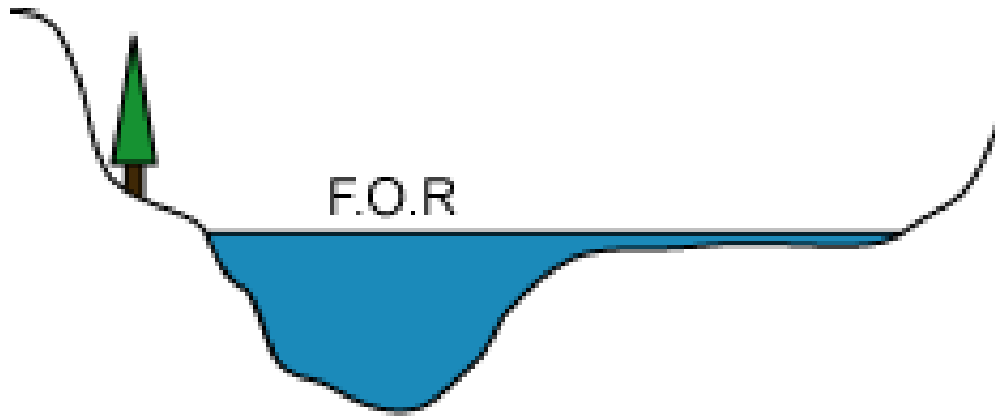


Základní výsledek hydrometrování – konzumpční křivka

- měrné profily
- měření průtoků při různých vodních stavech



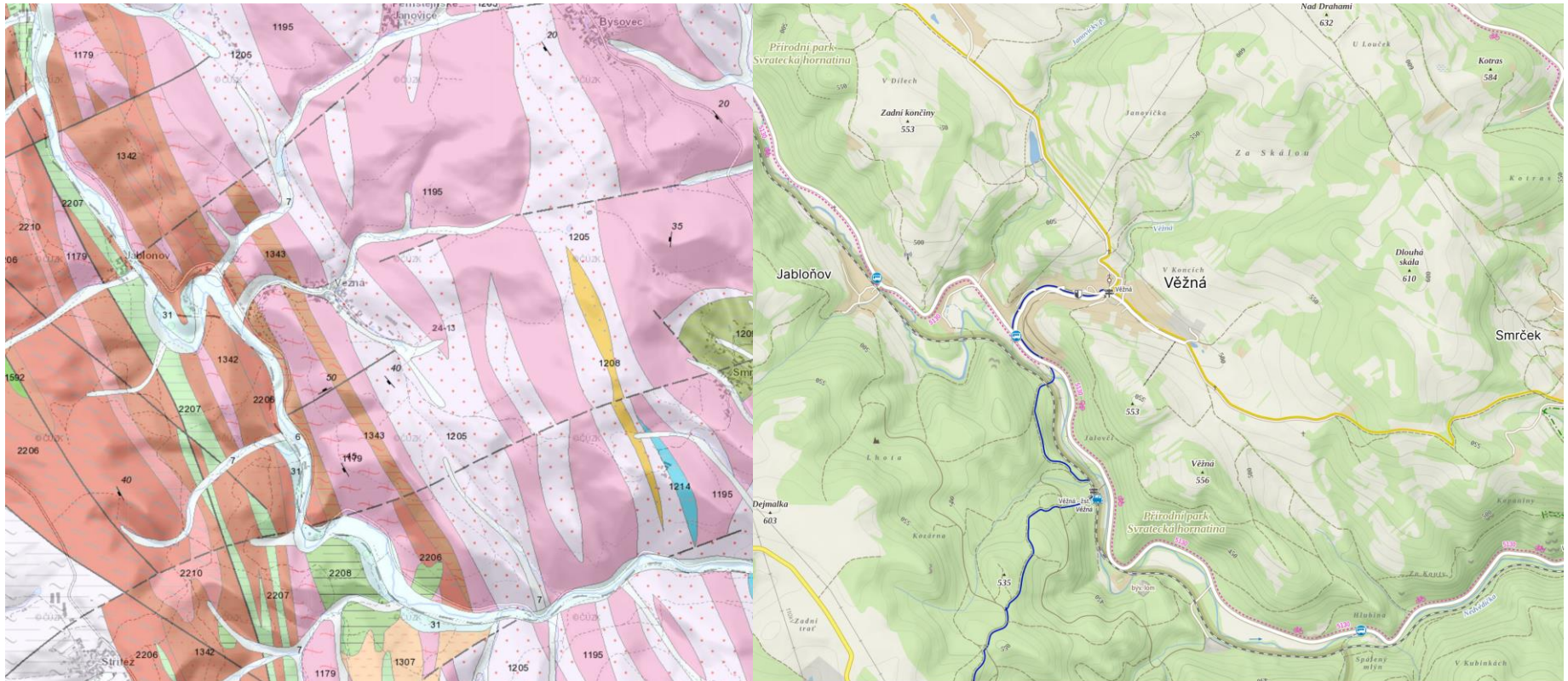




Kde měřit průtoky ve vodotečích?



