

## Hidrološka merenja

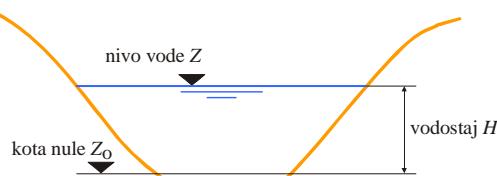
- Merenje nivoa vode / vodostaja
- Merenje protoka – **hidrometrija**
  - direktno merenje?
  - metoda brzina-površina:  
merenje polja brzina i integracija  
po poprečnom preseku
  - metoda razblaživanja trasera
  - merni objekti (prelivи, suženja...)



## Merenje nivoa vode i vodostaja

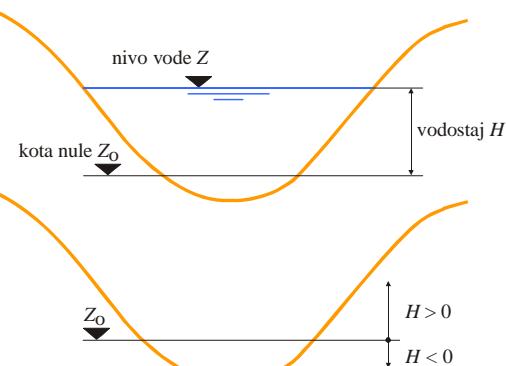
- Vodostaj = razlika između nivoa vode i referentne kote ("kote nule"):

$$H = Z - Z_0$$



## Merenje vodostaja

- Može biti pozitivan ili negativan



- Izražava se u cm!

## Merenje vodostaja

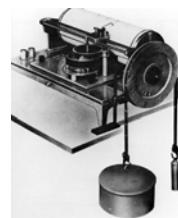
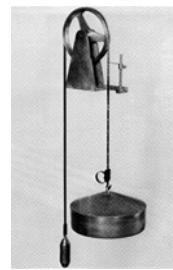
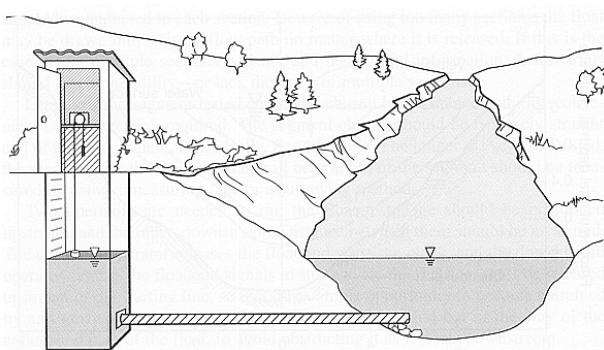
- Instrumenti:
  - vodomerna letva



## Merenje vodostaja

### ■ Instrumenti:

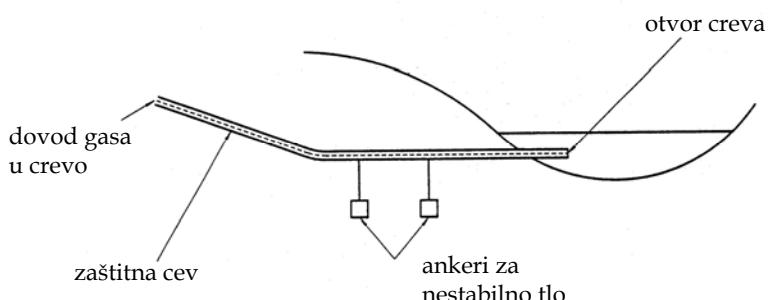
- limnograf



## Merenje vodostaja

### ■ Gasna tehnika

- detektuje se hidrostatički pritisak na otvoru creva, a to daje vodostaj
- gas (najčešće azot) se dovodi iz boce
- otvor fiksiran u rečnom toku



