

# 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  $\pm 1$  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)**

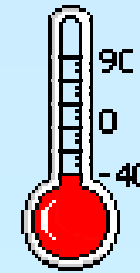
nejmenší změna měřené veličiny, která vyvolá zjistitelnou změnu údaje na přístroji

## **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 hladinoměrů 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

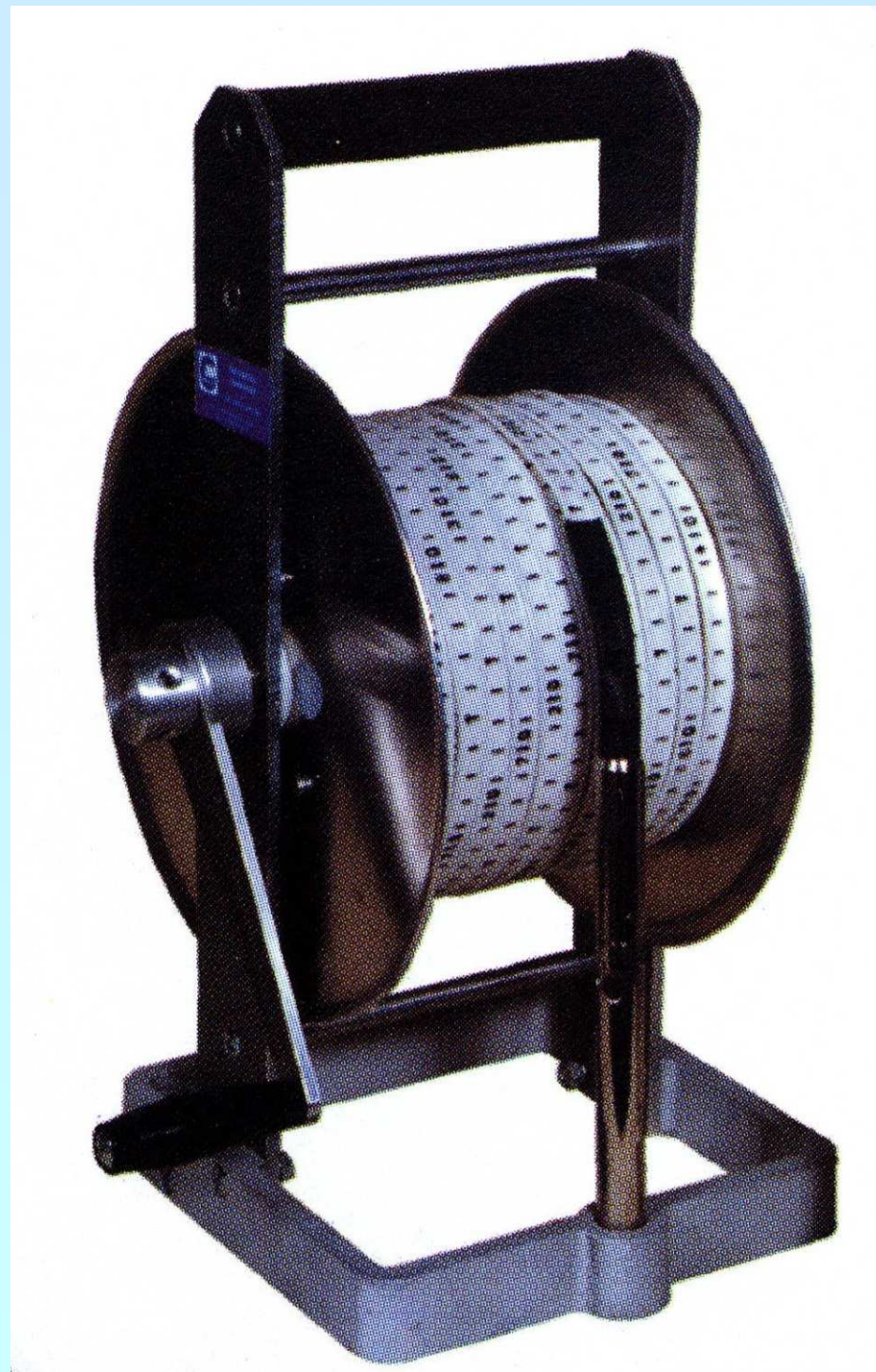
## **Elektrokontaktní**

- 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**

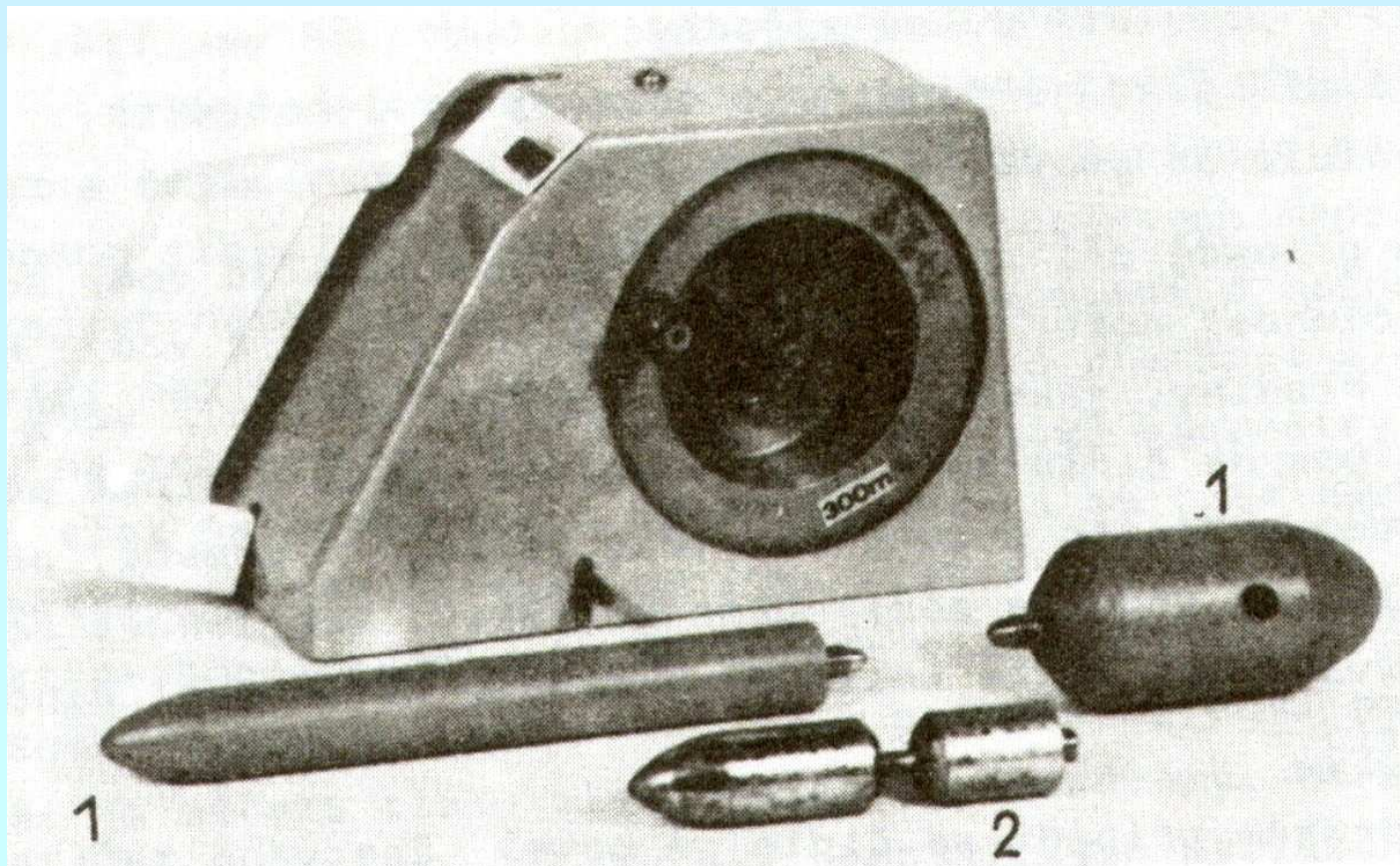
- rozlišení prostředí podle různého fotoodporu na čidlo
- velmi přesné ( $\pm 1$  mm) – ovlivněno vzlínáním
- průběžná měření – podobně jako elektrokotaktní