optimálně před každým soutokem

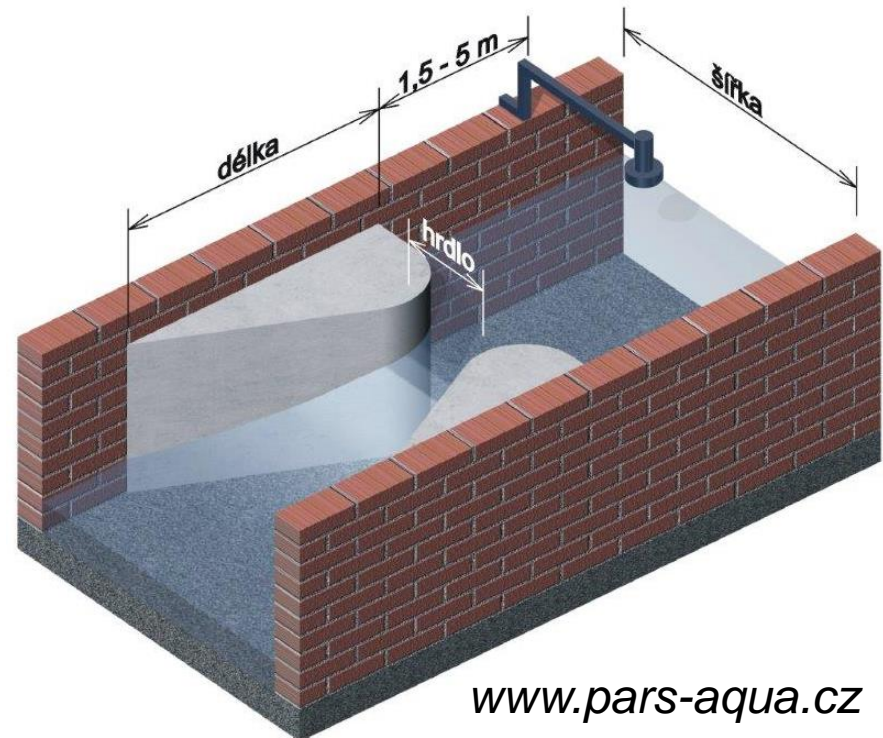


MĚRNÉ ŽLABY

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

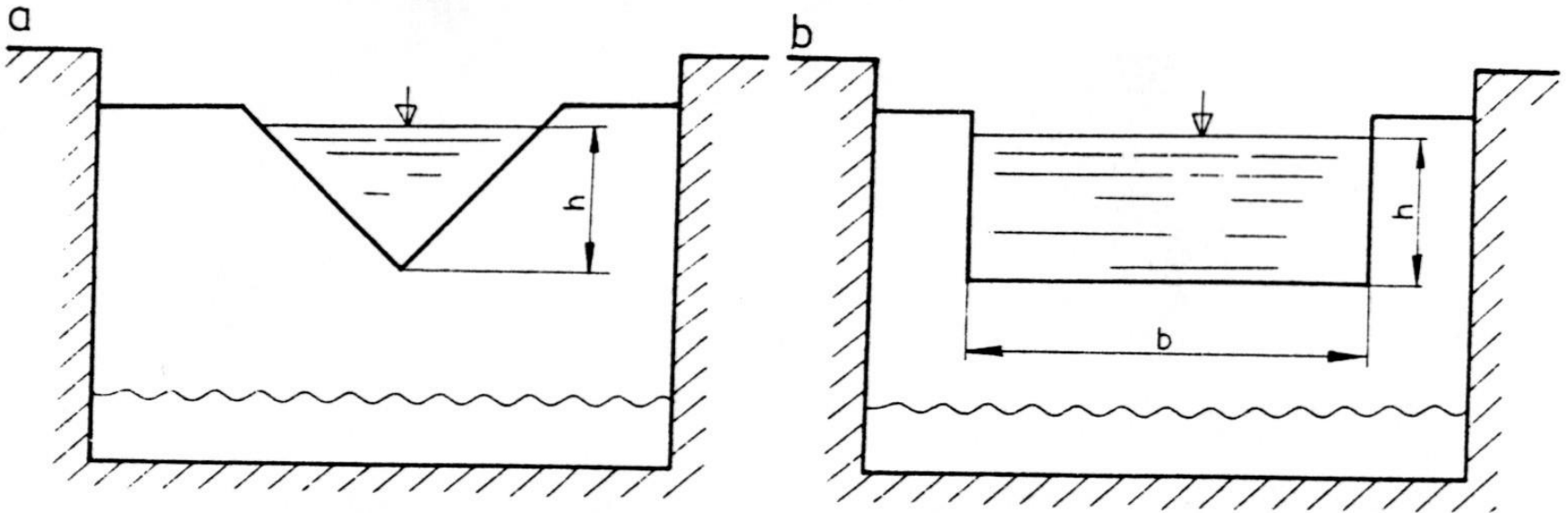
$$Q = \varphi \cdot b \cdot h_2 \cdot \sqrt{2g \cdot (h_1 - h_2)}$$

