

# Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama

---

Pretvorba energije položaja vode u mehanički rad – I  
Energijske tehnologije  
FER 2008.



**Gdje  
smo:**

1. Organizacija i sadržaj predmeta
2. Uvodna razmatranja
3. O energiji
4. Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama
- 5. Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama**
6. Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim el.
7. Energija Sunca
8. Energija vjetra
9. Geotermalna energija
10. Biomasa
11. Gorivne ćelije i ostale neposredne pretvorbe
12. Potrošnja električne energije
13. Prijenos i distribucija električne energije
14. Skladištenje energije
15. Energija, okoliš i održivi razvoj

# Sadržaj

---

- Uvod o električnoj energiji i hidroenergiji
- Hidrološki uvjeti
- Protok vode i nadmorska visina
- Protok vode i vrijeme
- Veličina izgradnje
- Snaga i energija hidroelektrane
- Vrste hidroelektrana

# Uvod o električnoj energiji i hidroenergiji

---

## Literatura

- *Hrvoje Požar, Osnove energetike, I dio*
- *Hrvoje Požar, Osnove energetike, II dio*
- *Tehnička enciklopedija, 3. svezak*
- *Tehnička enciklopedija, 6. svezak*
- *Predavanja dostupna na:*
  - [www.fer.hr](http://www.fer.hr)
- *Dodatne informacije i na Internetu*
  - [www.hep.hr](http://www.hep.hr)
  - [www.energetika-net.hr](http://www.energetika-net.hr) itd.

# Hidroenergija

---

- Obnovljivi izvor energije
- Mala emisija stakleničkih plinova
- Visoka efikasnost pretvorbe u mehanički rad
- Širok raspon instaliranih snaga
- Relativno niska koncentracija energije
- Relativno visoka pouzdanost u odnosu na druge obnovljive izvore
- Mogućnost izvedbe određena karakteristikama lokacije
- Relativno veliki investicijski troškovi
- Ovisno od izvedbe relativno velika fleksibilnost prilagođavanja promjeni opterećenja u EES

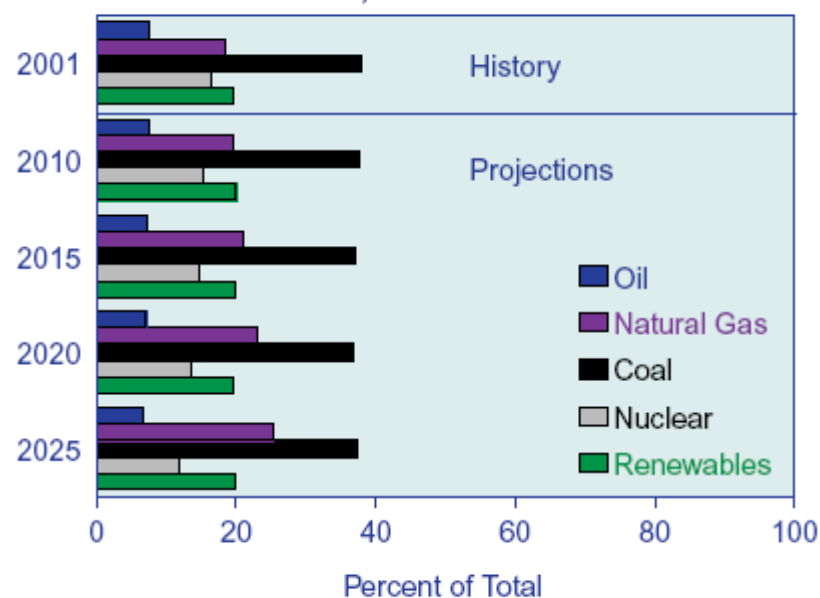
## Udjel obnovljivih izvora u ukupnoj proizvodnji električne energije

---

- Hidroenergija ima udjel od oko 16% u ukupnoj svjetskoj proizvodnji električne energije
- Struktura udjela razvijenih zemalja u ukupnoj proizvodnji električne energije u HE se smanjuje (iskorištenost ovog oblika proizvodnje u razvijenim zemljama je velika)
- Trenutno najzastupljeniji obnovljivi izvor (slijede ga vjetroelektrane i primjena energije sunca)
- Velike HE su klasični elektroenergetski objekti
- Male elektrane se često označavaju kao novi obnovljivi izvori

# El. energija koju trošimo 15 PWh 2001.

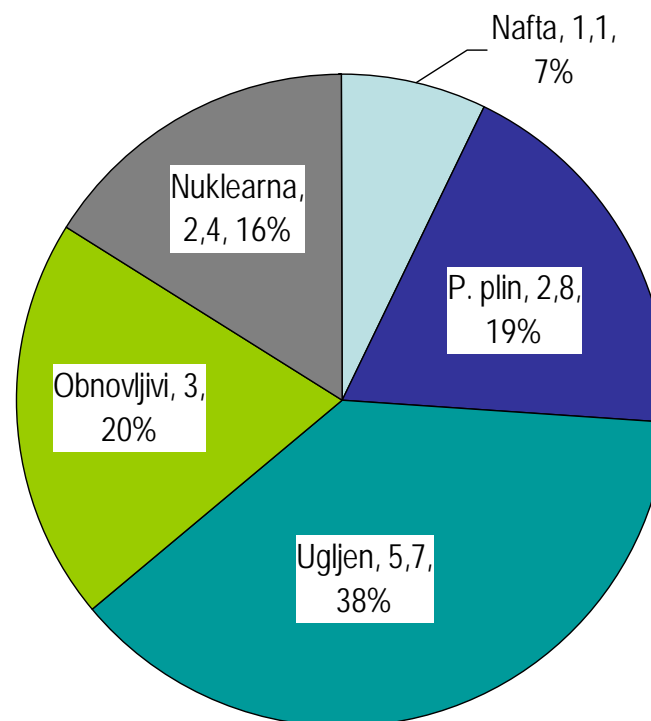
**Figure 62. Fuel Shares of World Electricity Generation, 2001-2025**



Sources: **2001:** Energy Information Administration (EIA), calculated by the Office of Integrated Analysis and Forecasting, based on estimates of fuel inputs for electricity generation and assumed average generation efficiencies by fuel type. **Projections:** EIA, System for the Analysis of Global Energy Markets (2004).

1 Peta =  $10^{15}$

Potrošnja el. energije 2001. [PWh]



**Obnovljivi:** 0,15 PWh, 1,0% biomasa;  
2,76 PWh, 18,4% HE;  
0,09 PWh, 0,6% ostali.

# Hidroenergija u svijetu

**Pokazatelji: vodeći svjetski proizvođači, udjel u ukupnim svjetskim instaliranim kapacitetima, udjel HE u proizvodnji električne energije u zemljama vodećim proizvođačima**

Producers	TWh	% of World total
People's Rep. of China	354	12.6
Canada	341	12.1
Brazil	321	11.4
United States	271	9.7
Russia	176	6.3
Norway	109	3.9
Japan	94	3.3
India	85	3.0
Venezuela	70	2.5
Sweden	60	2.1
Rest of the World	927	33.1
<b>World</b>	<b>2 808</b>	<b>100.0</b>

2004 data

Installed Capacity (based on production)	GW
United States	99
People's Rep. of China	86
Canada	67
Brazil	59
Japan	46
Russia	44
India	30
Norway	28
France	25
Sweden	16
Rest of the World	307
<b>World</b>	<b>807</b>

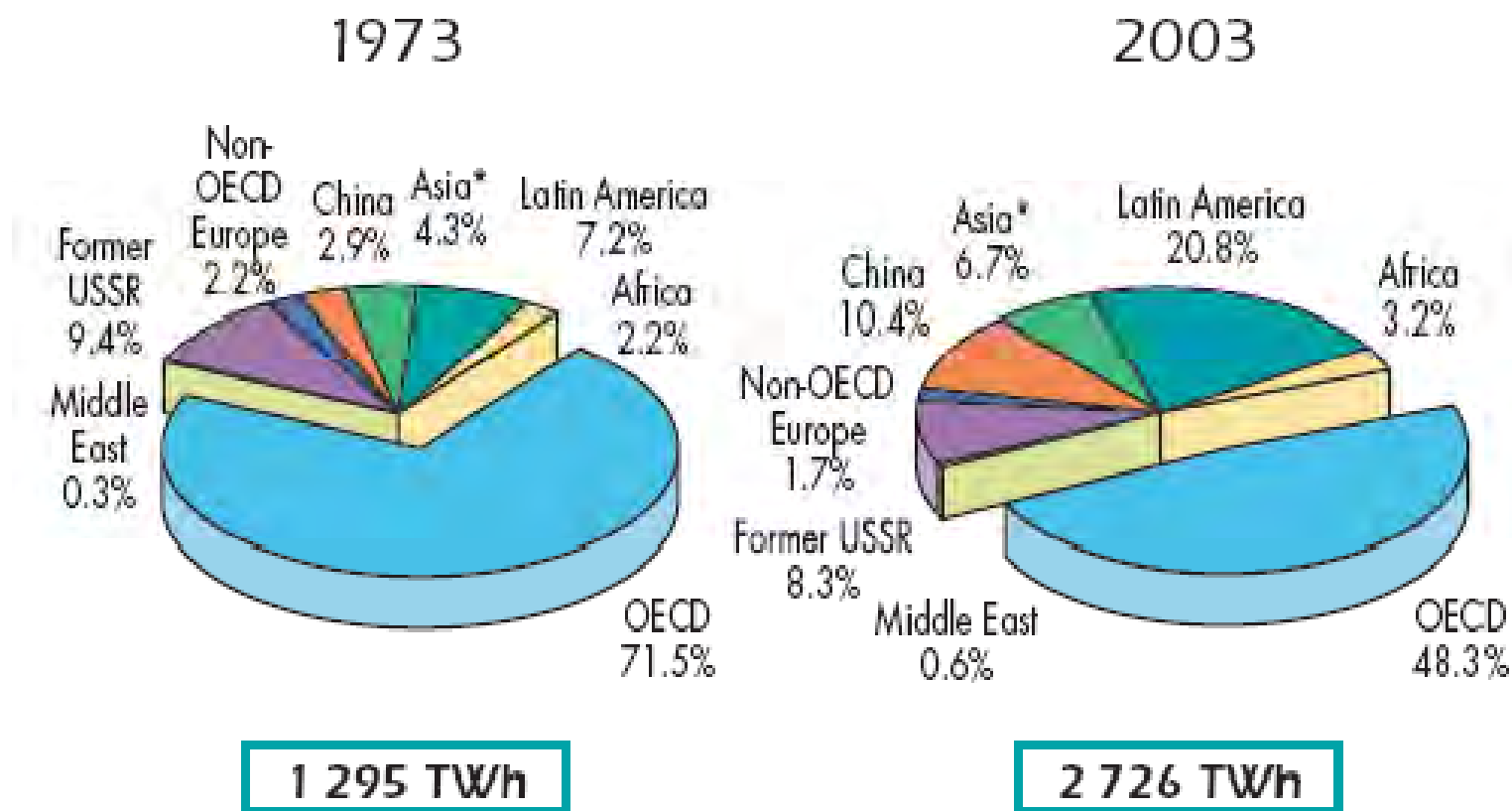
2003 data

Country (based on first 10 producers)	% of hydro in total domestic electricity generation
Norway	98.8
Brazil	82.8
Venezuela	71.0
Canada	57.0
Sweden	39.6
Russia	18.9
People's Rep. of China	16.1
India	12.7
Japan	8.8
United States	6.5
Rest of the World*	14.2
<b>World</b>	<b>16.1</b>