## Merenje protoka (hidrometrija)

### ■ Merenje brzina

- instrument: hidrometrijsko krilo, elektromagnetne i ultrazvučne sonde



## Merenje protoka (hidrometrija)

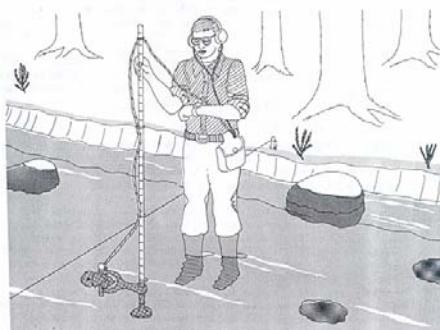
### ■ Merenje brzina

- instrument: hidrometrijsko krilo, elektromagnetne i ultrazvučne sonde



## Hidrometrija

- Načini merenja:  
ručno, sa mosta,  
iz žičare, iz čamca



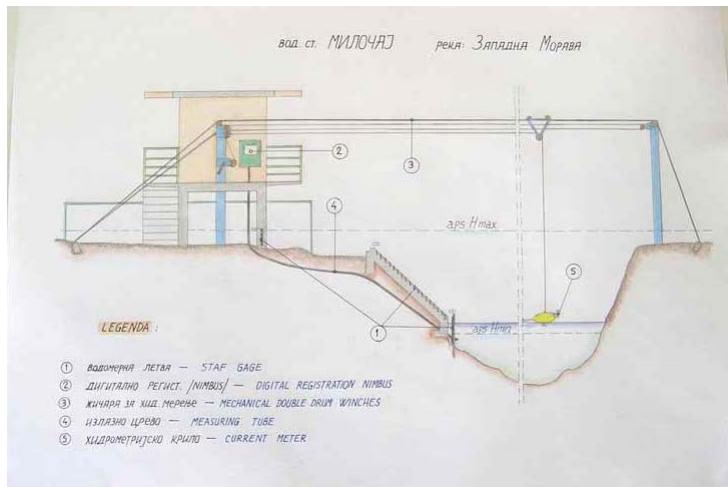
## Hidrometrija

- Hidrometrijsko krilo, gaženje reke



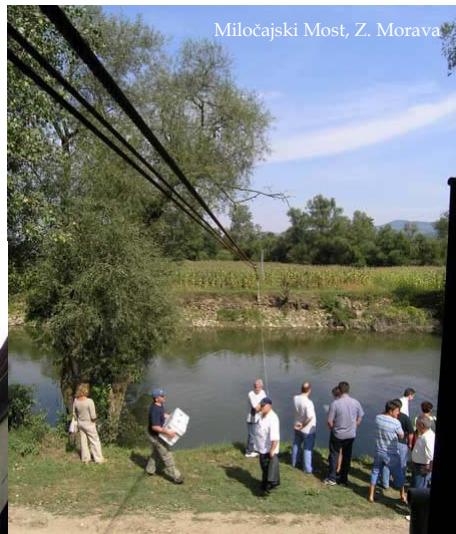
# Hidrometrija

## ■ Stanica sa žičarom



# Hidrometrija

## ■ Stanica sa žičarom

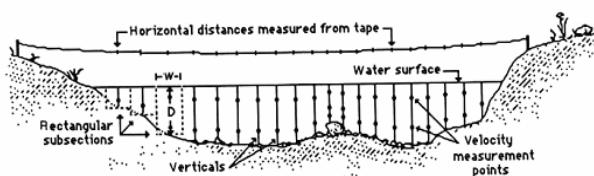


## Hidrometrija

- Kalibracija hidrometrijskog krila

## Metoda brzina-površina

- Uže razapeto poprečno na vodotok upravno na smer tečenja
- Izbor mesta za merenje po širini toka (**vertikala**)
  - najmanje 10 segmenata, tako da kroz svaki segment ne protiče više od 10% očekivanog protoka
- Izbor tačaka za merenje po dubini na svakoj vertikali
  - za dubine  $> 1$  m, najčešće 5 tačaka: površina, 0.2h, 0.6h, 0.8h i dno



## Metoda brzina-površina: Proračun protoka na osnovu izmerenih brzina

- Protok kroz poprečni presek – integrisanje polja brzina:

$$Q = \int_A v \, dA = \int_{x=0}^B \int_{y=0}^{h(x)} v(x, y) \, dx \, dy$$

gde je:

- $A$  – površina poprečnog preseka  
 $x$  – rastojanje od leve obale  
 $B$  – širina vodenog ogledala  
 $y$  – dubina merena od površine  
 $h(x)$  – dubina do dna na rastojanju  $x$