## **Ultrazvukové**

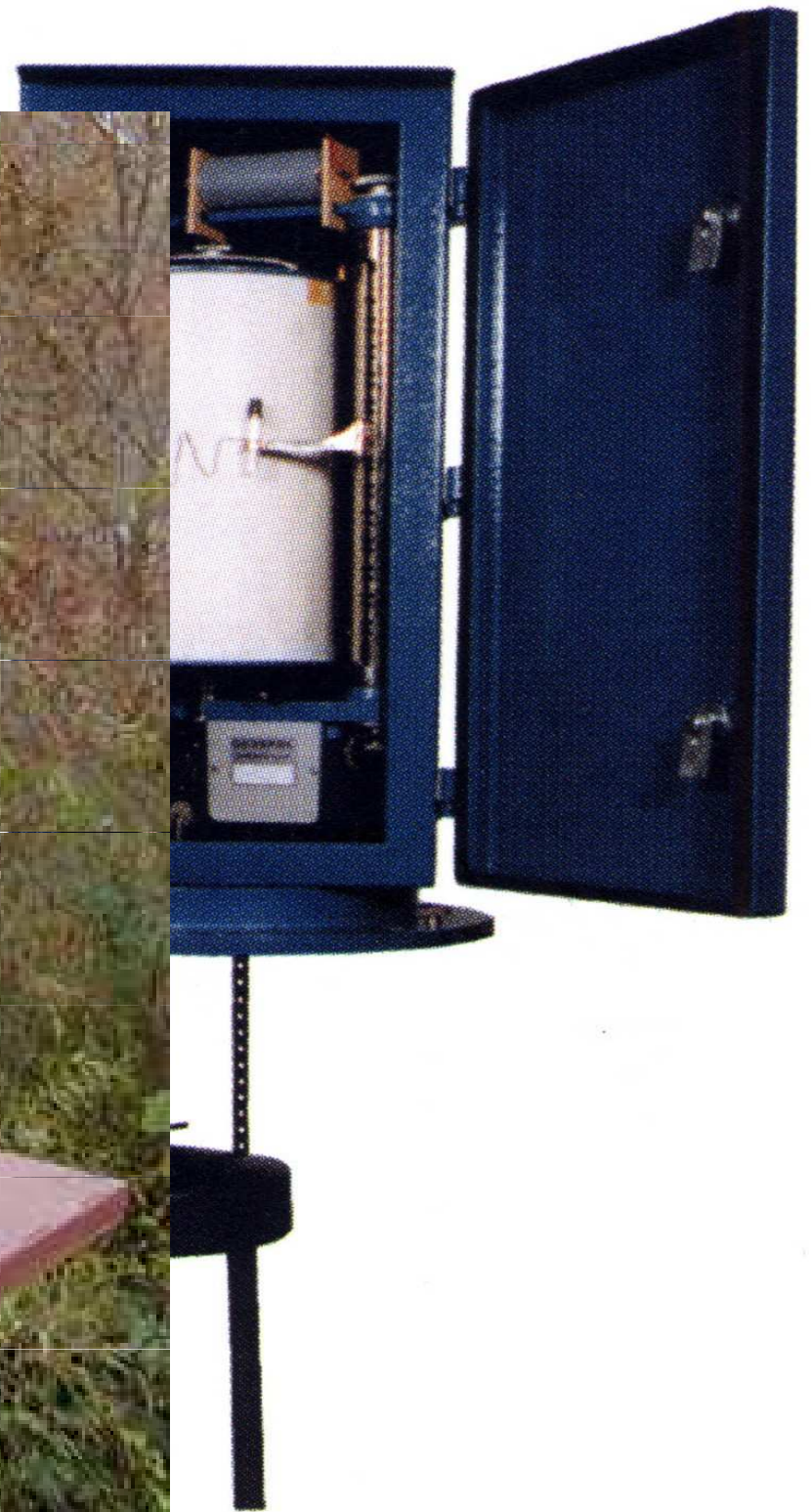
- měření času odraženého signálu od vodní hladiny
- velmi přesné
- málo používané

## Mechanické

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



# Plovákové

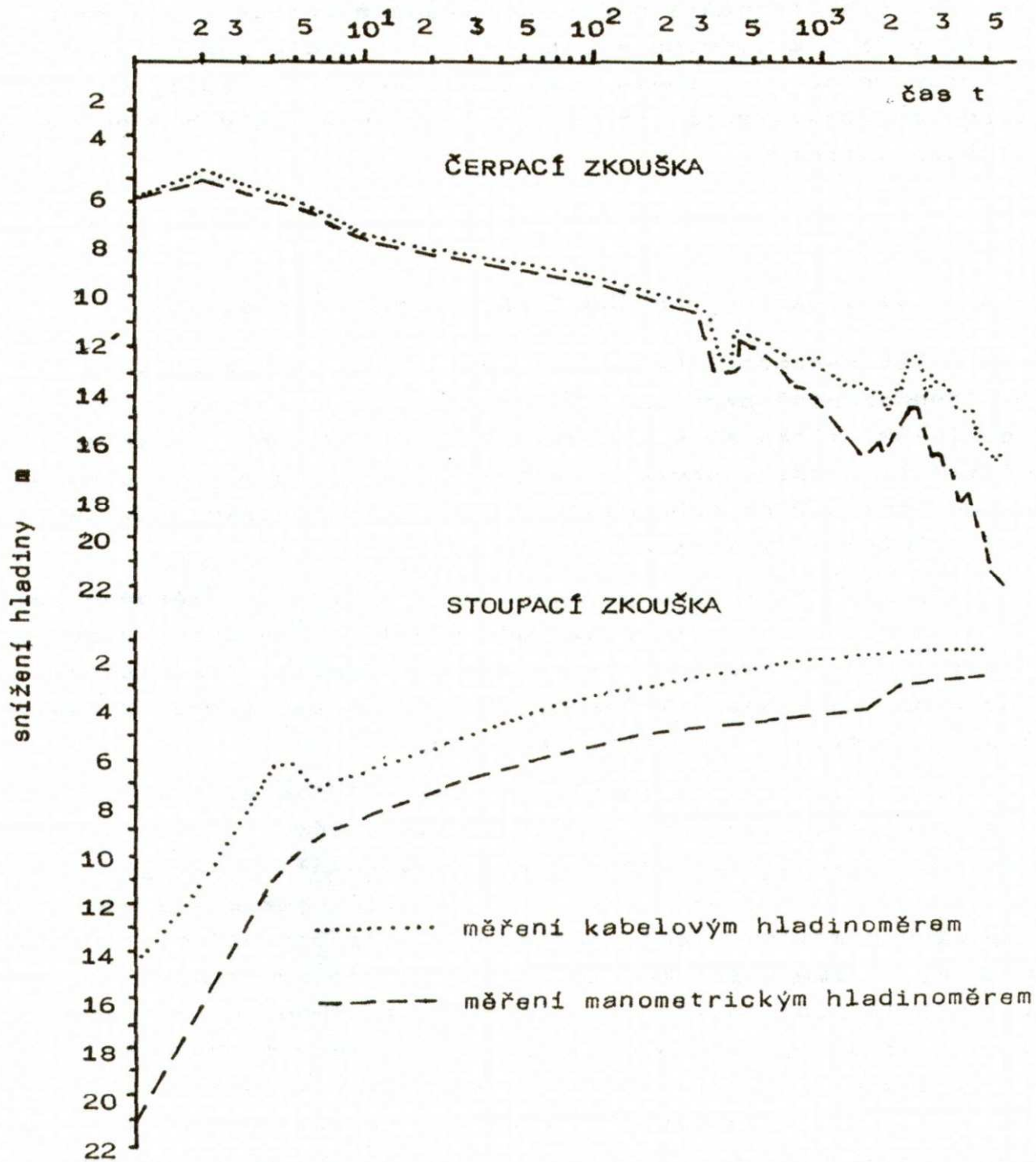




## Manometrické

- 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.)