2004 data



# Promjene u zastupljenosti pojedinih zemalja u ukupnoj svjetskoj produkciji u HE



## Situacija u Hrvatskoj

---

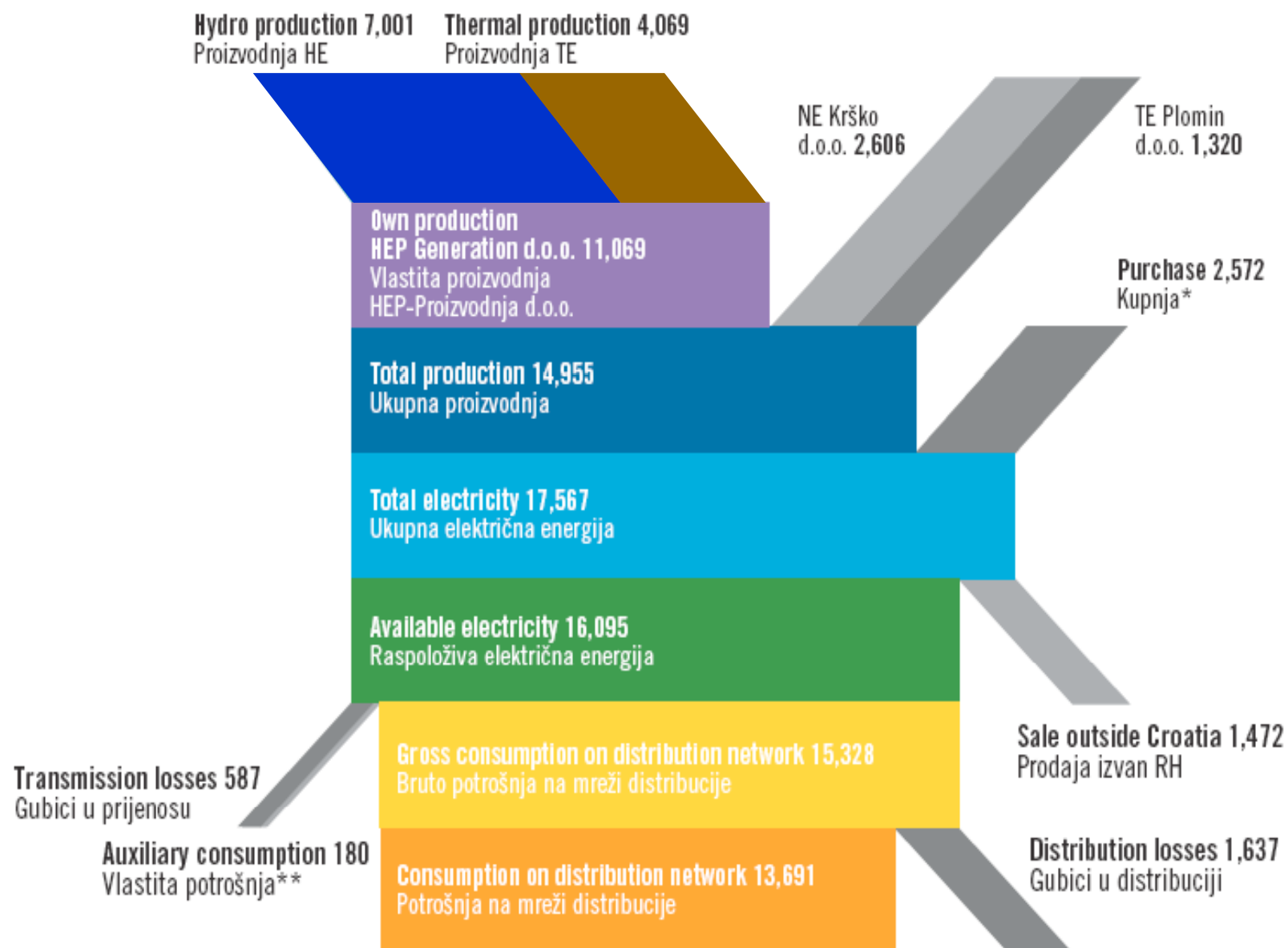
- Raspoloživa snaga u HE i TE (NE) u RH je približno jednaka
- Proizvedena energija u našim HE značajno varira od godine do godine, ovisno o hidrološkim uvjetima
- Značajan udjel instalirane snage HE u akumulacijskim elektranama jadranskog sliva
- Raspoloživost HE bitno ovisi o hidrološkim uvjetima ovisno o godišnjem dobu i od godine do godine

E

<b>Electricity Balance (GWh) Elektroenergetska bilanca (GWh)</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>Change (%) Promjena (%)</b>
<b>Hydro production</b> Proizvodnja HE	4,897	7,001	43.0
<b>Thermal production</b> Proizvodnja TE	5,087	4,068	-20.0
<b>Own production</b> Vlastita proizvodnja	9,984	11,069	10.9
<b>NE Krško d.o.o.</b> NE Krško d.o.o.	1,623	2,606	60.6
<b>TE Plomin d.o.o.</b> TE Plomin d.o.o.	1,616	1,320	-18.3
<b>Purchase</b> Kupnja	2,659	2,572	-3.3
<b>Sale to other power companies</b> Prodaja drugim elektroprivredama	-355	-1,472	314.6
<b>Available electricity</b> Raspoloživa električna energija	15,527	16,095	3.7
<b>Transmission network losses</b> Gubici na mreži prijenosa	660	587	-11.1
<b>Auxiliary consumption on transmission network</b> Vlastita potrošnja na mreži prijenosa	130	180	-38.5
<b>Gross consumption on distribution network</b> Bruto potrošnja na mreži distribucije	14,737	15,328	4.0
<b>Consumption on distribution network</b> Potrošnja na mreži distribucije	13,644	14,458	6.0
<b>Exchange, purchase, sale and supply outside Croatia</b> Gubici i neobračunata potrošnja na mreži distribucije	1,883	1,637	-13.1
<b>Gross consumption of electricity</b> Bruto potrošnja električne energije	15,527	16,095	3.7

# Electricity Balance 2004 Elektroenergetska bilanca za 2004.

[GWh]



## System Load Opterećenje sustava

System load 1995 - 2004 Opterećenje sustava 1995. - 2004.				
Year Godina	P <sub>max</sub> MW	P <sub>min</sub> MW	P <sub>min</sub> /P <sub>max</sub> %	W <sub>d</sub> MWh
1995	2,097	1,151	54.89	42,178
1996	2,471	1,314	53.18	47,143
1997	2,417	1,328	54.94	48,172
1998	2,585	1,316	50.91	51,168
1999	2,600	1,468	56.46	51,266
2000	2,661	1,556	58.47	54,059
2001	2,796	1,601	57.26	56,899
2002	2,685	1,586	59.07	54,617
2003	2,673	1,546	57.84	53,334
2004	2,792	1,626	58.24	55,830

**P<sub>max</sub>**- Peak system load  
Maksimalno opterećenje sustava

**P<sub>min</sub>**- Minimum system load on  
the day of P<sub>max</sub>  
Minimalno opterećenje u danu  
ostvarenog P<sub>max</sub>

**W<sub>d</sub>**- Maximum daily consumption  
Maksimalna dnevna potrošnja

## Electricity generation and procurement 1995-2004

Proizvodnja i nabava električne energije 1995.-2004.

GWh	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Hydro power plants Hidroelektrane	5,164	7,190	5,260	5,428	6,531	5,841	6,550	5,372	4,897	7,001
Thermal* & diesel power plants Termoelektrane* i dizel elektrane	2,740	2,520	3,578	4,561	4,768	3,958	4,713	5,899	6,703	5,388
Krško nuclear power plant NE Krško	2,279	2,182	2,393	1,250	0	0	0	0	1,623	2,606
Imports** - exports Uvoz** - Izvoz	1,221	166	1,562	2,115	2,376	4,037	3,192	3,560	2,304	1,100
<b>Total Ukupno</b>	<b>11,404</b>	<b>12,058</b>	<b>12,793</b>	<b>13,354</b>	<b>13,675</b>	<b>13,836</b>	<b>14,455</b>	<b>14,831</b>	<b>15,527</b>	<b>16,095</b>

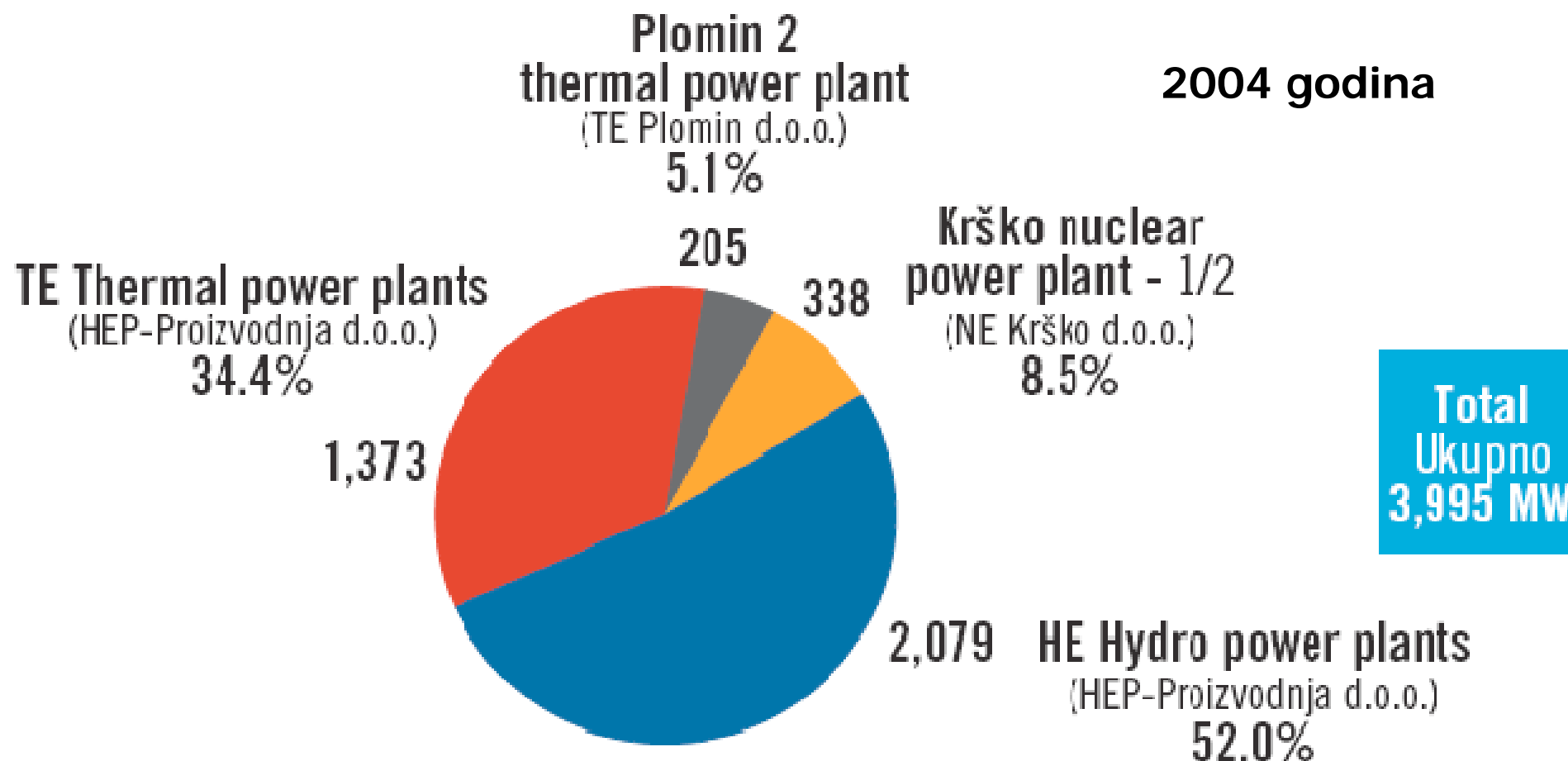
# HEP Generation HEP Proizvodnja d.o.o.