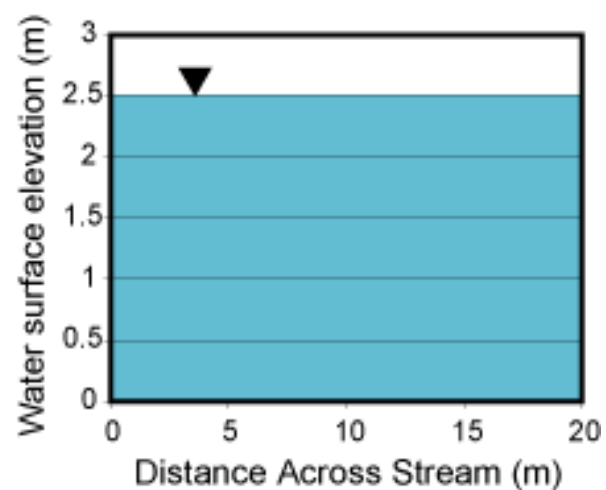
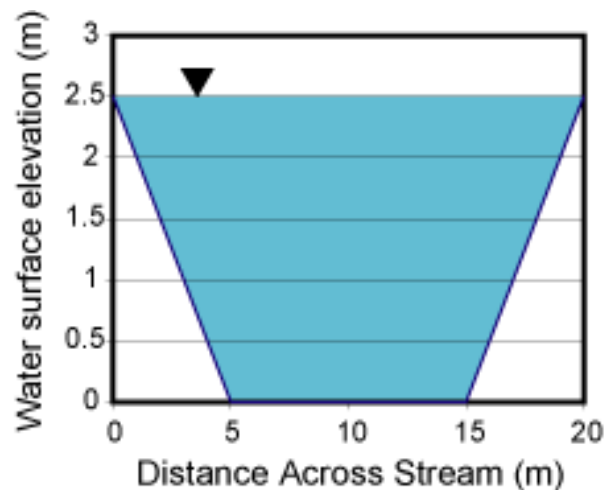
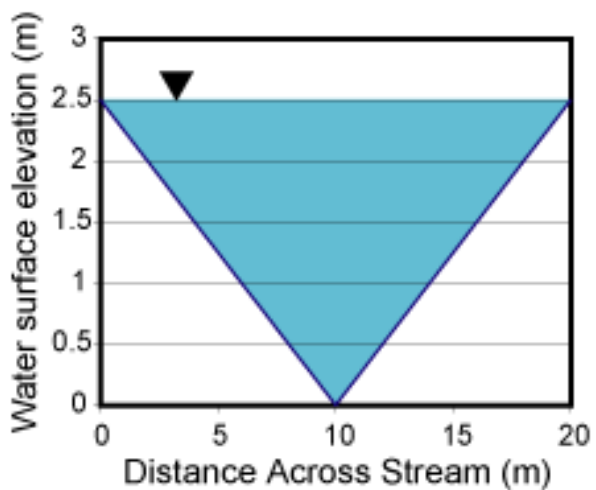
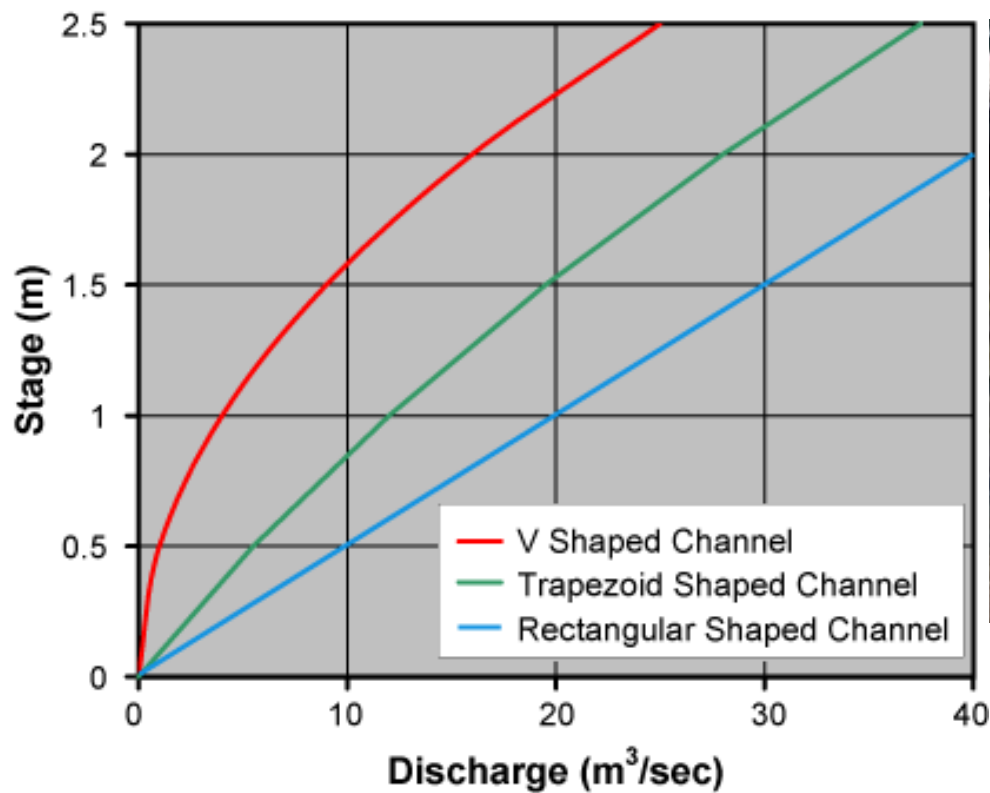
- kalibrace pro jednotlivé žlaby
- využití – instalace především při dlouhodobější exploataci, ČZ, apod.