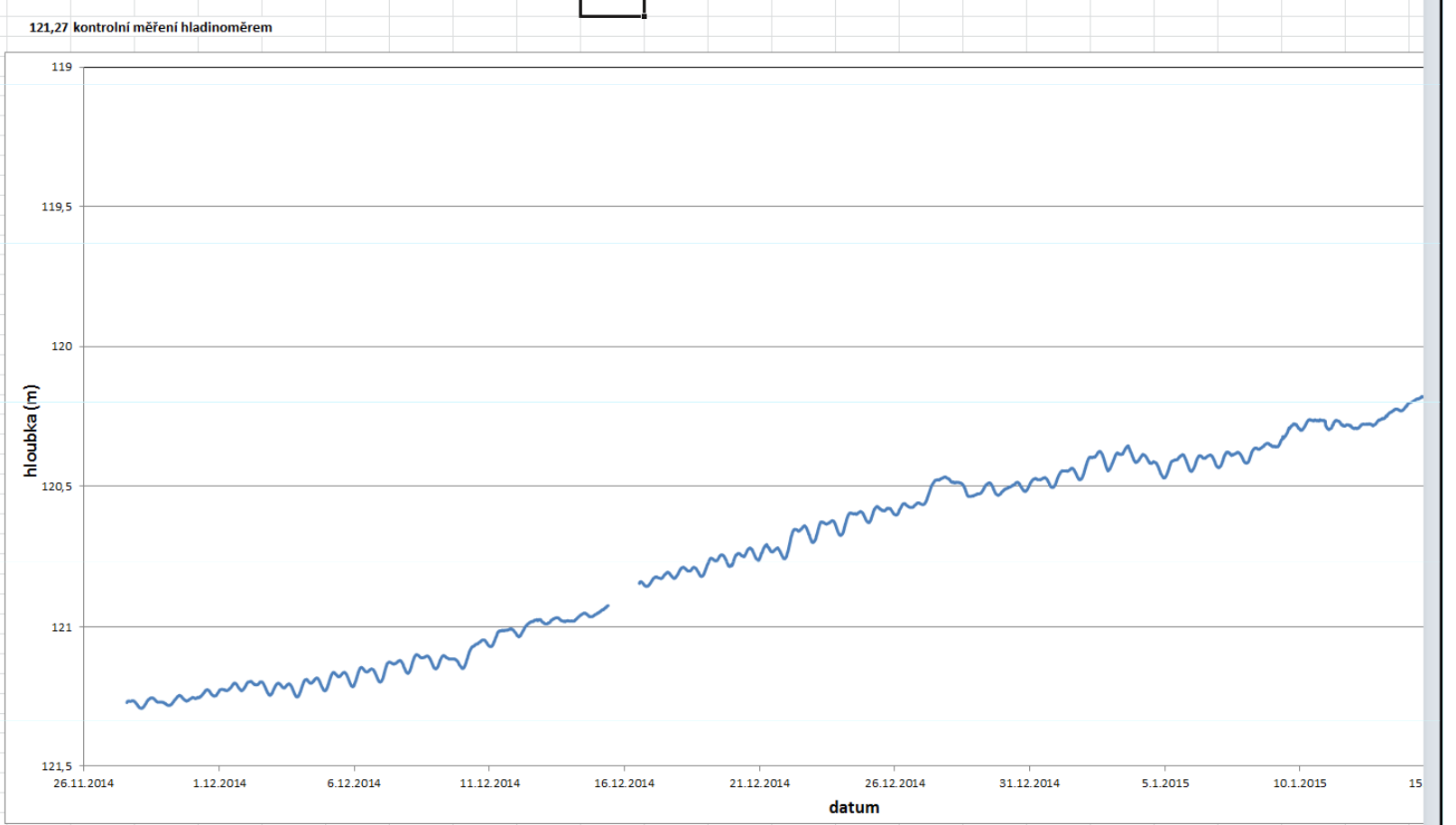




Pravitko  Řádek vzorců  Mřížka  Záhleví  
 Zobrazit vedle sebe  Synchronní posuv  Zobrazit  Uložit pracovní prostor  Přepnout okna  Makra

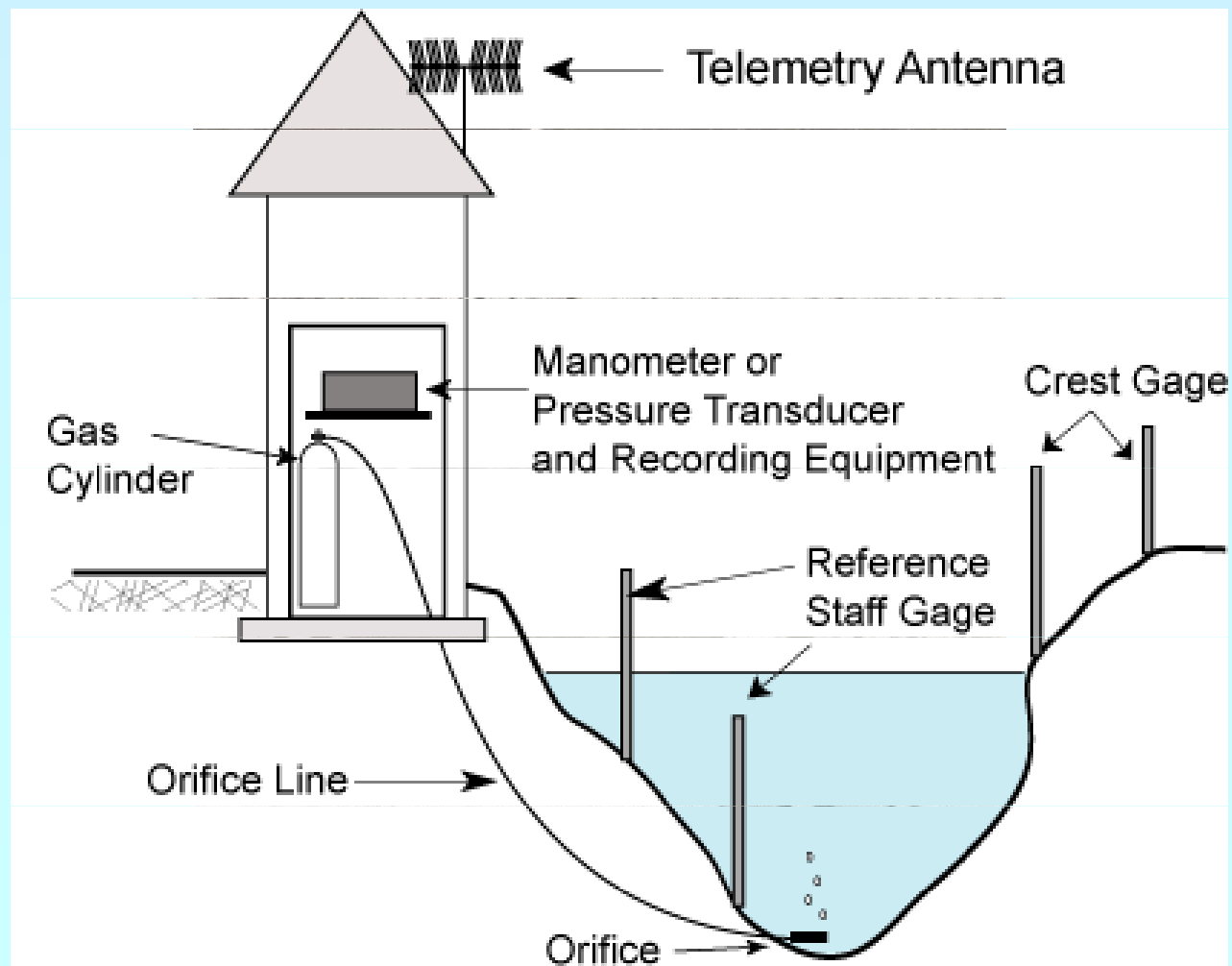
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB
1																												
2																												
3																												
4	čas	hladina	teplota		hloubka (m)																							

5	27.11.2014 14:00	3,915	20,5		121,27
6	27.11.2014 14:15	3,917	20,6		121,268
7	27.11.2014 14:30	3,919	20,6		121,266
8	27.11.2014 14:45	3,92	20,6		121,265
9	27.11.2014 15:00	3,92	20,6		121,265
10	27.11.2014 15:15	3,92	20,6		121,265
11	27.11.2014 15:30	3,92	20,6		121,265
12	27.11.2014 15:45	3,92	20,6		121,265
13	27.11.2014 16:00	3,921	20,6		121,264
14	27.11.2014 16:15	3,92	20,6		121,265
15	27.11.2014 16:30	3,92	20,6		121,265
16	27.11.2014 16:45	3,919	20,6		121,266
17	27.11.2014 17:00	3,919	20,6		121,266
18	27.11.2014 17:15	3,919	20,6		121,266
19	27.11.2014 17:30	3,92	20,6		121,265
20	27.11.2014 17:45	3,92	20,6		121,265
21	27.11.2014 18:00	3,92	20,6		121,265
22	27.11.2014 18:15	3,921	20,6		121,264
23	27.11.2014 18:30	3,922	20,6		121,263
24	27.11.2014 18:45	3,921	20,6		121,264
25	27.11.2014 19:00	3,921	20,6		121,264
26	27.11.2014 19:15	3,922	20,6		121,263
27	27.11.2014 19:30	3,922	20,6		121,263
28	27.11.2014 19:45	3,921	20,6		121,264
29	27.11.2014 20:00	3,921	20,6		121,264
30	27.11.2014 20:15	3,921	20,6		121,264
31	27.11.2014 20:30	3,92	20,6		121,265
32	27.11.2014 20:45	3,919	20,6		121,266
33	27.11.2014 21:00	3,918	20,6		121,267
34	27.11.2014 21:15	3,917	20,6		121,268
35	27.11.2014 21:30	3,916	20,6		121,269
36	27.11.2014 21:45	3,915	20,6		121,27
37	27.11.2014 22:00	3,914	20,6		121,271
38	27.11.2014 22:15	3,912	20,6		121,273
39	27.11.2014 22:30	3,911	20,6		121,274
40	27.11.2014 22:45	3,91	20,6		121,275
41	27.11.2014 23:00	3,909	20,6		121,276
42	27.11.2014 23:15	3,907	20,6		121,278
43	27.11.2014 23:30	3,906	20,6		121,279
44	27.11.2014 23:45	3,903	20,6		121,282
45	28.11.2014 0:00	3,903	20,6		121,282
46	28.11.2014 0:15	3,902	20,6		121,283
47	28.11.2014 0:30	3,9	20,6		121,285
48	28.11.2014 0:45	3,898	20,6		121,287
49	28.11.2014 1:00	3,898	20,6		121,287



## 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 přetéající 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