## Hydro power plants Hidroelektrane

	available capacity (MW) raspoloživa snaga (MW)		minimum safe output tehnički minimum	type tip elektrane
	generator generator	total ukupno		
Pogon HE Varaždin A,B,C*	2x47+0.46	94.46	2x18	run-of-river protočna
Pogon HE Čakovec A,B,C,D	2x40.3+1.1+0.34	82.04	2x15	run-of-river protočna
Pogon HE Dubrava A,B,C,D,E	2x40.3+1.1+2x0.34	82.38	2x15	run-of-river protočna
Pogon HE Rijeka A,B	2x18	36	2x9	run-of-river protočna
Pogon HE Vinodol A,B,C	3x30	90		storage akumulacijska
CHE Fužine A	4/(-4.8)	4/(-4.8)		storage akumulacijska
CHE Lepenica	1.4(-1.25)	1.4(-1.25)		storage akumulacijska
HE Zeleni Vir	1.44	1.44		storage akumulacijska
Pogon HE Senj A,B,C	3x72	216	3x33	storage akumulacijska
HE Sklope A	22.5	22.5		storage akumulacijska
Pogon HE Gojak A,B,C	3x16	48	3x2	run-of-river protočna
Pogon HE Ozalj A,B,C,D	2x1+0.8+2x1.1	5.24		run-of-river protočna
Pogon RHE Velebit A,B	2x138/(2x-120)	276/(-240)	80	storage akumulacijska
Pogon HE na Krki				
HE Miljacka A,B,C,D	4.8+3x6.4	24	1	run-of-river protočna
HE Krčić	0.34	0.34		run-of-river protočna
HE Golubić A,B	2x3.27	6.54	1	run-of-river protočna
HE Jaruga A,B	2x3.6	7.2		run-of-river protočna
Pogon HE Peruća A,B	2x20.8	41.6	5	storage akumulacijska
HE Orlovac A,B,C	3x79	237	50	storage akumulacijska
Buško Blato d.o.o.				
CS Buško Blato A,B,C	3x3.8/3x(-3.4)	11.4/(-10.3)	0.81	storage akumulacijska
Pogon HE Đale A,B	2x20.4	40.8	6	storage akumulacijska
Pogon HE Kraljevac A,B,C	2x20.8+4.8	46.4	1	run-of-river protočna
Pogon HE Zakućac A,B,C,D	2x108+2x135	486	50+80	storage akumulacijska
Pogon HE Dubrovnik A,B	2x108	216	50	storage akumulacijska
HE Zavrelje	2	2		storage akumulacijska
Total hydro power plants Ukupno HE		2,078.74/(-256.35)		

**Available capacity of generating plants (net)\***  
**Raspoloživa snaga proizvodnih kapaciteta (na pragu)\***

**2004 godina**





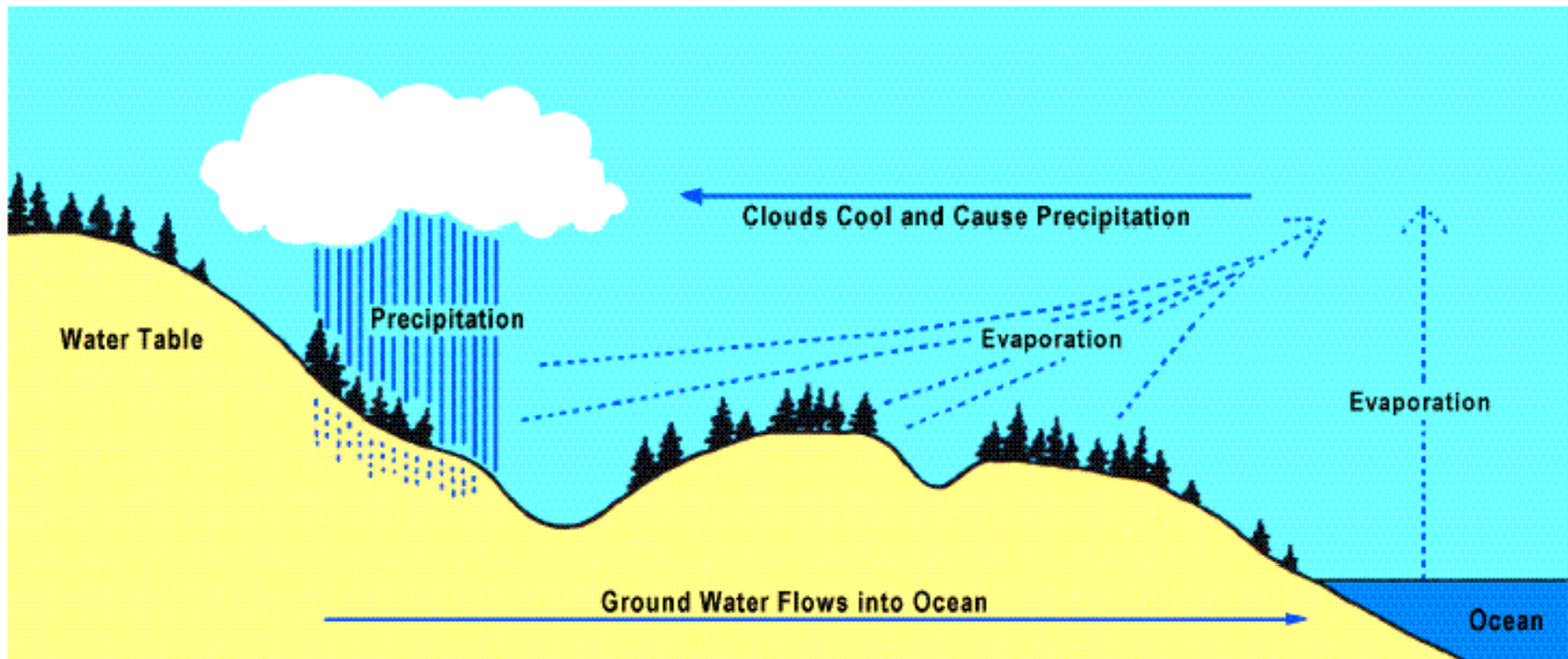
# Pretvorba energije položaja

---

- Uvod
- Hidrološki uvjeti
- Protok vode i visina
- Protok vode i vrijeme
- Veličina izgradnje
- Snaga i energija hidroelektrane
- Vrste hidroelektrana

# Ciklus vode u prirodi

---



# Pretvorba EP vode u MR (1)

---

## *Energija*

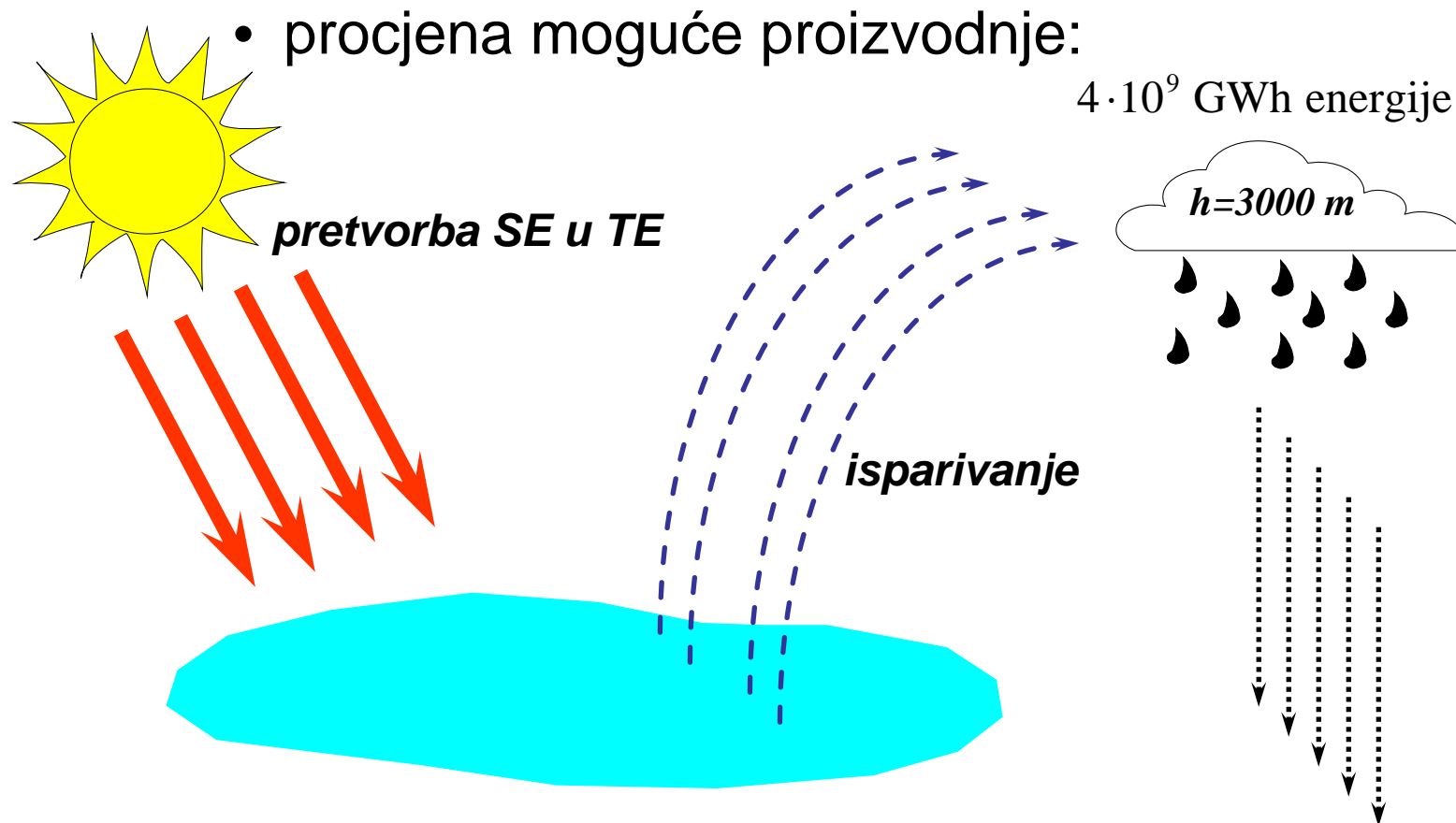
- *plime i oseke*
- *morskih valova*
- *vodotoka*