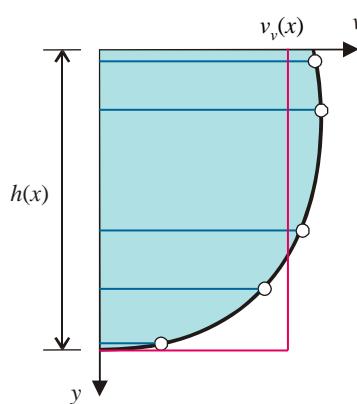
## Metoda brzina-površina: Proračun protoka na osnovu izmerenih brzina

- Korak 1: integrisanje brzina na vertikali

$$q(x) = \int_{y=0}^{h(x)} v(x, y) \, dy$$

- Elementarni protok ili protok po jedinici širine toka  $q(x)$
- Srednja brzina na vertikali:

$$v_v(x) = \frac{q(x)}{h(x)}$$



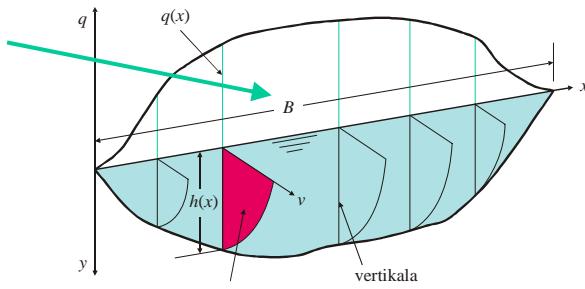
## Metoda brzina-površina: Proračun protoka na osnovu izmerenih brzina

- Korak 2: integrisanje elementarnog protoka po širini toka

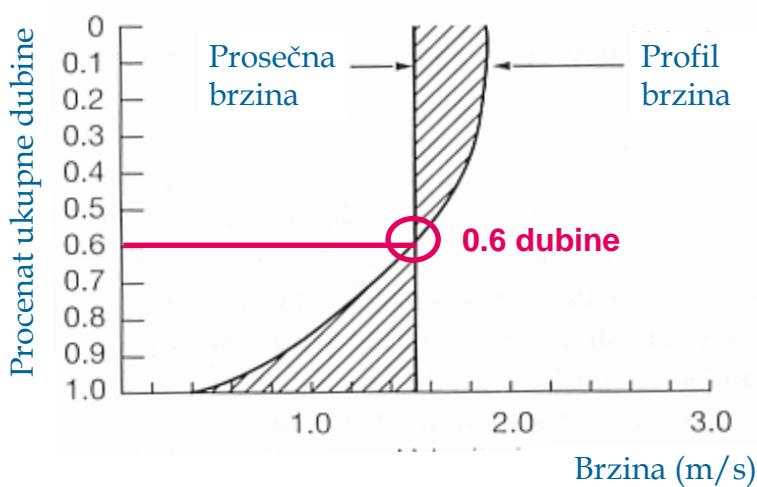
$$Q = \int_{x=0}^B q(x) dx$$

- Srednja brzina u profilu:

$$v_{sr} = \frac{Q}{A}$$



## Metoda brzina-površina Skraćeni postupak



## Hidrometrija

- Savremeni pristup: akustičke metode
  - ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)



## Hidrometrija

- Merenje protoka metodom razblaživanja trasera
  - upuštanje rastvora poznate koncentracije (trasera) u tok
    - kontinualno
    - trenutno
  - prepostavka o potpunom mešanju trasera po širini toka
  - nizvodno se uzima uzorak sa razblaženim traserom
  - protok se računa upoređivanjem koncentracije upuštenog trasera i nizvodne koncentracije
  - traseri: so, boje, fluorescentne boje, radioaktivni traseri