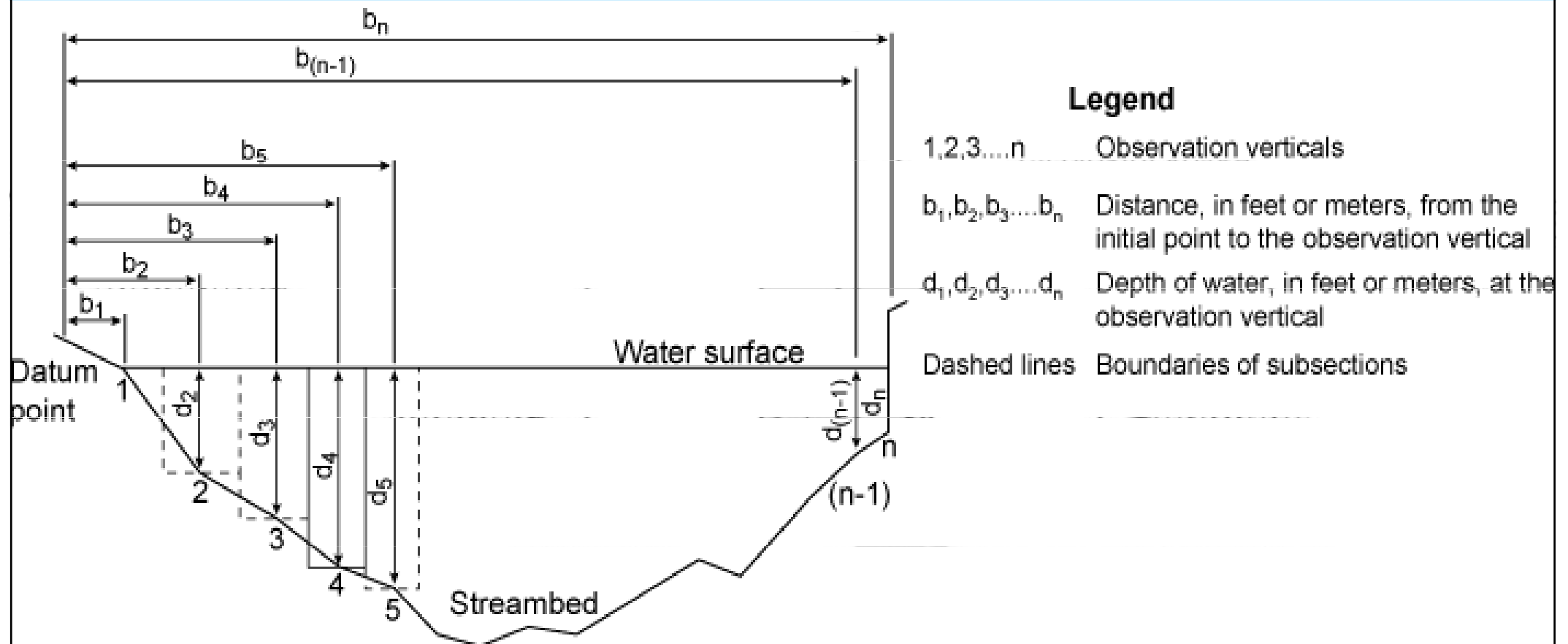
**Metody měření jsou různé podle toho v jakých podmínkách se průtoky měří:**

- 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  $i$

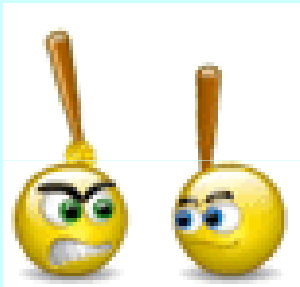
$b_i$  = distance from shoreline datum to center of subsection  $i$

$n$  = number of subsections dividing the stream cross-section

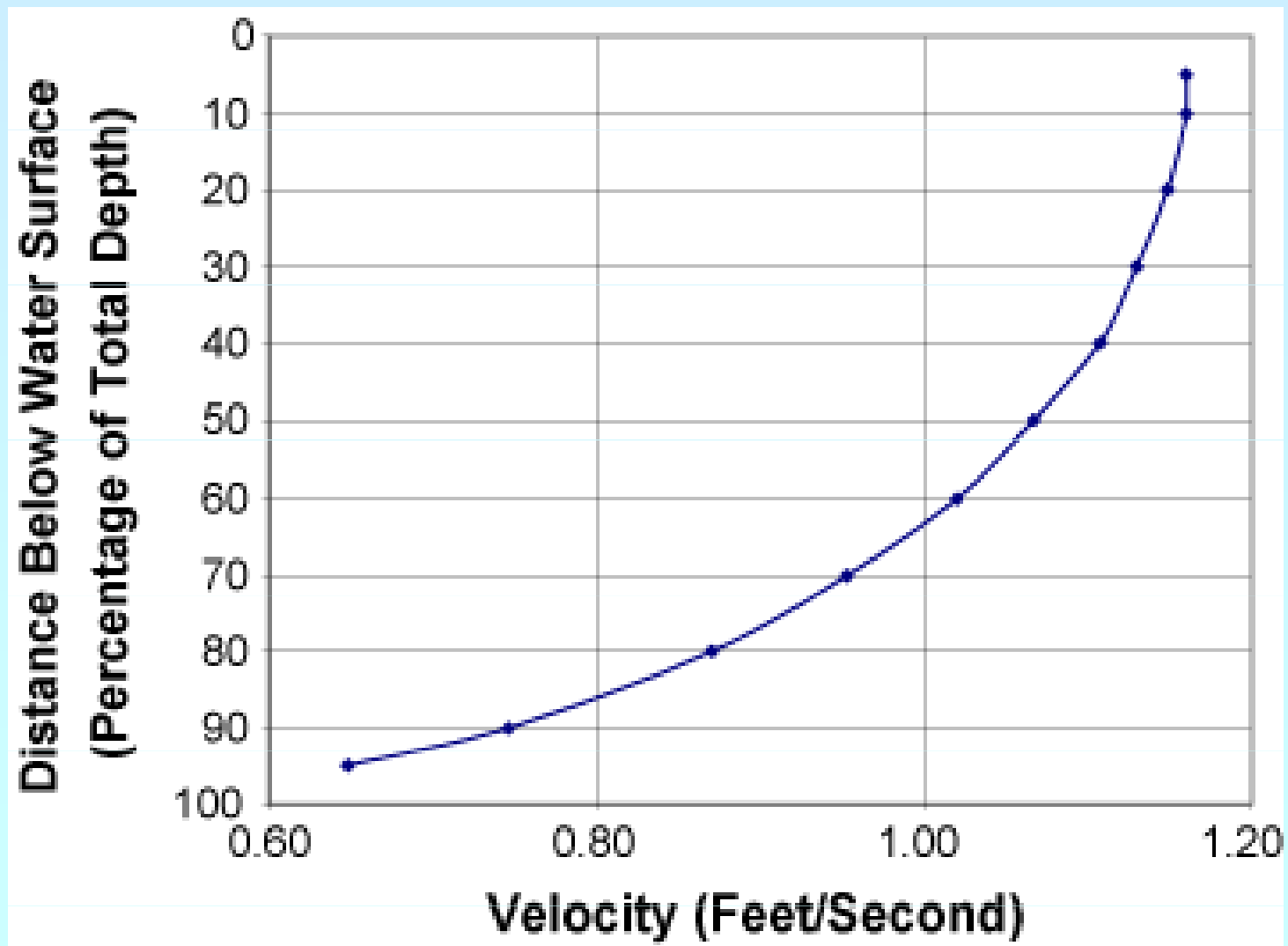


Jak změřit rychlost proudění?

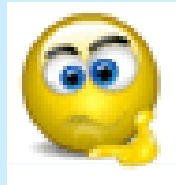




# Typická vertikální distribuce vektoru rychlosti ve vodním toku



# 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**

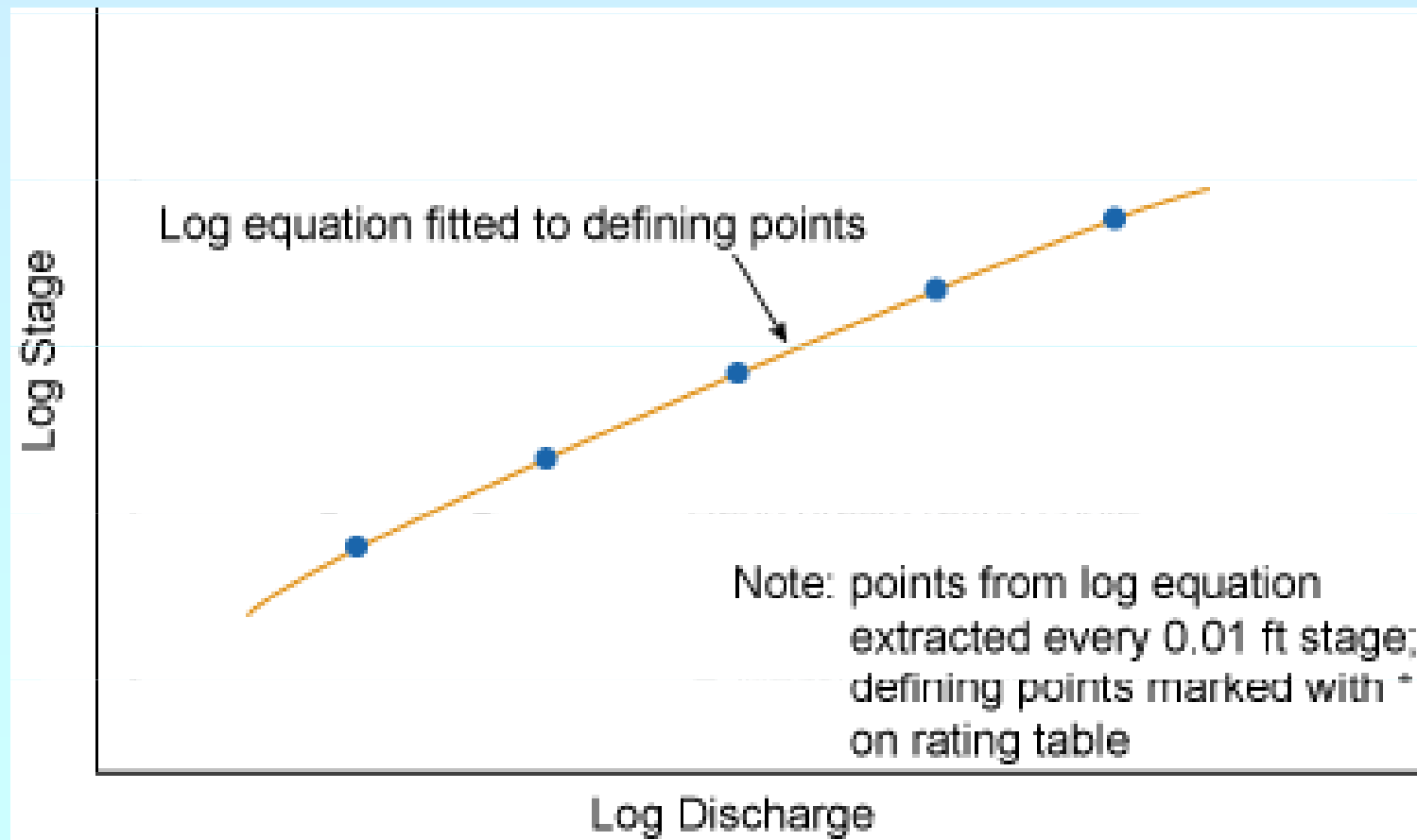
- $V_{str} = (V_{0.2} + V_{0.8})/4 + (V_{0.6})/2$
- vhodné zejména pro hlubší vodoteče