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)

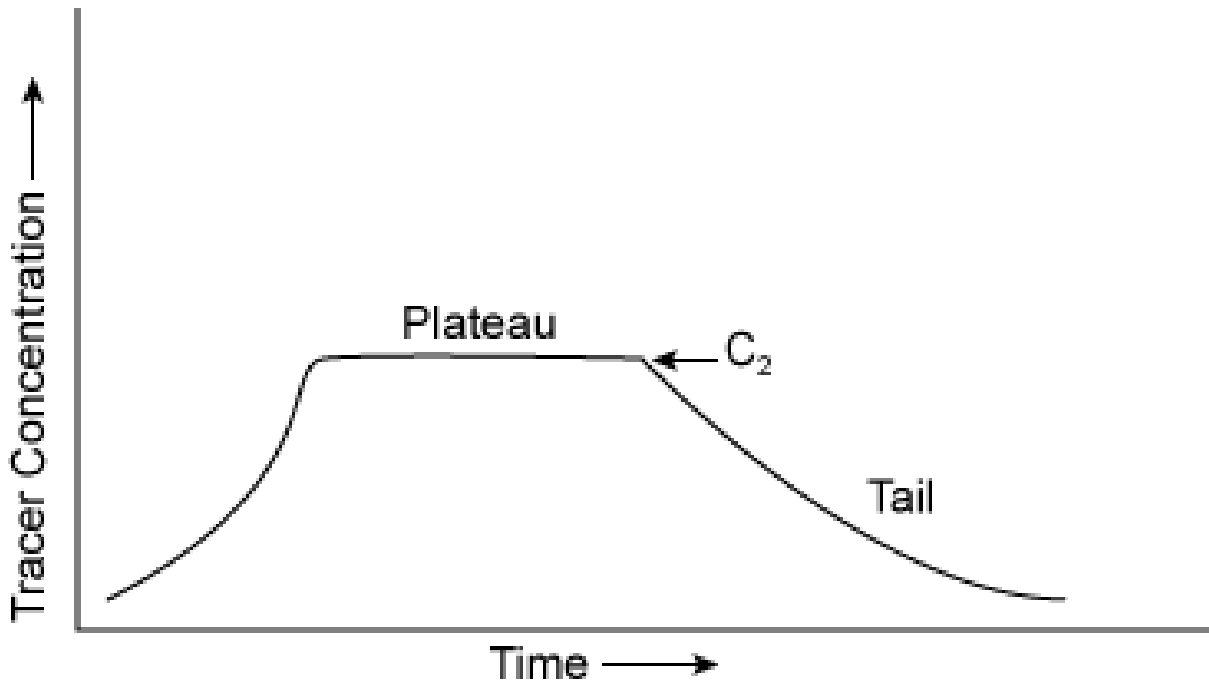
$$Q = 2/3 \cdot \mu \cdot b \sqrt{2g} \cdot h^{3/2}$$