*opisuje se energijom položaja (kretanja) vode.*

*Energija položaja (EP) jest početni oblik energije vode u prirodi koja se može iskoristiti u tehničkim pretvorbenim sustavima.*

*EP je posljedica transformacije energije Sunca.*

# Pretvorba EP vode u MR (2)



- obnovljivi izvor energije, energija dolazi od Sunca

## Pretvorba EP vode u MR (3)

---

- “dostupni” dio energije položaja vode, elementi za procjenu
  - prosječna nadmorska visina tla: 700 m
  - visina taloga prosječnih padavina: 0.9 m
  - površina kopna: 130 milijuna km<sup>2</sup>

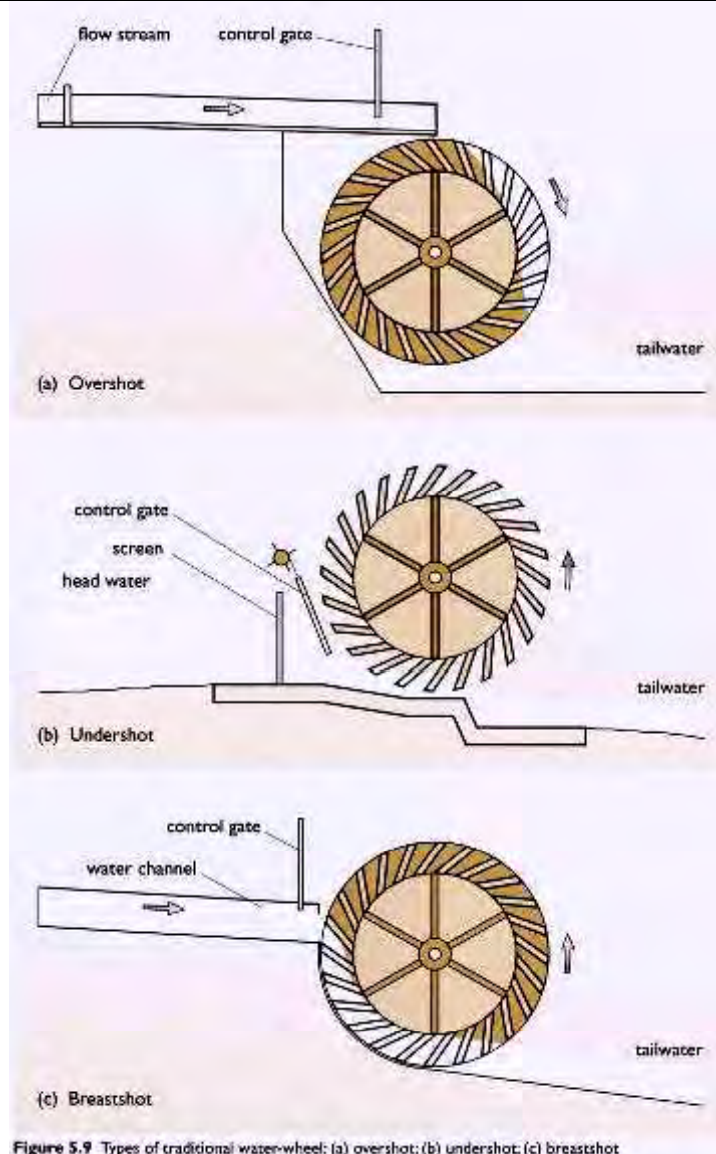
$$W = m g h = \rho V g h$$

$$W = 1000 \times 130 \times 10^{12} \times 0.9 \times 9.81 \times 700$$

$$W = 8,035 \times 10^{20} \text{ J} = 223 \times 10^6 \text{ GWh}$$

**2/3 dostupne energije položaja ispariva  
od ostatka (koncentracije vodotoka) moguće je iskoristiti oko 16%  
što iznosi  $11.9 \times 10^3 \text{ TWh}$   
stvarna svjetska proizvodnja u HE 2003 je bila oko  $3000 \text{ TWh}$**

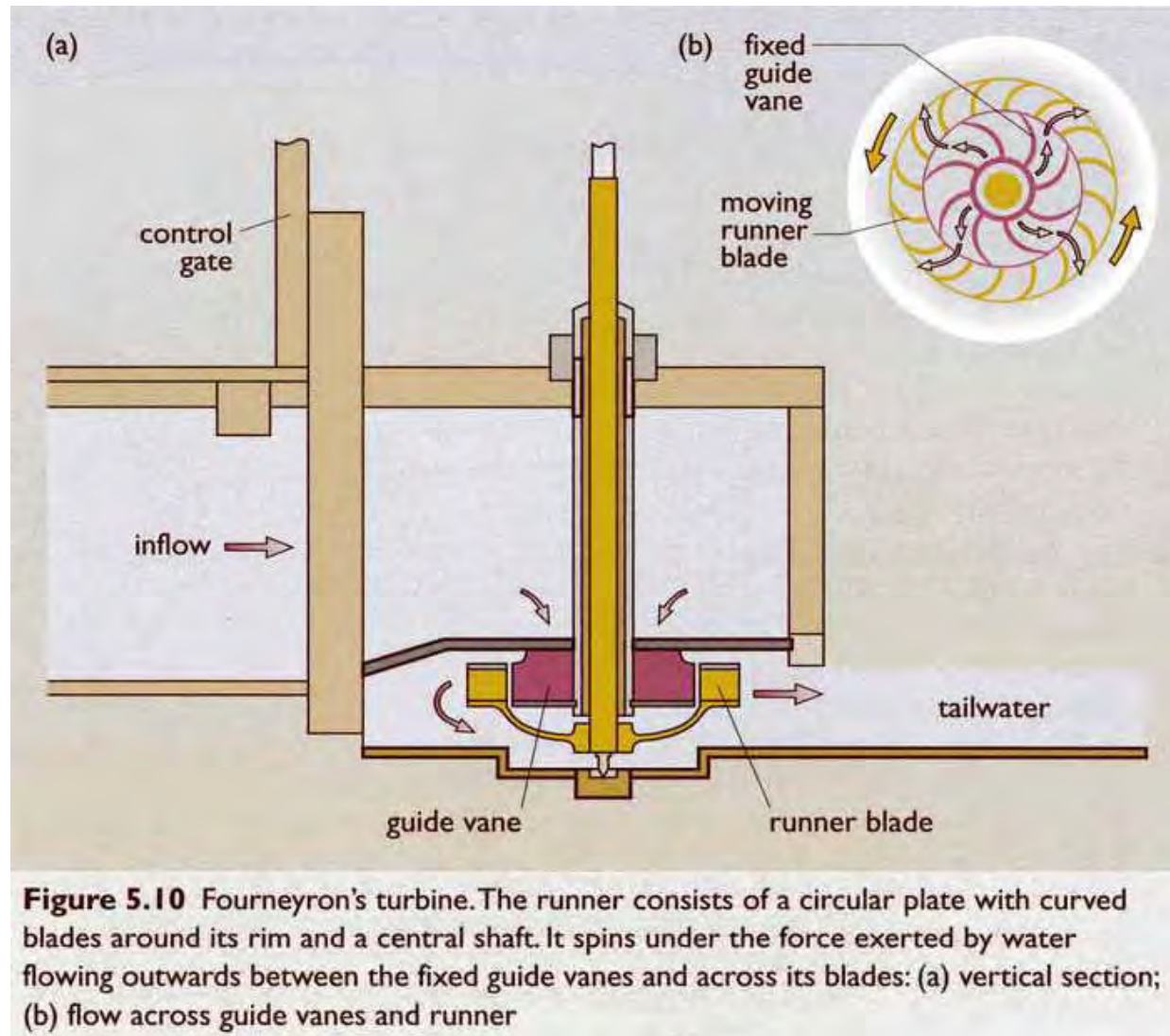
# U osnovni način iskorištavanja energije vodotokova je star više tisuća godina



Izvedbe se razlikuju po:

- načinu dovođenja vode,
- tipu i
- efikasnosti pretvorbe

# Prva prava turbina 1827 godine (Fourneyronova turbina)

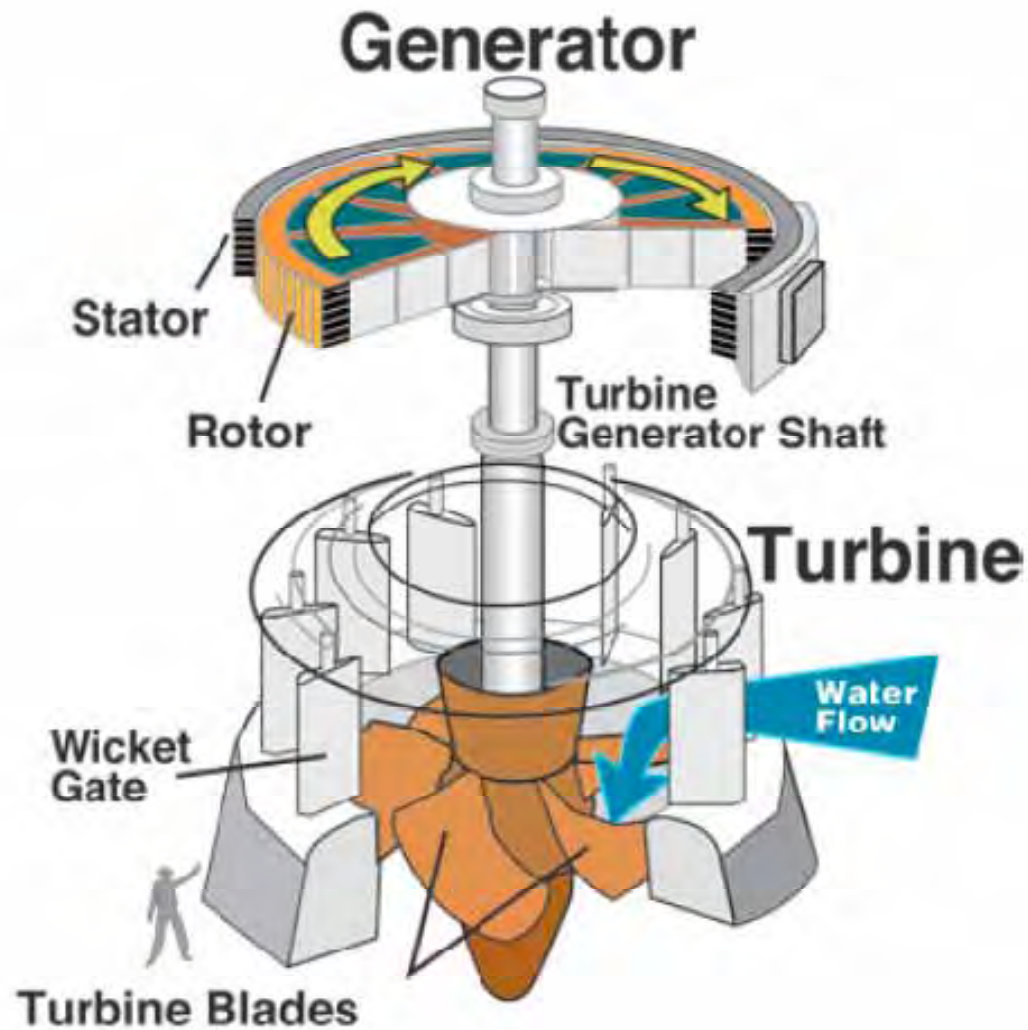


**Figure 5.10** Fourneyron's turbine. The runner consists of a circular plate with curved blades around its rim and a central shaft. It spins under the force exerted by water flowing outwards between the fixed guide vanes and across its blades: (a) vertical section; (b) flow across guide vanes and runner



# Primjer moderne reakcijske turbine

---



**Efikasnosti  
modernih turbina  
su od 75 do 95%**



## Hidrološka svojstva i karakteristike lokacije HE

---

- Protok u vodotoku je promjenjiv u prostoru (od izvora do ušća) i vremenu
- Vrlo približno se snaga HE može jednostavno procijeniti poznavajući potencijalnu energiju vode za dani pad i raspoloživi volumni (maseni) protok vode
- Ukupna proizvedena energija u HE ovisi o stalnosti pretpostavljenog protoka i raspoloživosti pretpostavljenog pada vode

# Snaga i energija HE

---

$$W = mgh \quad /t \quad [\text{W}]$$

maseni protok,  $\dot{m}$  [kg/s]

$$\frac{W}{t} = P = \left(\frac{m}{t}\right) gh$$

volumni protok,  $Q$  [m<sup>3</sup>/s]

$$P = \left(\frac{V}{t}\right) \rho \cdot g \cdot h = Q \cdot \rho \cdot g \cdot h$$

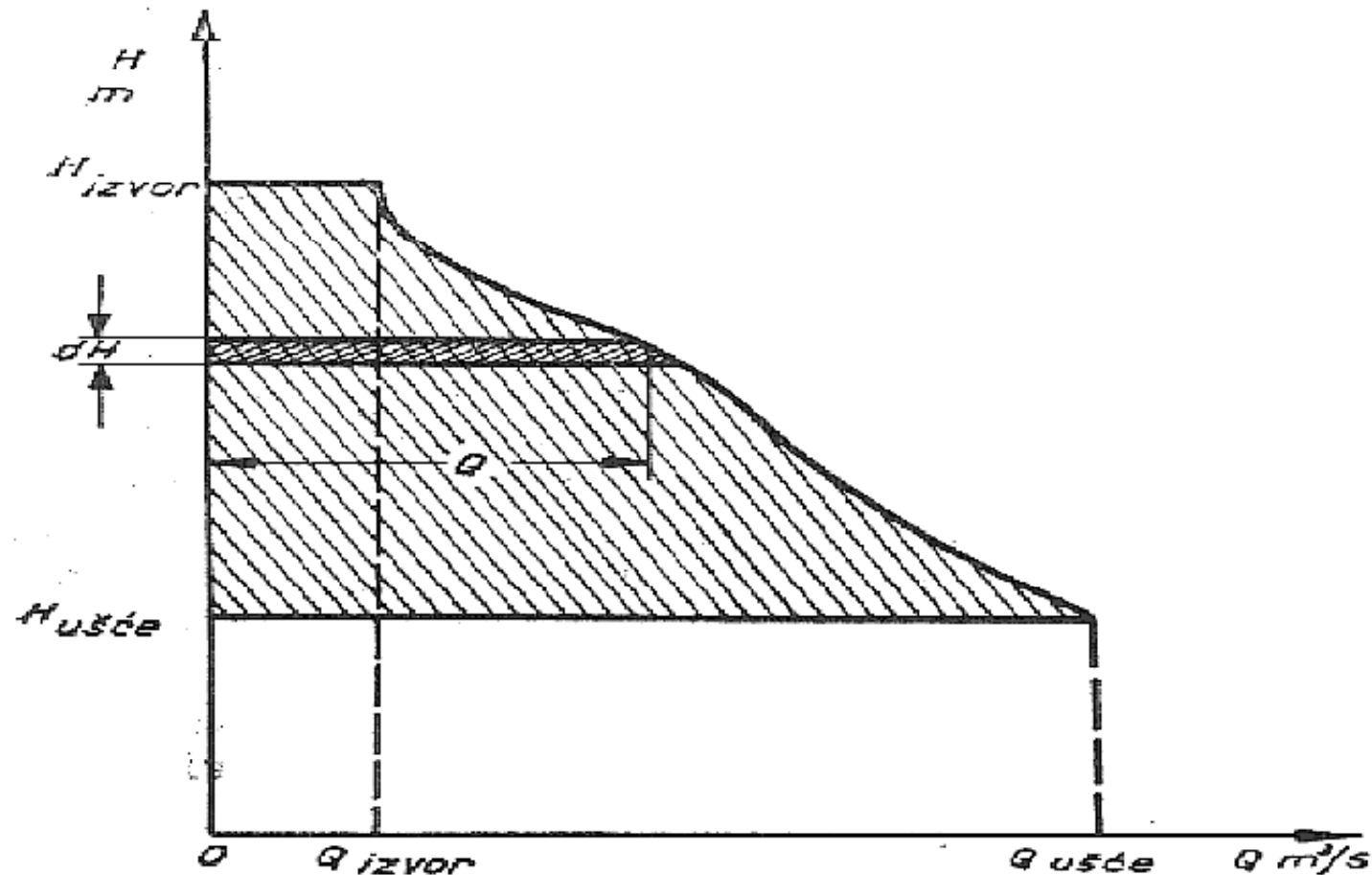
$$P = 9.81 \cdot 10^3 \cdot Q \cdot h \quad [\text{W}]$$

$$\text{Snaga HE} \quad P = 9,81 Q_{si} h \quad [\text{kW}]$$

$$\text{Vjerojatna energija} \quad W = 8760 P \quad [\text{kWh}]$$

# Q - H dijagram (1)

Q-H dijagram opisuje protok vode u osnovnom vodotoku od izvora do ušća



## Q - H dijagram (2)

---

Integral funkcije  $Q_{sr}(H)$  po  $dH$  od izvora do ušća daje *bruto* snagu odnosno energiju vodotoka:

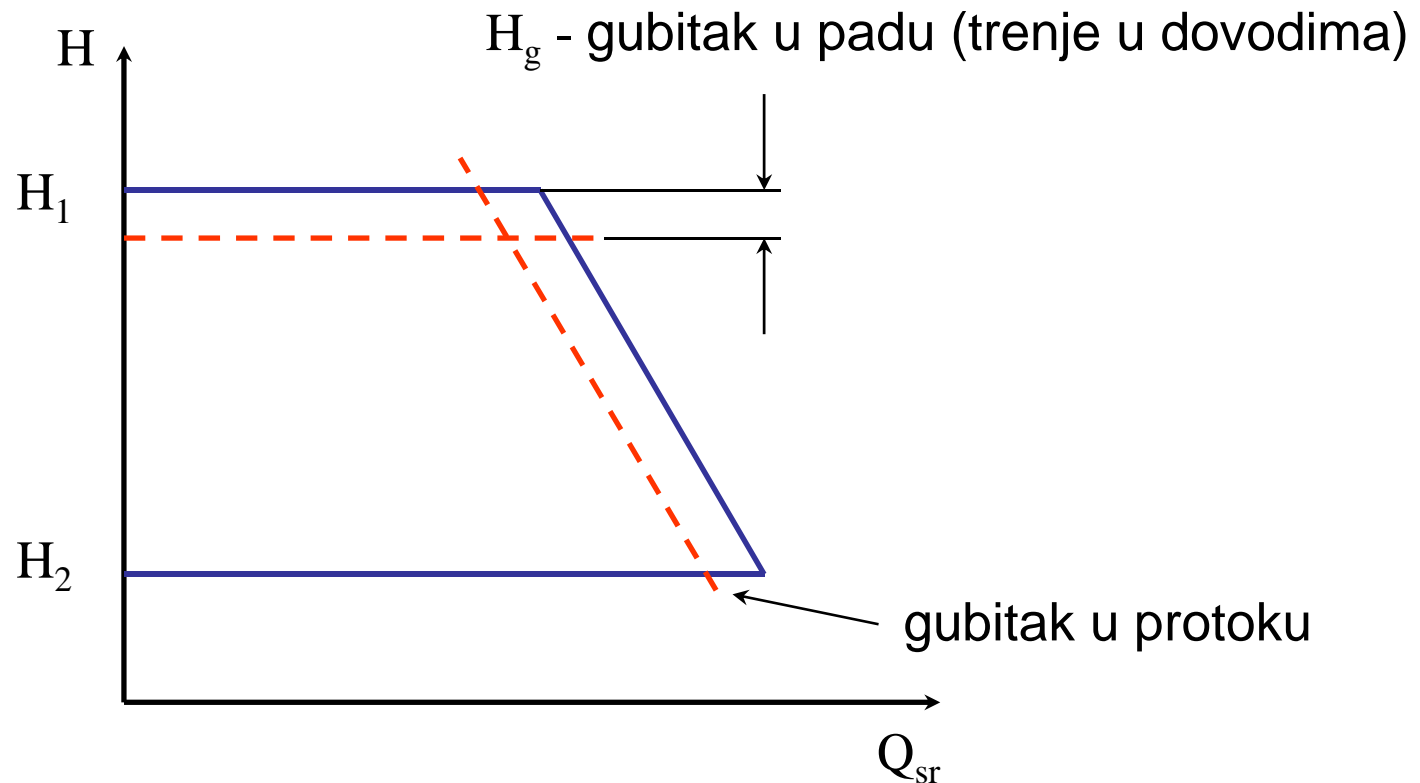
$$dP = 9,81 \cdot Q_{sr}(H) \cdot dH$$

$$P = 9,81 \int_{H_u}^{H_i} Q(H) dH$$

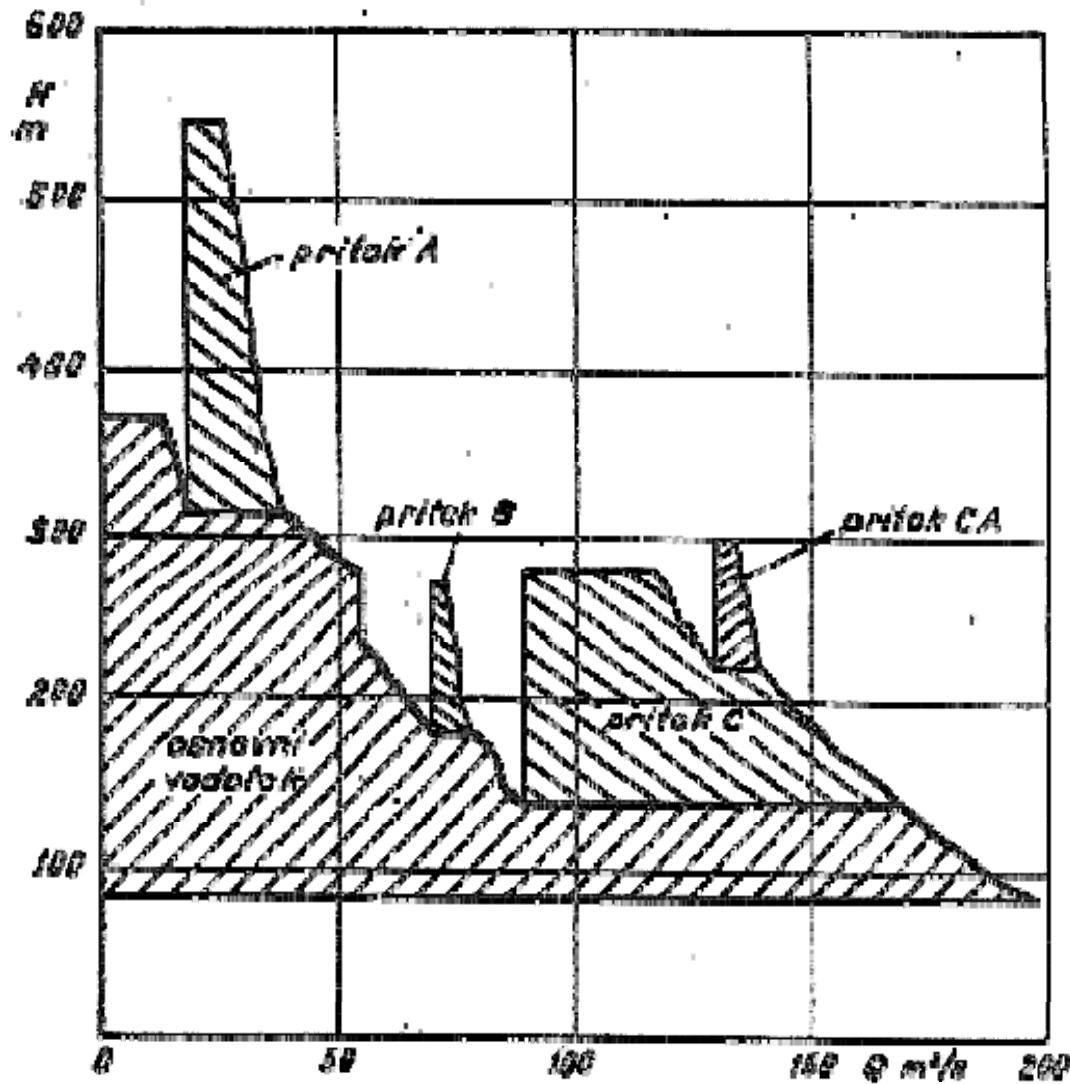
$$W = 8760 \cdot 9,81 \int_{H_u}^{H_i} Q(H) dH$$

## Q - H dijagram (3)

- tehnički iskoristiva energija vodotoka smanjena je zbog trenja u dovodima (tunel, tlačni cjevovod) te gubitaka protoka



## Q - H dijagram (4)



Primjer Q-H  
dijagrama  
za vodotok s  
pritocima

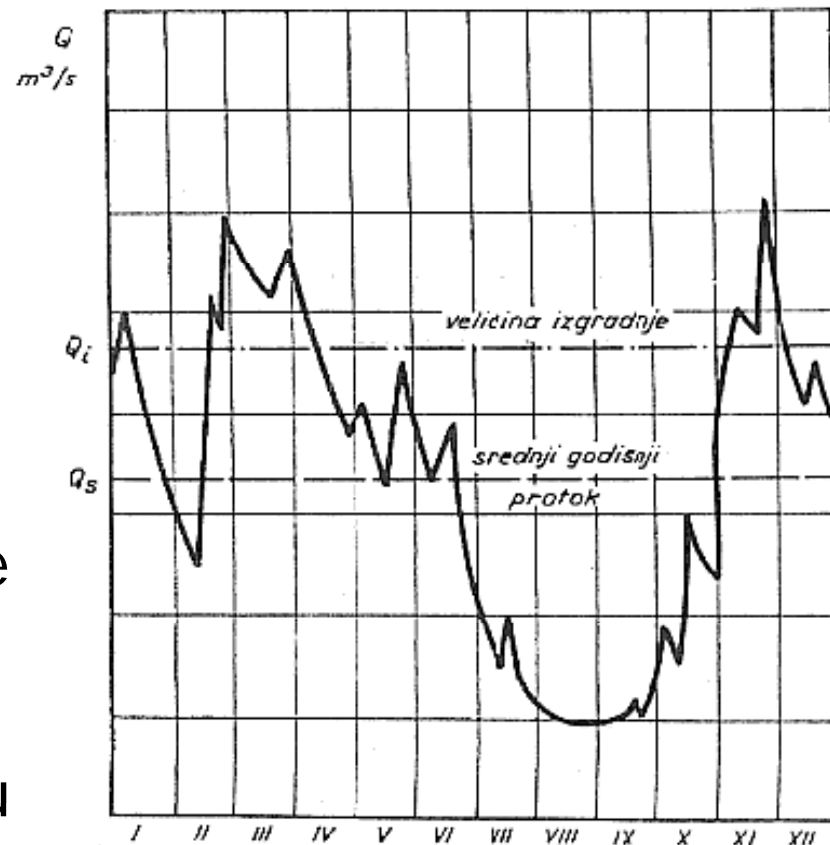
# Hidrološka svojstva HE (1)

- količina vode koja pritječe u vodotoke definira se kao:

$$\text{faktor otjecanja} = \frac{\text{voda u promatranom vodotoku}}{\text{oborinsko područje} \cdot \text{količina padavina}}$$

faktor otjecanja ide i do 0,95

- mogućnost pretvorbe energije položaja vode ovisi o poznavanju količine vode u vodotoku po iznosu i vremenu ( $H=f(Q)$  – konsumpciona krivulja)



**Kretanje protoka za jedan vodotok  
na jednom mjestu u nekoj godini**

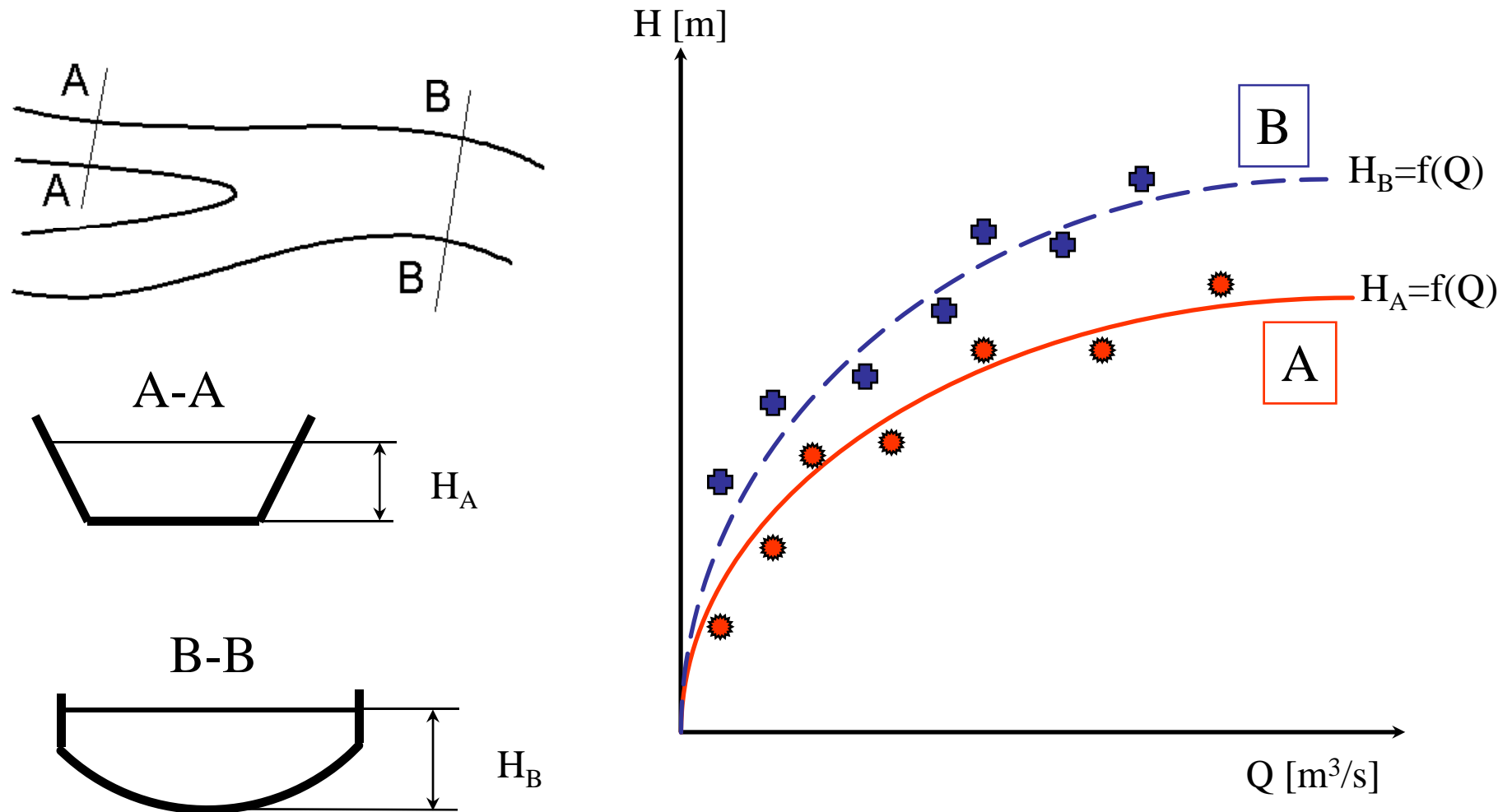
## Hidrološka svojstva HE (2)