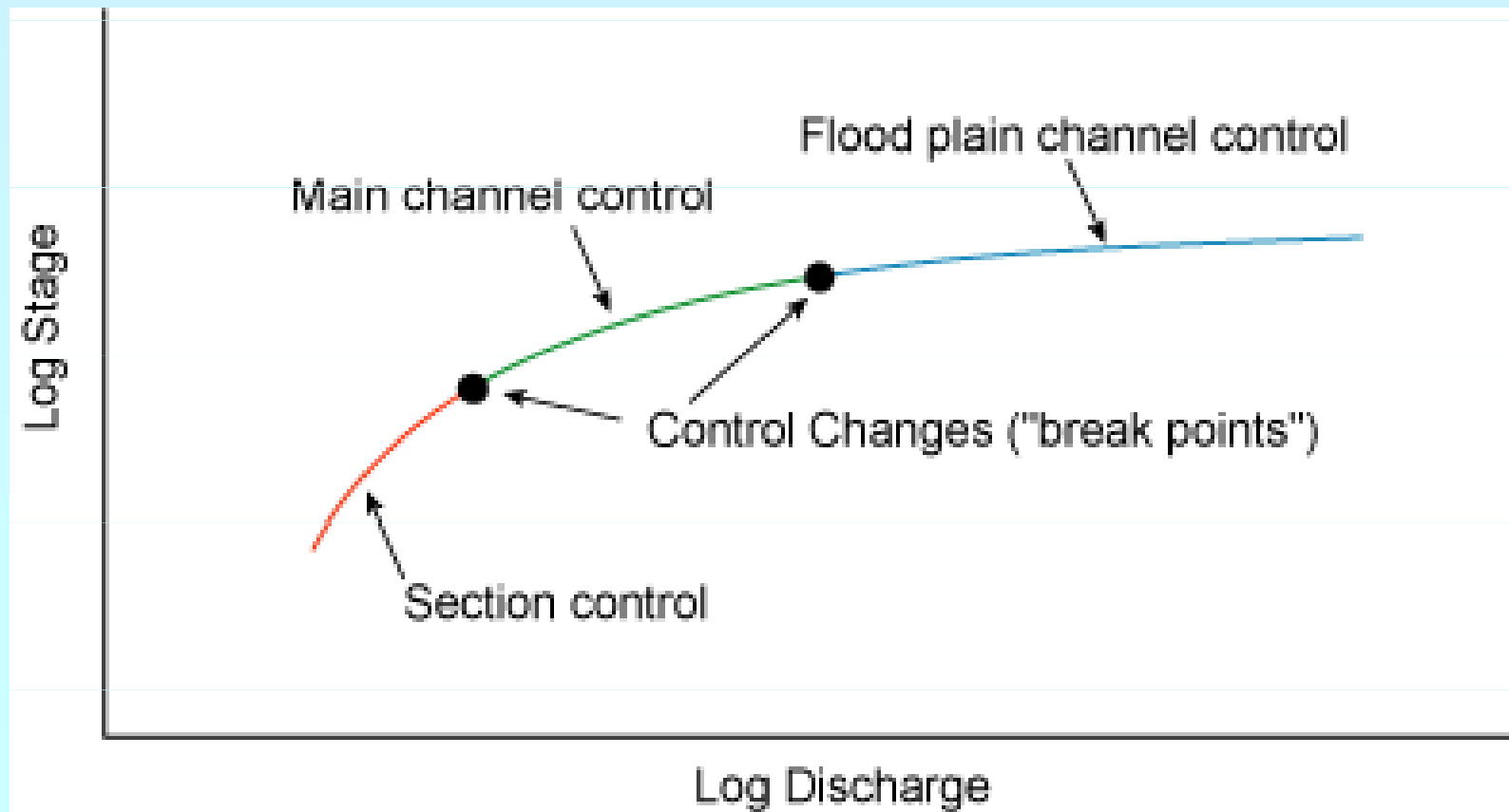
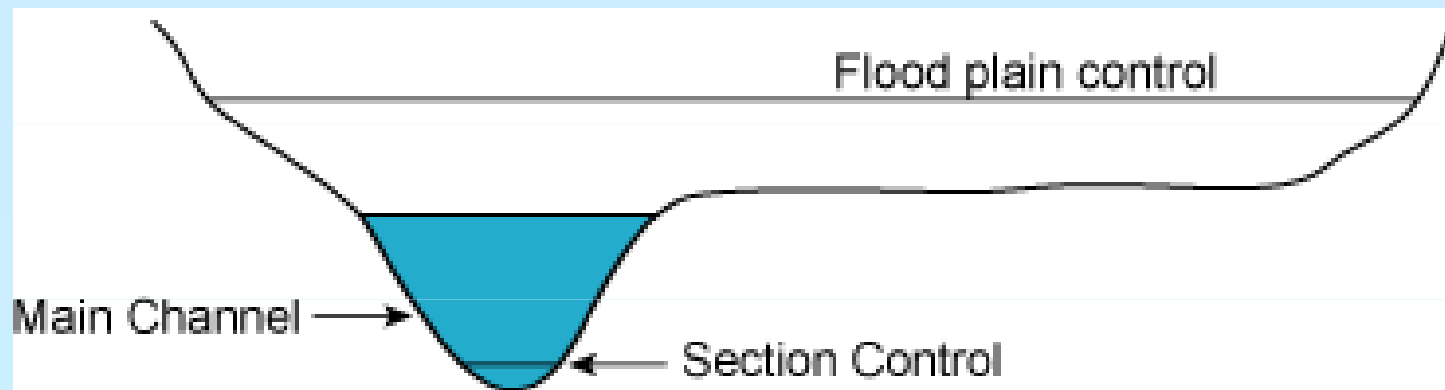
- **metoda určení povrchové rychlosti (splývající tělíska nebo optika)**