$$\mu = 0,62$$



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

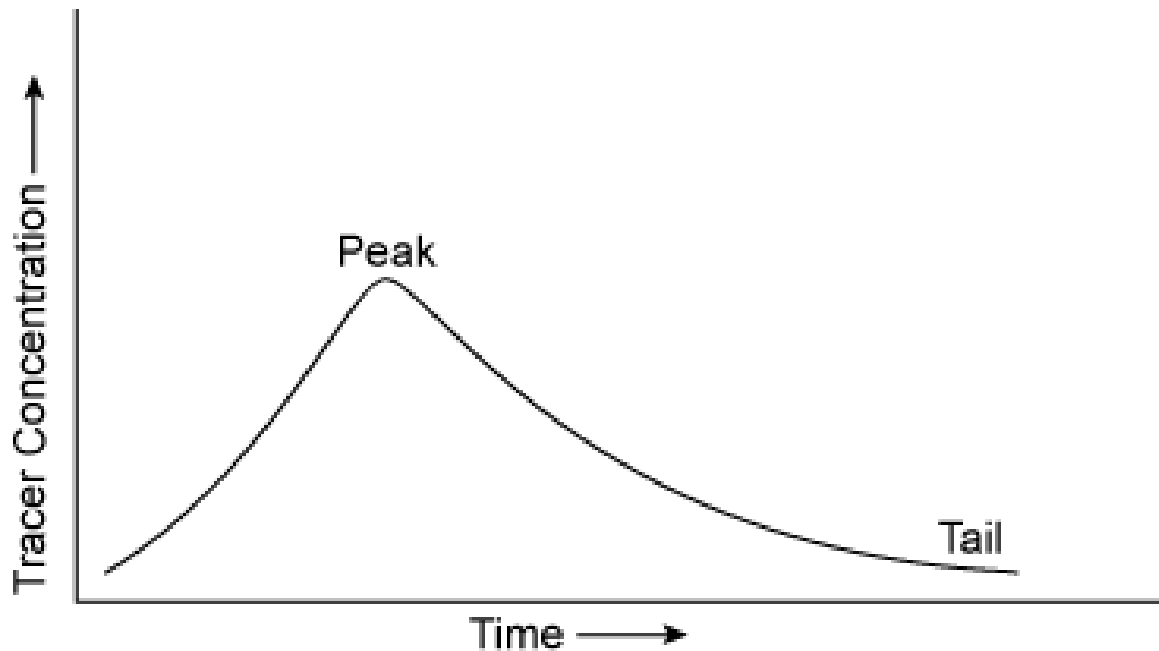


Určete průtok ve vodním toku, do kterého byl po dobu 30 s přidáno 100 l roztoku stopovače. Počáteční koncentrace stopovače ve vodním toku je nulová, koncentrace v roztoku byla 15 000 mg/l.