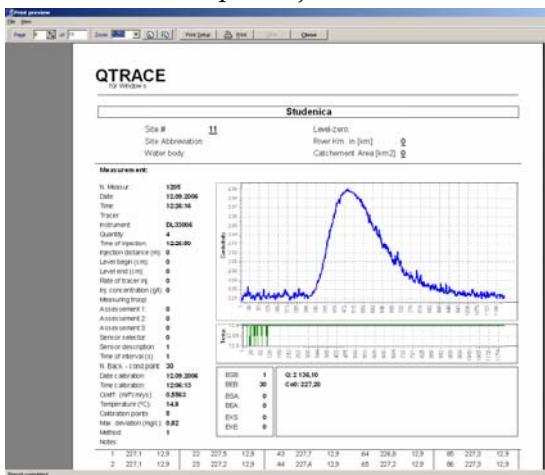
# Hidrometrija

- Merenje protoka metodom razblaživanja trasera
  - trenutno upuštanje soli



# Hidrometrija

- Merenje protoka metodom razblaživanja trasera
  - trenutno upuštanje soli

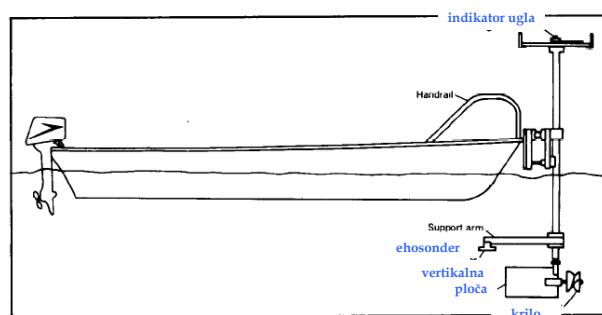


$$Q = \frac{m_{tracer}}{\int(C - C_b)dt}$$

## Merenja protoka na velikim rekama

### ■ Metoda plovila

- brzo merenje protoka
- metoda brzina-površina, 30-40 merenja u jednom prolazu
- tokom prelaska reke ehosonderom se snima poprečni profil, a ultrazvučni merač brzina/krilo meri kombinovanu brzinu vode i plovila; pomoću vertikalne ploče koja se pomera u ravcu tečenja vode registruje se i ugao između ploče i pravca kretanja broda. Na osnovu ovih podataka može se sračunati protok u poprečnom profilu

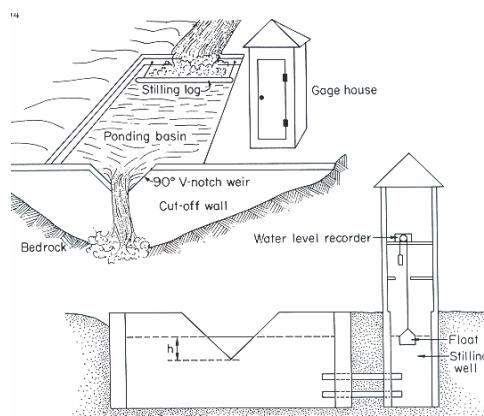


## Merenje protoka pomoću mernih objekata

### ■ Prelivi

- meri se visina prelivnog mlaza  $h$
- protok se računa iz jednačine prelivanja, npr.

$$Q = C_Q (2g)^{1/2} h^{5/2}$$



## Merenje protoka pomoću mernih objekata

- Tompsonov (trougaoni) preliv



## Merenje protoka pomoću mernih objekata

- Široki pravougaoni preliv



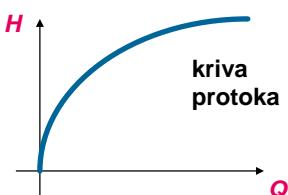
## Merenje protoka pomoću mernih objekata

### ■ Suženje

- za nepotopljeno tečenje meri se samo uzvodna dubina, koja je jednoznačno vezana sa protokom

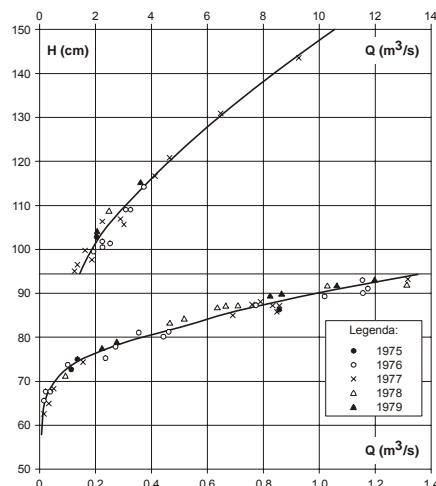


## Zavisnost vodostaja i protoka: kriva protoka



- Hidrometrijska merenja se obavljaju pri različitim vodostajima da bi se ustanovila zavisnost vodostaja i protoka
- Parovi vrednosti  $H$  i  $Q$  se nanose na grafik
- Definisanje zavisnosti:
  - ručno crtanje krive, ili
  - matematička formulacija krive (regresiona analiza)
  - jednačine prelivanja, isticanja... (za merne objekte)

## Zavisnost vodostaja i protoka: kriva protoka



## Zavisnost vodostaja i protoka: kriva protoka

- Matematička formulacija krive (regresiona analiza), u obliku:

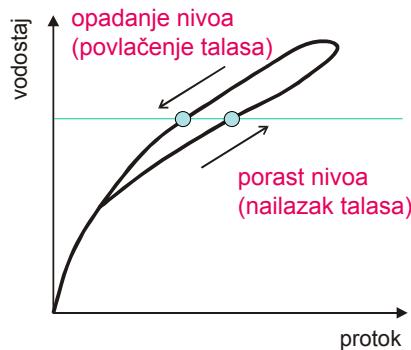
$$Q = a(H - H_0)^b$$

$$\underbrace{\log Q}_Y = \log a + b \underbrace{\log(H - H_0)}_X = c + b \underbrace{\log(H - H_0)}_X$$

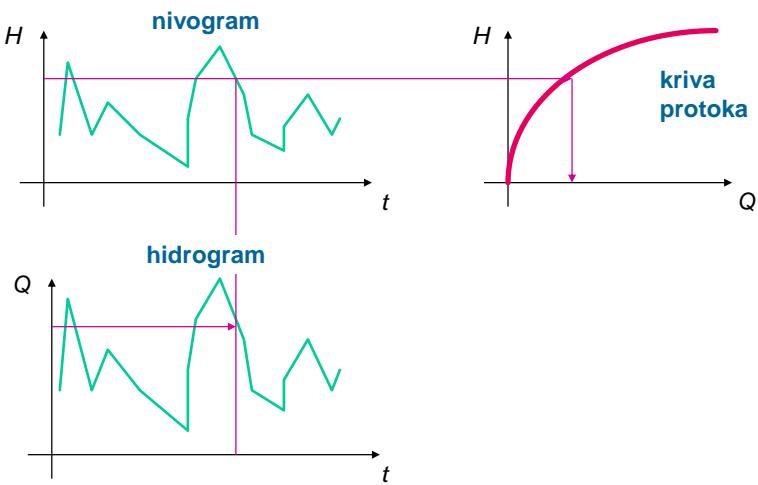
## Zavisnost vodostaja i protoka: kriva protoka

### ■ Problemi:

- nestabilno korito (erozija, zasipanje)
- neustaljeno tečenje – pojava petlje (histerezis)

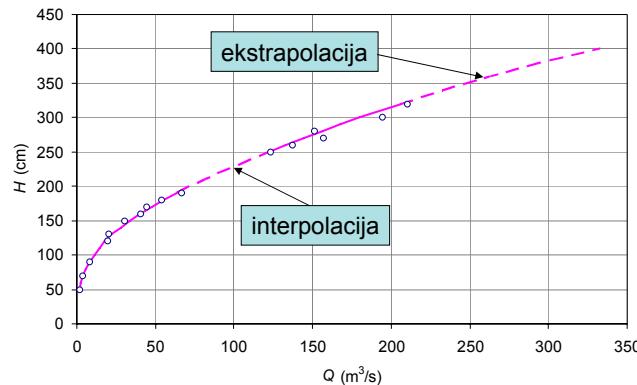


## Primena krive protoka



## Zavisnost vodostaja i protoka: kriva protoka

- Interpolacija i ekstrapolacija krive protoka



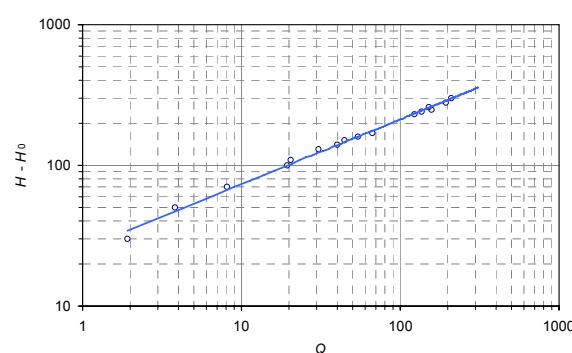
## Kriva protoka

- Logaritamska ekstrapolacija krive protoka
  - nagib linije zavisi od hidrauličkih uslova (npr. za Tompsonov preliv nagib je  $5/2$ )