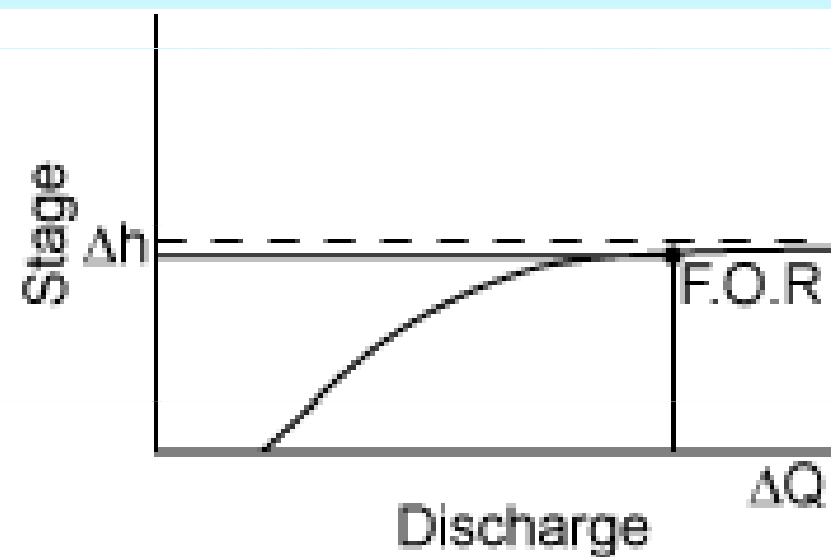
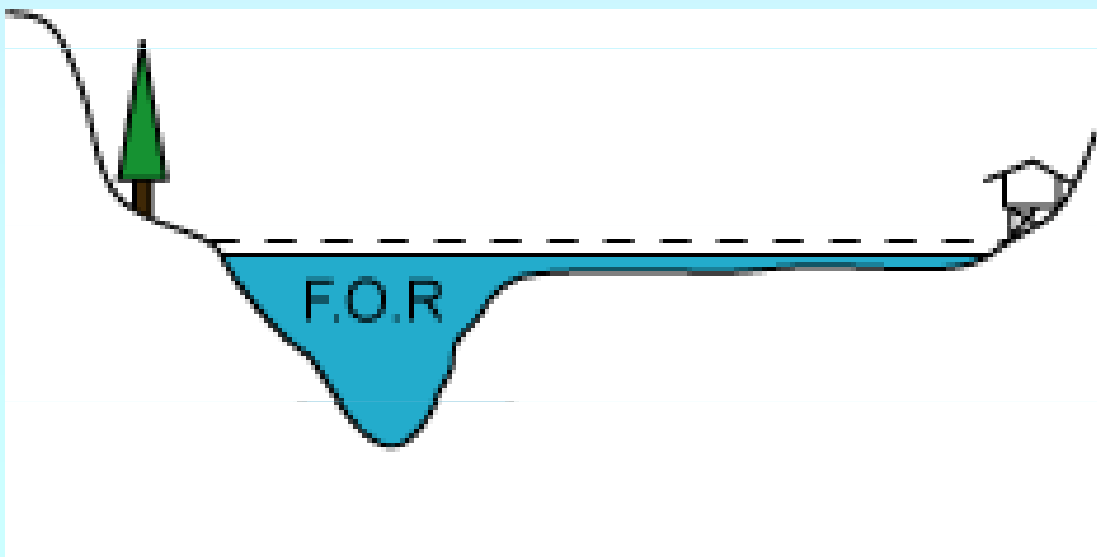
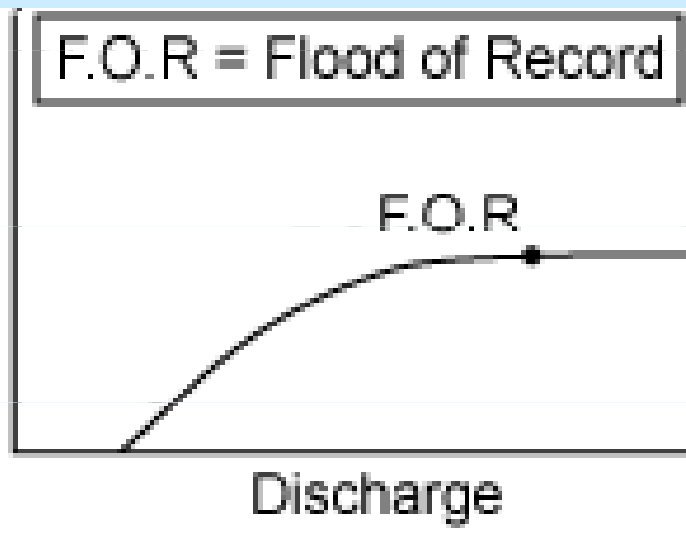
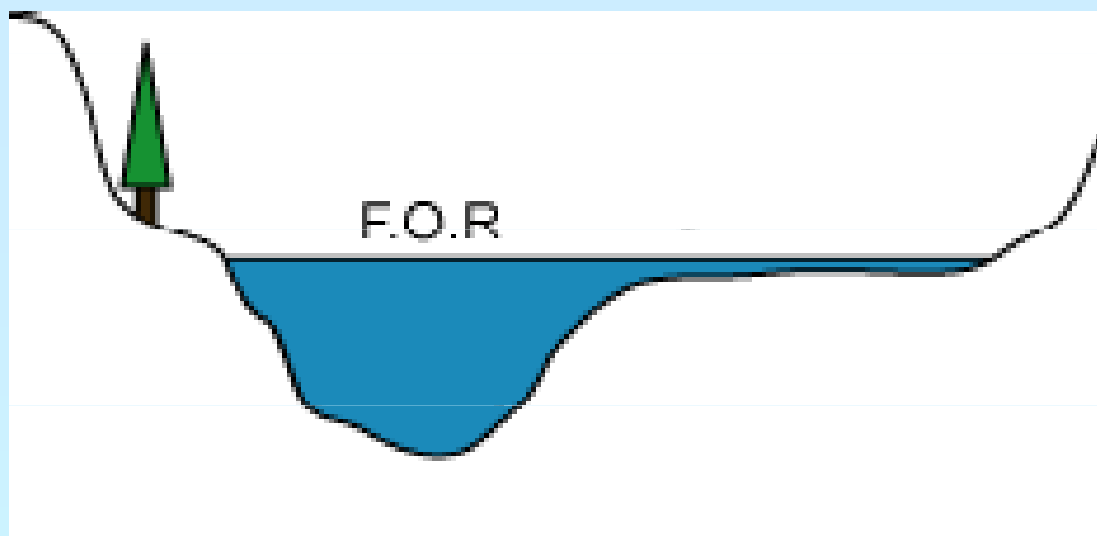
- přírodní koryta – násobení koeficientem 0.85
- klidné toky – násobení koeficientem 0.9

## Základní výsledek hydrometrování – konzumpční křivka

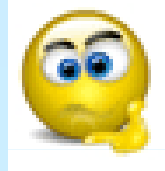
- měrné profily
- měření průtoků při různých vodních stavech







Kde měřit průtoky ve vodotečích?



**optimálně** – vždy před každým soutokem





# MĚRNÉ ŽLABY

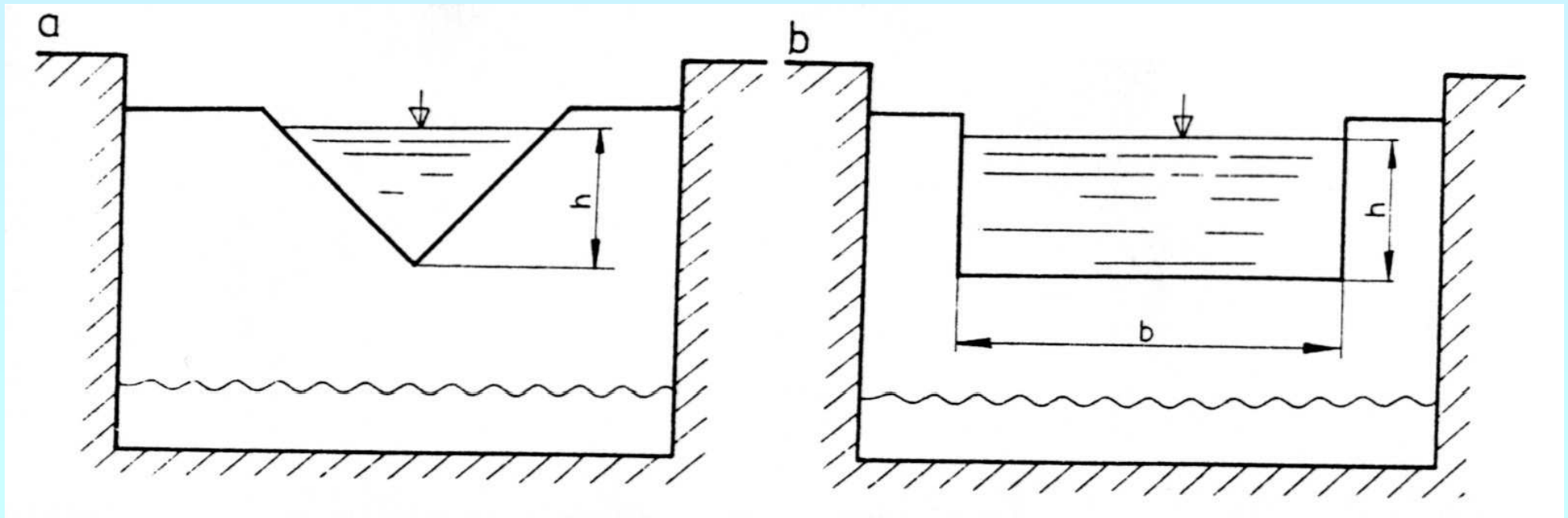
- žlab (koryto) se zúženým profilem
- měření výšky vodního sloupce v korytě před a za zúžením
- rozdíl hladin odpovídá průtoku
- např. Venturiho žlab
- kalibrace pro jednotlivé žlaby
- využití – instalace především při dlouhodobější exploataci, ČZ, apod.