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

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



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

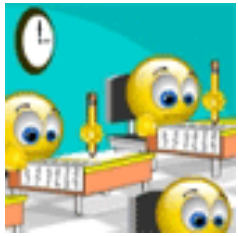
V - objem stopovače

C_0 - pozad'ová koncentrace

C_1 - koncentrace stopovače

C_2 - průměrná koncentrace stopovače v toku při průchodu měrným profilem

t - doba průchodu stopovače měrným profilem



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.

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

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:

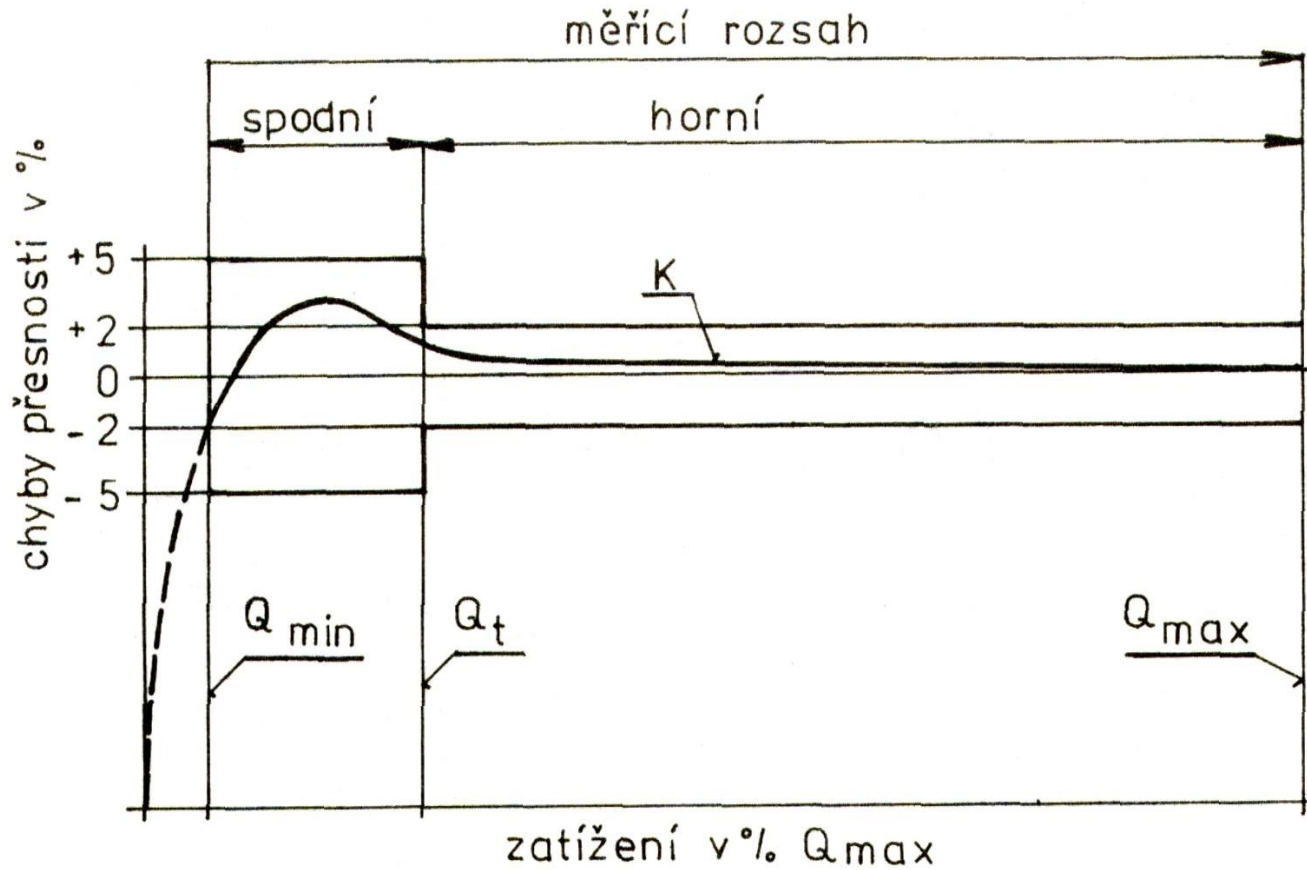
- floumetry – vertikální hydrometrické vrtule
- stopovací zkoušky
- termokarotáž – teplotní gradient ve vrtu, identifikace míst přítoku

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

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.)



zdroj: wikipedia