efektivna dubina

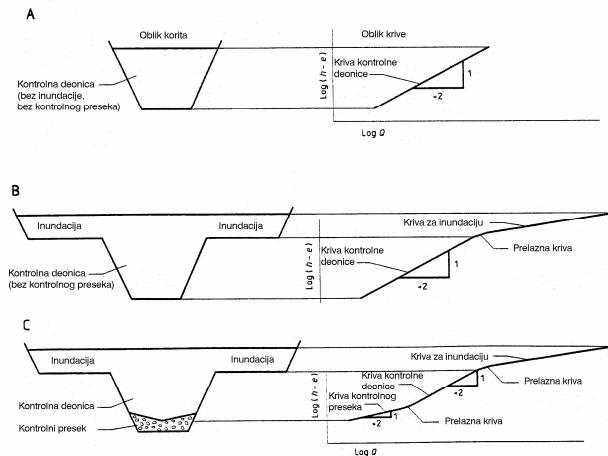
$$h_e = H - H_0$$

$$H_0 = H(Q = 0)$$



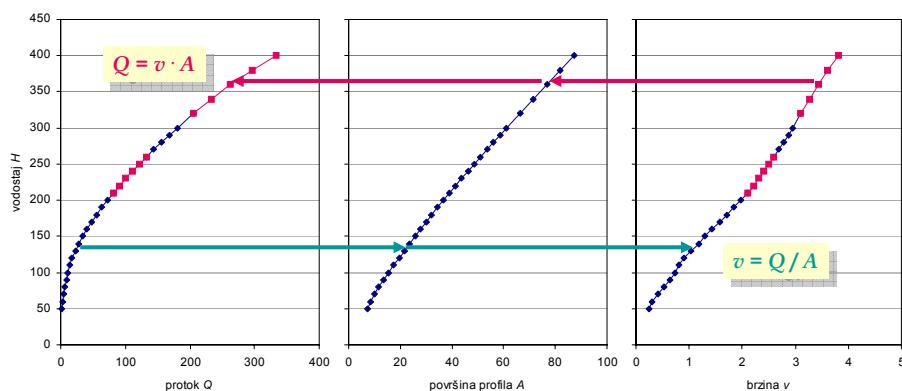
## Kriva protoka

- Logaritamska ekstrapolacija krive protoka
  - uticaj oblika korita na krv protoka



## Kriva protoka

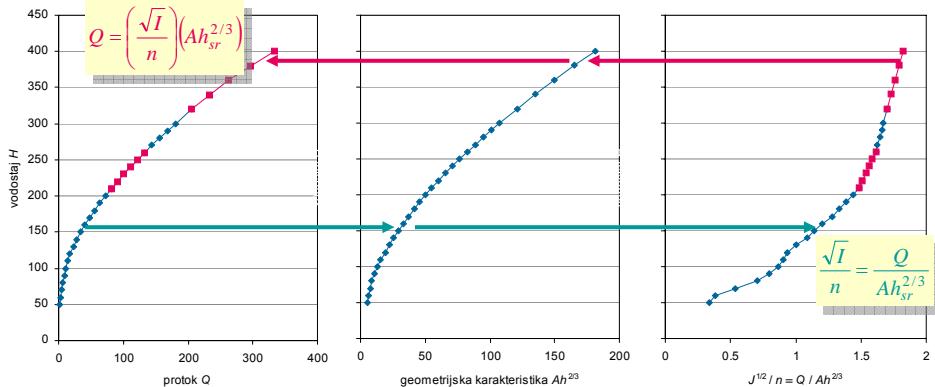
- Ekstrapolacija krive srednjih profilskih brzina
  - ekstrapolacija pomoću brzina i površina ( $Q = v \cdot A$ )



## Kriva protoka

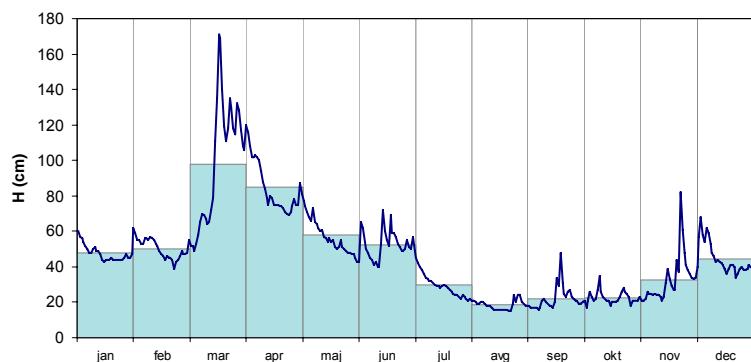
- Ekstrapolacija pomoću Maningove jednačine

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} \sqrt{I} \approx \frac{\sqrt{I}}{n} Ah_{sr}^{2/3} \quad h_{sr} = A/B$$