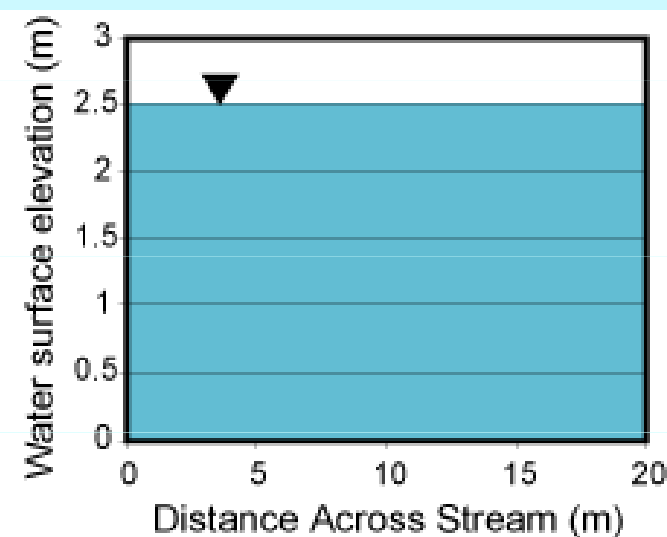
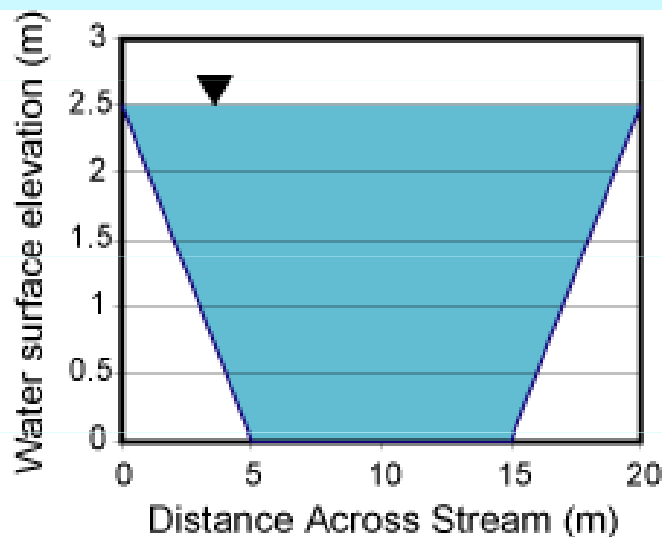
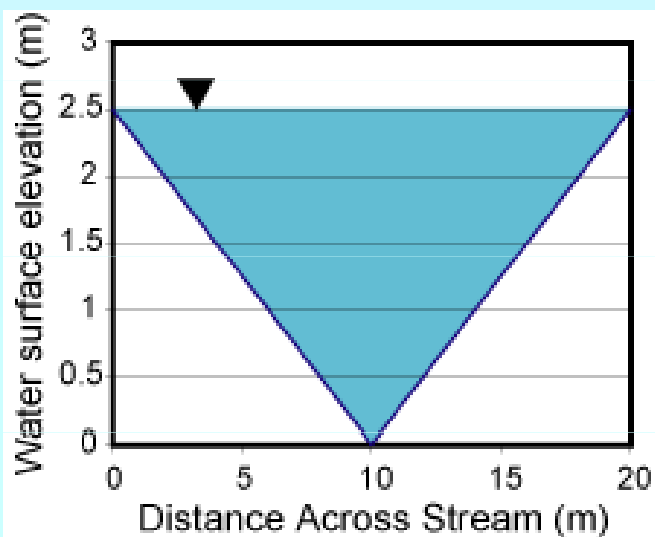
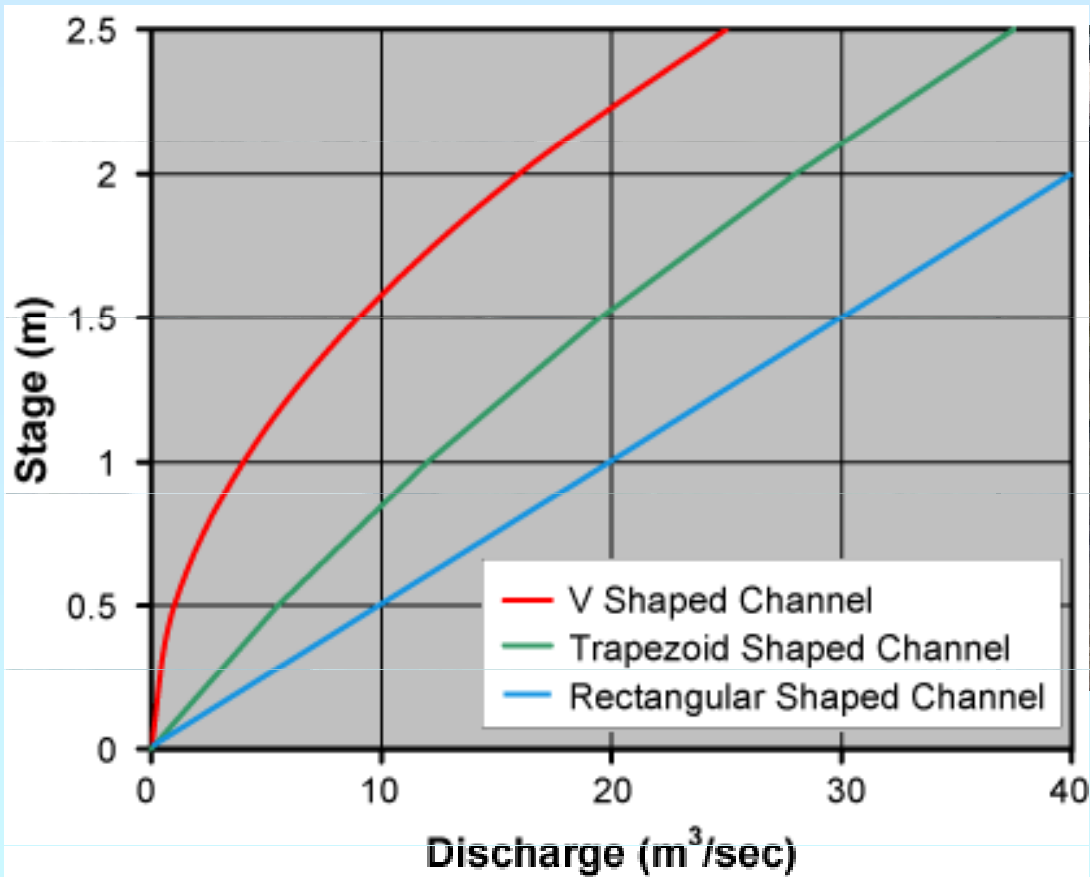


$$Q = \varphi \cdot b \cdot h_2 \cdot \sqrt{2g \cdot (h_1 - h_2)}$$

# 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)

$$Q = 2,362 \cdot \mu \cdot h^{5/2} \quad \mu = 0,62$$

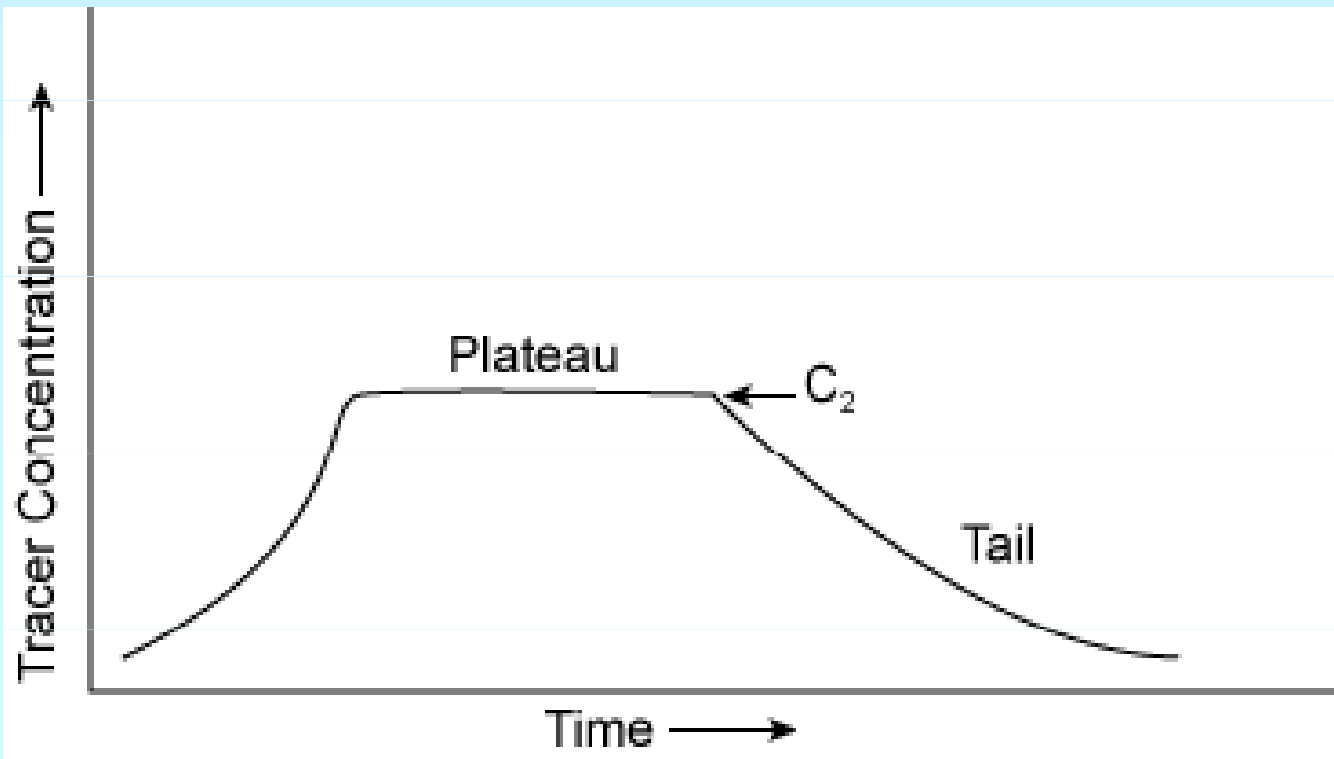
## **Ponceletův přepad**

(obdélníkový přepad)