---

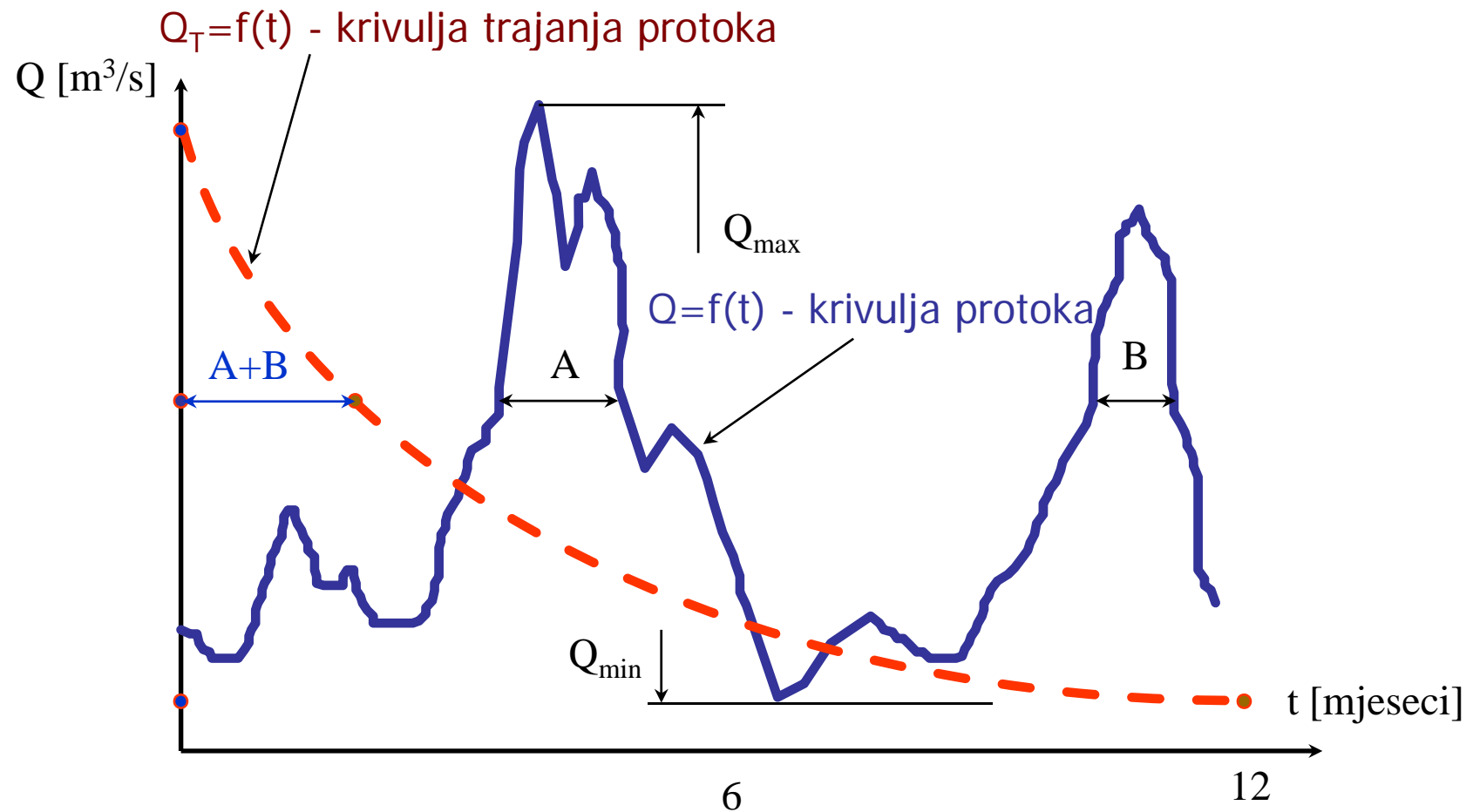
- količinu vode u vodotoku određuje:
  - količina oborina
  - sastav i topografija tla
  - vremenski raspored oborina
- osnovno mjerenje razine vode u vodotoku (vodostaj) pomoću vodokaza
- ***KONSUMPCIONA KRIVULJA***
  - istovremeno mjerenje protoka na određenom mjestu vodotoka, odnosno na određenom profilu
  - mjerenja se obavljaju za određeno mjesto i sve očekivane vodostaje
  - ovisna je o obliku korita na mjestu *vodokaza*



# Konsumpciona krivulja



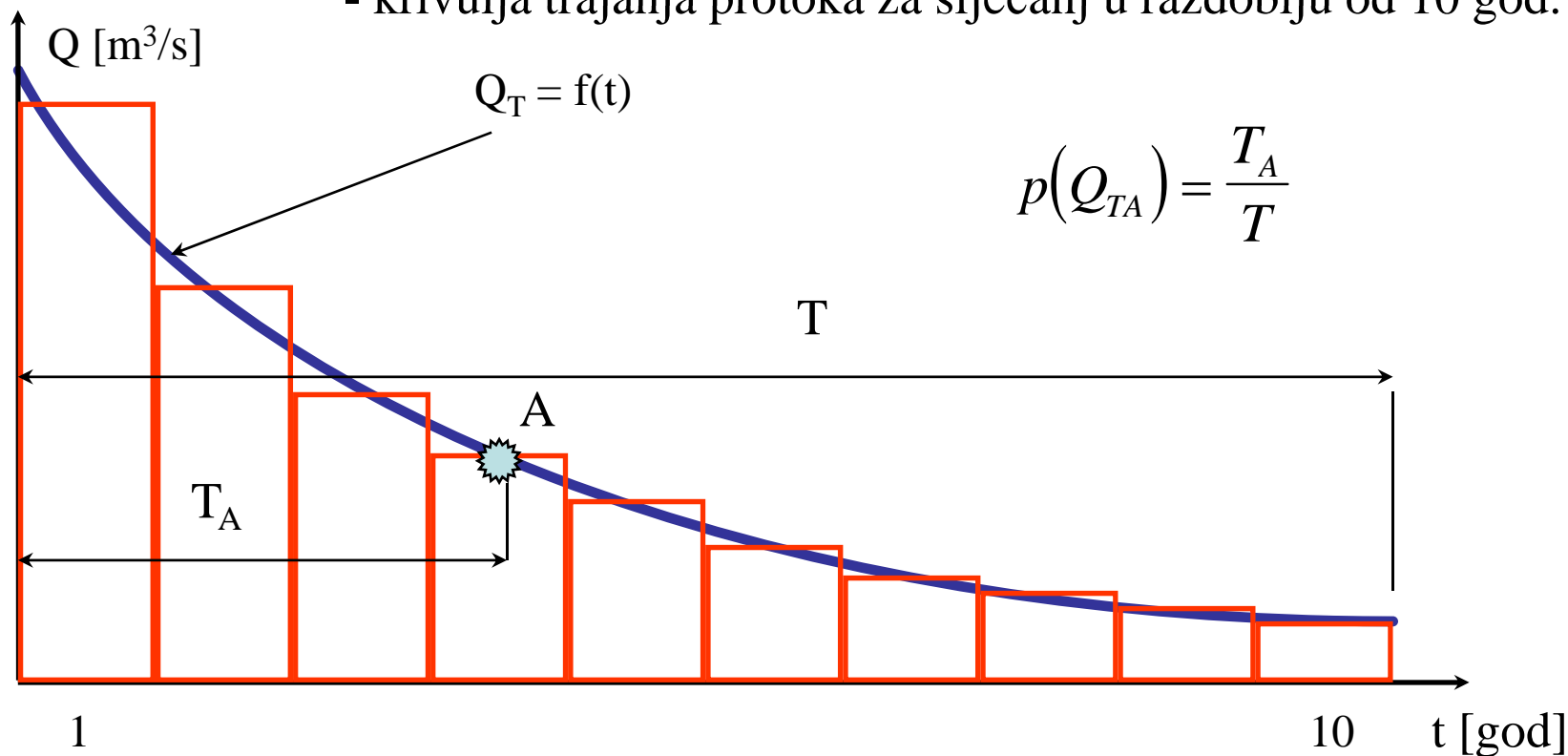
# Krivulja trajanja protoka (1)



## Krivulja trajanja protoka (2)

- krivulja trajanja protoka predstavlja vjerojatnosnu krivulju - vjerojatnost pojave protoka  $Q_{TA}$  jednaka je omjeru vremena  $T_A$  i ukupnog vremena promatranja

- krivulja trajanja protoka za siječanj u razdoblju od 10 god.



## Krivulja trajanja protoka (3)

---

- ukupna količina vode koja proteče kroz promatrani profil vodotoka

$$V_{Ag} = \int_0^{12} Q(t) dt = \int_0^{12} Q_T(t) dt \quad [\text{m}^3]$$

- srednji godišnji protok vodotoka

$$Q_{sr} = \frac{V_{Ag}}{31,54 \cdot 10^6} \quad [\text{m}^3 / \text{s}]$$

# Veličina izgradnje - $Q_i$

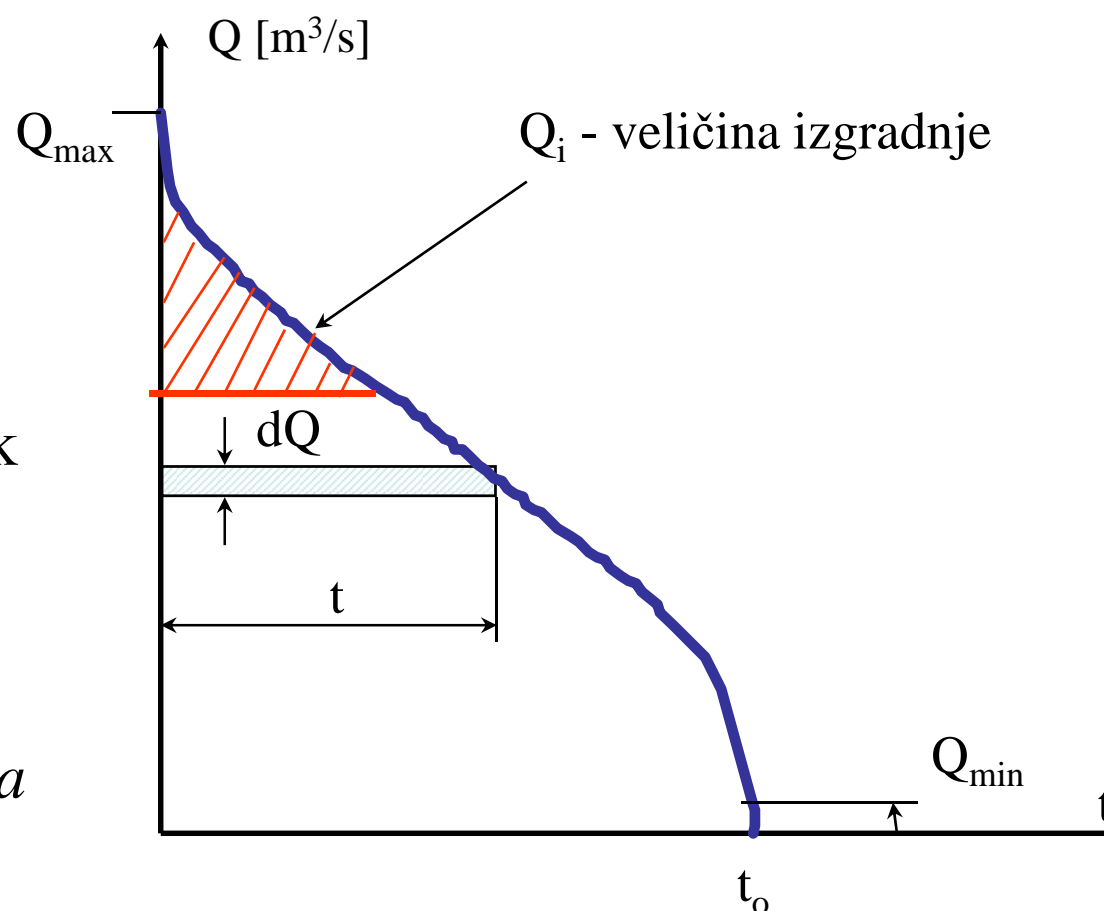
- maksimalni protok koji može HE propustiti kroz postrojenje
- iskoristivi volumen vode  $V_i$