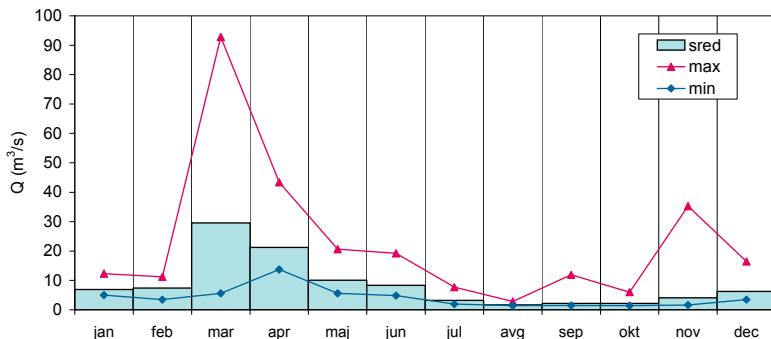
## Obrada podataka o vodostajima i protocima

- Unutargodišnji režim vodostaja/protoka
  - dnevne vrednosti
  - srednji mesečni vodostaji/protoci



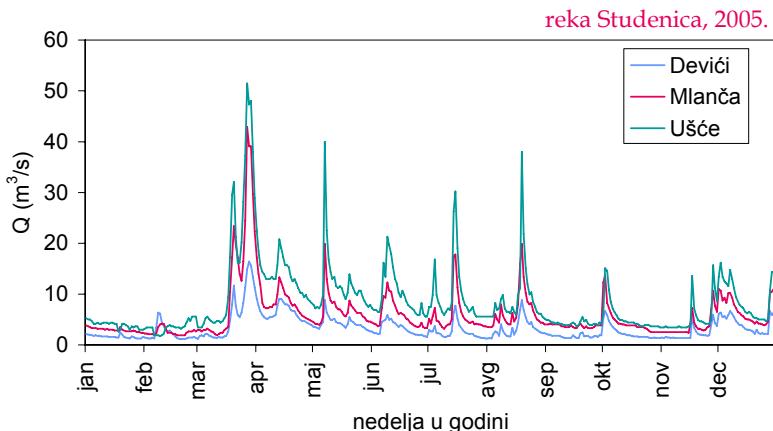
## Obrada podataka o vodostajima i protocima