$$Q = 2/3 \cdot \mu \cdot b \sqrt{2g} \cdot h^{3/2} \quad \mu = 0,62$$

# STOPOVACÍ ZKOUŠKY

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



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

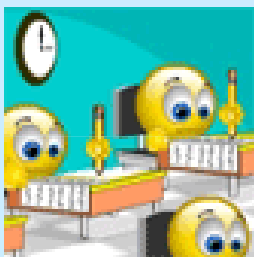
$Q$  - zjišťovaný průtok

$C_0$  - koncentrace stopovače  
v pozadí

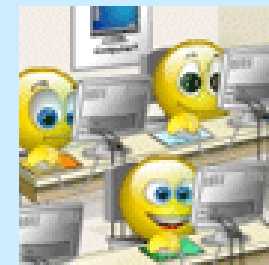
$Q_1$  - dávkovaný průtok stopovače

$C_1$  - koncentrace dávkovaného  
stopovače

$C_2$  - koncentrace stopovače  
v měřeném profilu



## PŘÍKLAD



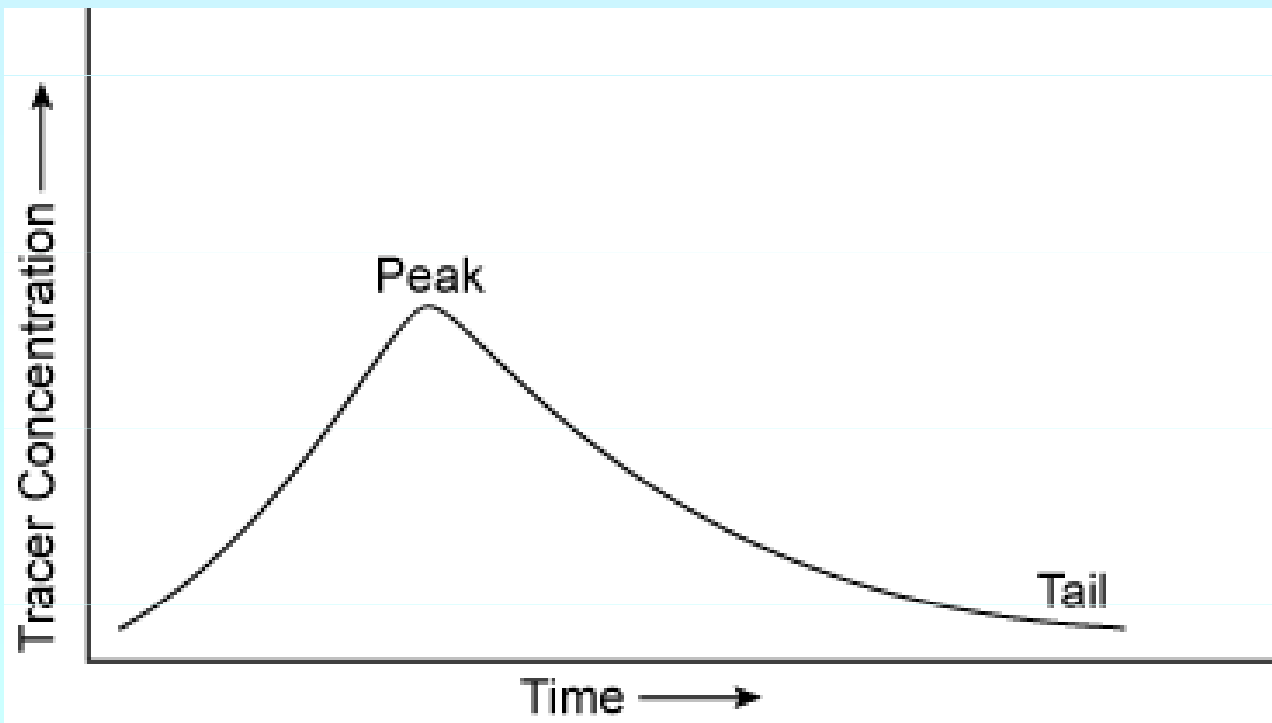
Určete průtok ve vodním toku, do kterého byl po dobu 30 s přidáno 100 l roztoku stopovače. Počáteční koncentrace stopovače ve vodním toku je nulová, koncentrace v roztoku byla 15 000 mg/l.

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

# 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

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

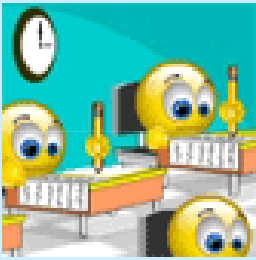


$$Q = \frac{V \cdot P_p}{F \pm \Delta F}$$

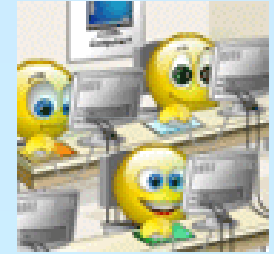
V - objem roztoku stopovače

$P_p$  - 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:**

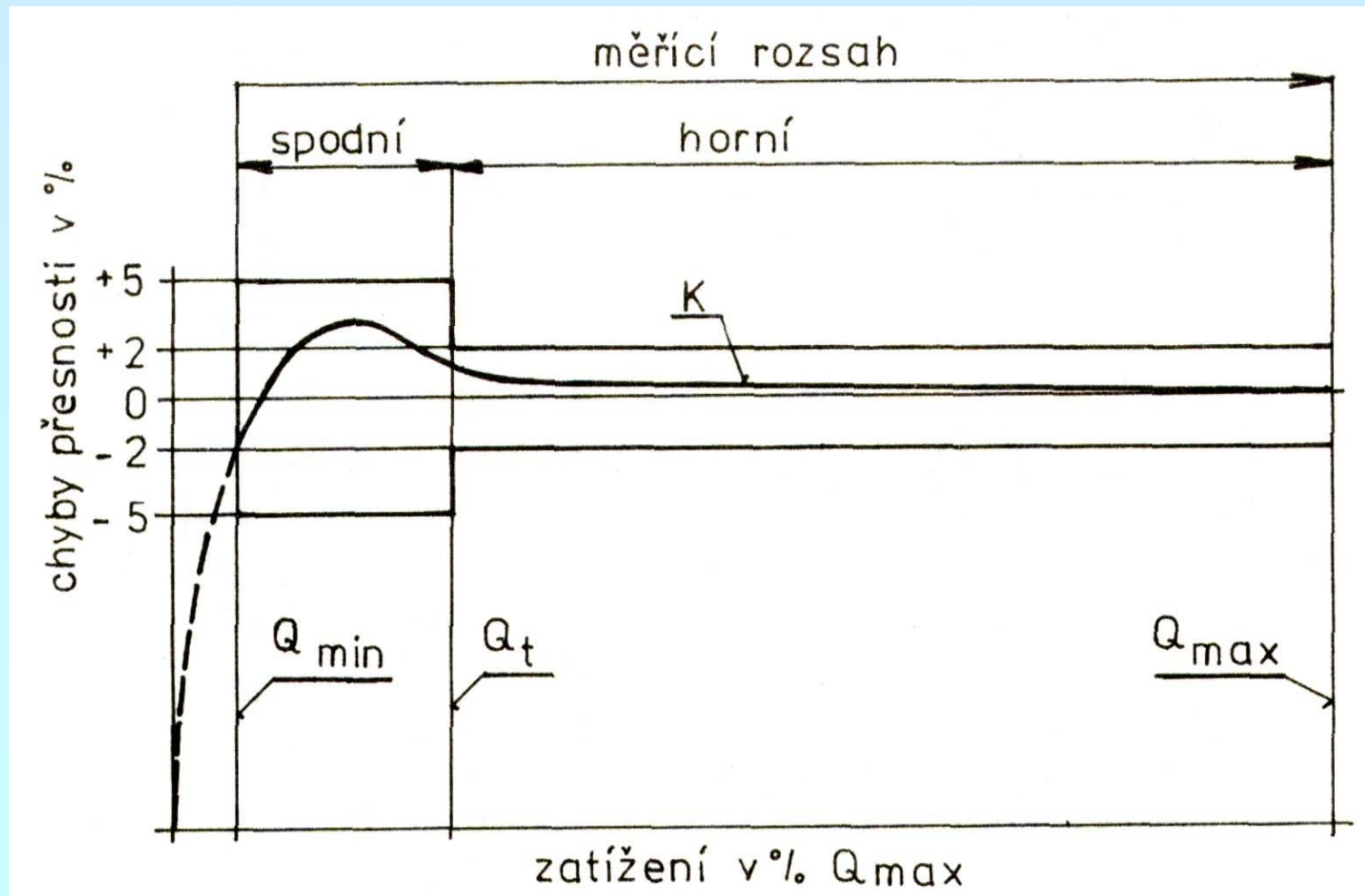
- floumetry – vertikální hydrometrické vrtule
- stopovací zkoušky
- termokarotáž

## **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