- Unutargodišnji režim vodostaja/protoka
  - ekstremni mesečni vodostaji/protoci



## Obrada podataka o vodostajima i protocima

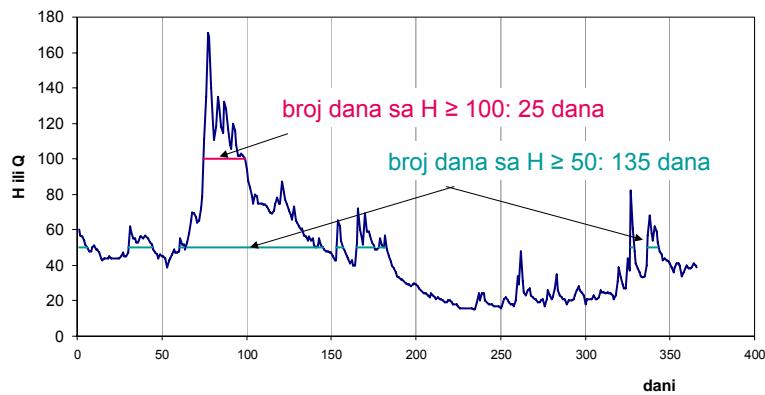
- Kontrola protoka



## Kriva trajanja/zastupljenosti

### ■ Trajanje/zastupljenost

- broj dana sa  $H$  ili  $Q$  većim ili jednakim od posmatrane vrednosti

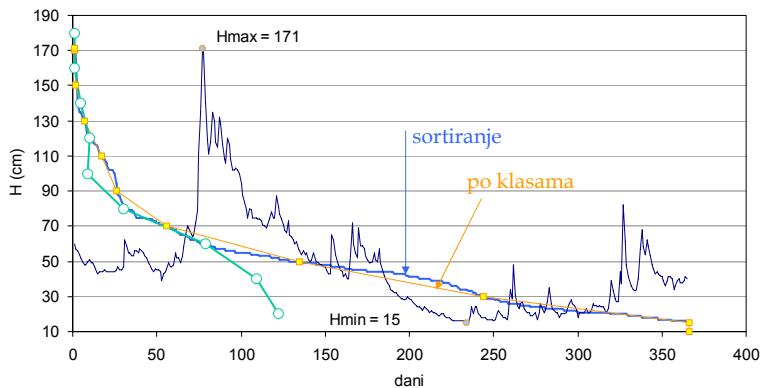


## Kriva trajanja/zastupljenosti

- Metod 1: podela na klase
- Metod 2: sortiranje u opadajući niz
- Primer

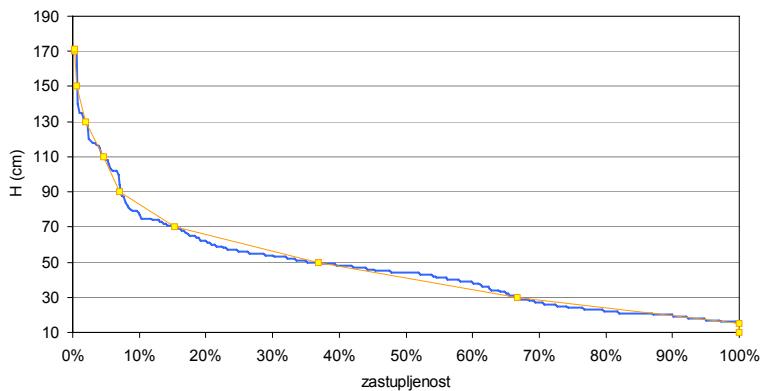
## Kriva trajanja/zastupljenosti

- Kriva učestalosti i kriva trajanja



## Kriva trajanja/zastupljenosti

- Kriva zastupljenosti

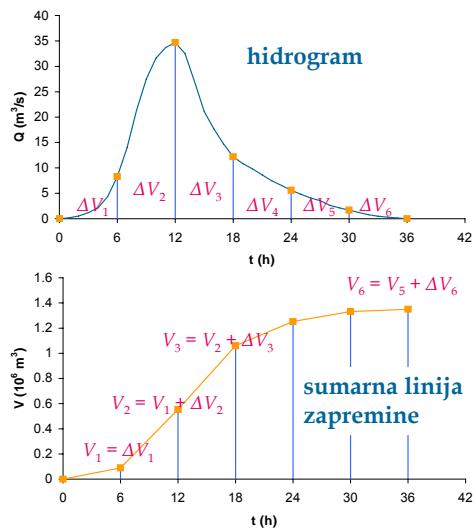


## Sumarna linija zapremine

- Kumulativna zapremina vode protekla kroz profil do posmatranog trenutka
  - dobija se iz hidrograma

$$\Delta V_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} Q dt \approx \frac{Q_{i-1} + Q_i}{2} \Delta t$$

$$V_i = \int_0^{t_i} Q dt = V_{i-1} + \Delta V_i$$



## Sumarna linija zapremine

- Primer proračuna na osnovu srednjih mesečnih protoka

| mesec | $Q_{sr,mes}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | $T_{mes}$ (dani) | $V_{mes}$ (miliona $\text{m}^3$ ) | $\Sigma V_{mes}$ (miliona $\text{m}^3$ ) |
|-------|--|------------------|-----------------------------------|--|
| 1     | 6.96                                   | 31               | 18.64                             | 18.64                                    |
| 2     | 7.47                                   | 28               | 18.07                             | 36.71                                    |
| 3     | 29.54                                  | 31               | 79.11                             | 115.82                                   |
| 4     | 21.26                                  | 30               | 55.10                             | 170.92                                   |
| 5     | 10.07                                  | 31               | 26.97                             | 197.89                                   |
| 6     | 8.35                                   | 30               | 21.63                             | 219.52                                   |
| 7     | 3.24                                   | 31               | 8.68                              | 228.20                                   |
| 8     | 1.70                                   | 31               | 4.55                              | 232.75                                   |
| 9     | 2.17                                   | 30               | 5.62                              | 238.36                                   |
| 10    | 2.14                                   | 31               | 5.73                              | 244.10                                   |
| 11    | 4.16                                   | 30               | 10.77                             | 254.87                                   |
| 12    | 6.22                                   | 31               | 16.67                             | 271.54                                   |

$V_{god}$

## Sumarna linija zapremljenosti

- Kumulativna zapremljenost vode protekla kroz profil do posmatranog trenutka