$$V_i = \int_0^{Q_i} t dQ$$

- srednji iskoristivi protok

$$Q_{si} = \frac{V_i}{t_o} = \frac{V_i}{31.54 \cdot 10^6}$$

$$\frac{V_i}{V_{Ag}} - \text{stupanj iskorištenja vode}$$



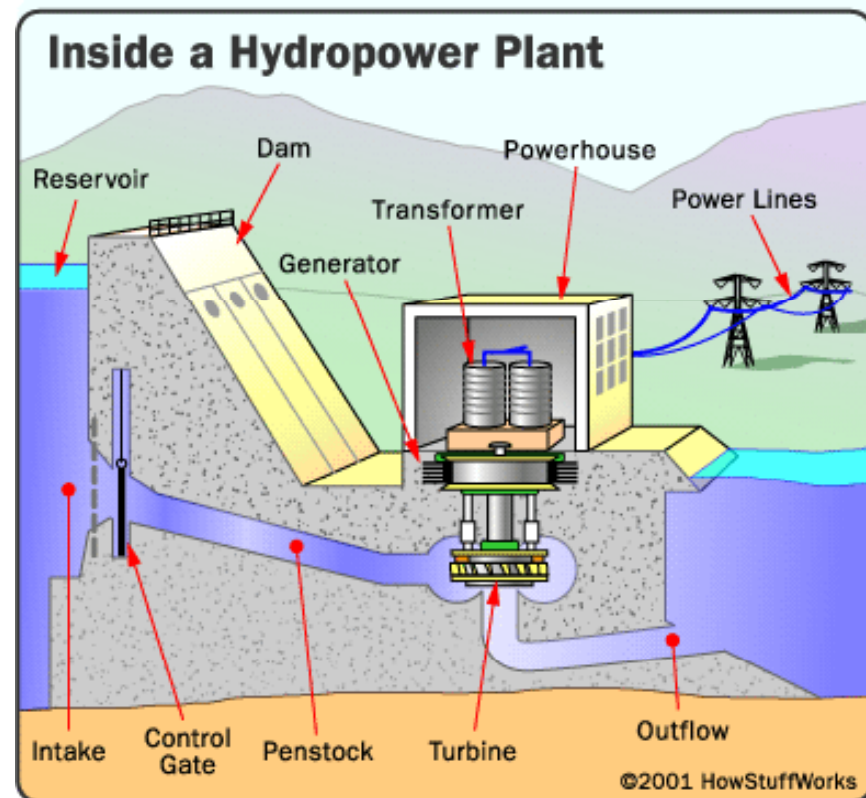
# Hidroelektrane (HE) - definicija

---

- HE su postrojenja u kojima se energija položaja vode pretvara u električnu energiju
- HE se sastoji od objekata i dijelova koji služe za:
  - skupljanje vode,
  - odvođenje vode,
  - pretvorbu energije položaja vode u mehaničku energiju,
  - pretvorbu mehaničke u električnu energiju,
  - transformaciju električne energije i
  - razvod električne energije

# Hidroelektrane - dijelovi

- brana ili pregrada
- zahvat vode
- dovod vode
- vodna komora, vodostan
- tlačni cjevovod, kanal
- strojarnica
- odvod vode



# HE - uvjeti izgradnje

---

- topografski i geološki uvjeti
- pogonski zahtjevi
- hidroenergetsko iskorištenje vodotoka
- uvjeti poljoprivrede i opskrbe vodom
- ribarstvo i ekologija



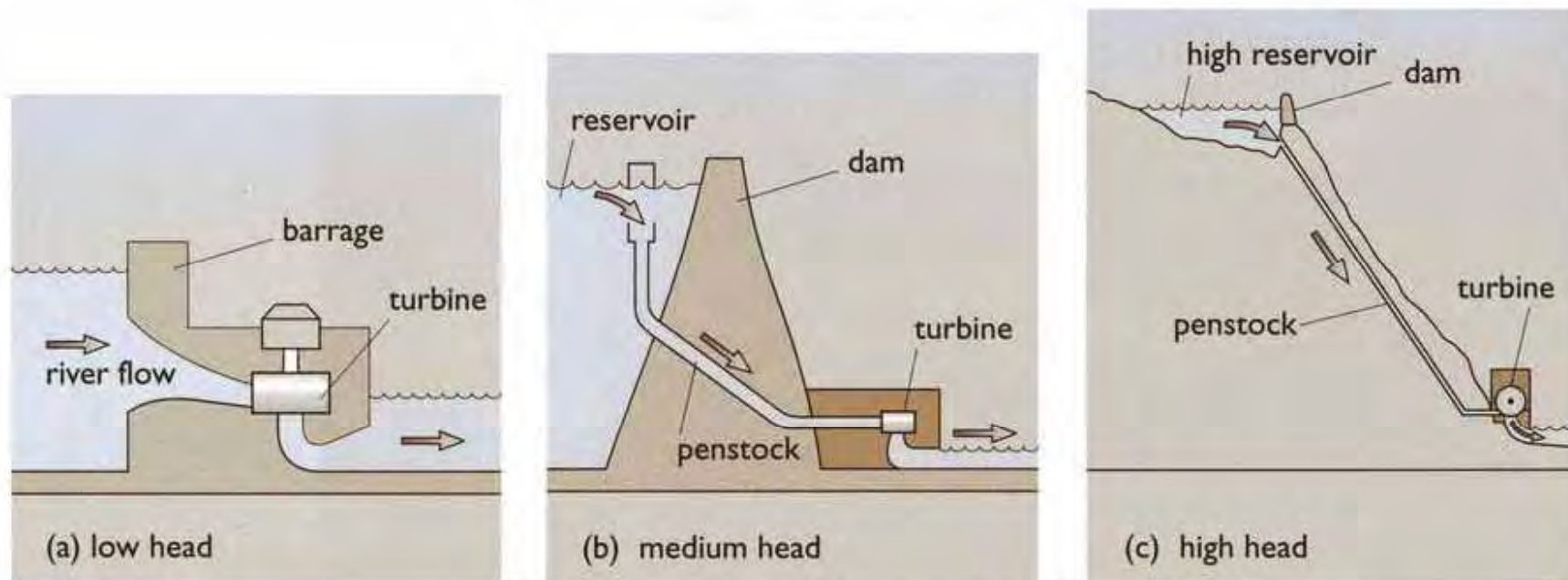
# Hidroelektrane - podjela

---

- prema padu
  - niskotlačne (do 25 m)
  - srednjetlačne (25 - 200 m)
  - visokotlačne (> 200 m)
- HE koje koriste promjenu razine mora (plima i oseka)
- prema korištenju vode
  - protočne
    - pribranske
    - derivacijske
  - crpno-akumulacijske
    - dnevne (punjenje po noći, pražnjenje po danu)
    - sezonske (ravnoteža kišnog i sušnog perioda)

# Osnovne izvedbe HE ovisno o raspoloživom padu vode

- mali pad - niskotlačne (do 25 m)
- srednji pad - srednjetlačne (25 - 200 m)
- veliki pad - visokotlačne ( $> 200$  m)



**Figure 5.13** Types of hydroelectric installation

Boyle, *Renewable Energy*, 2<sup>nd</sup> edition, Oxford University Press, 2003

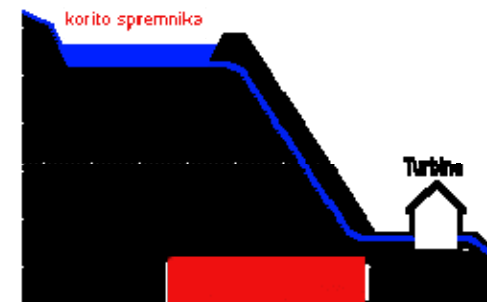
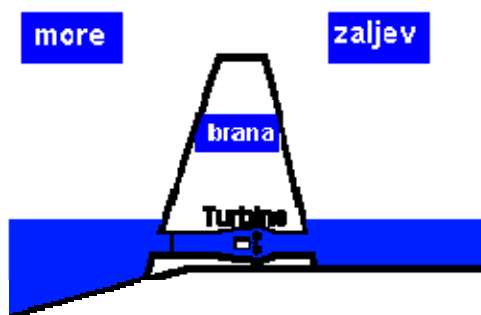
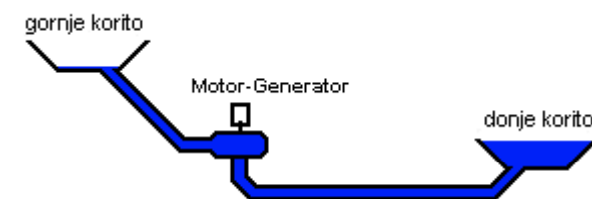
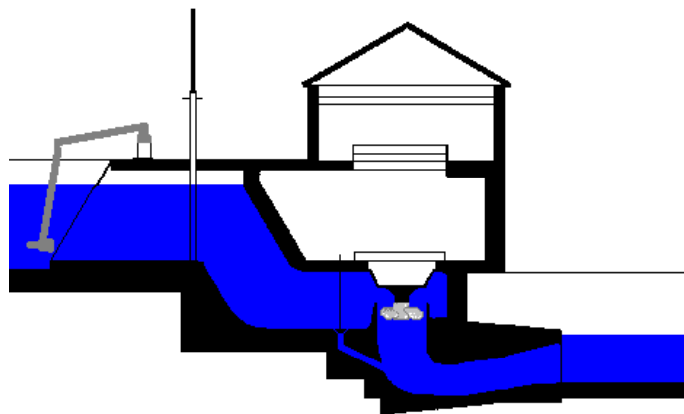
# Hidroelektrane – podjela prema veličini

---

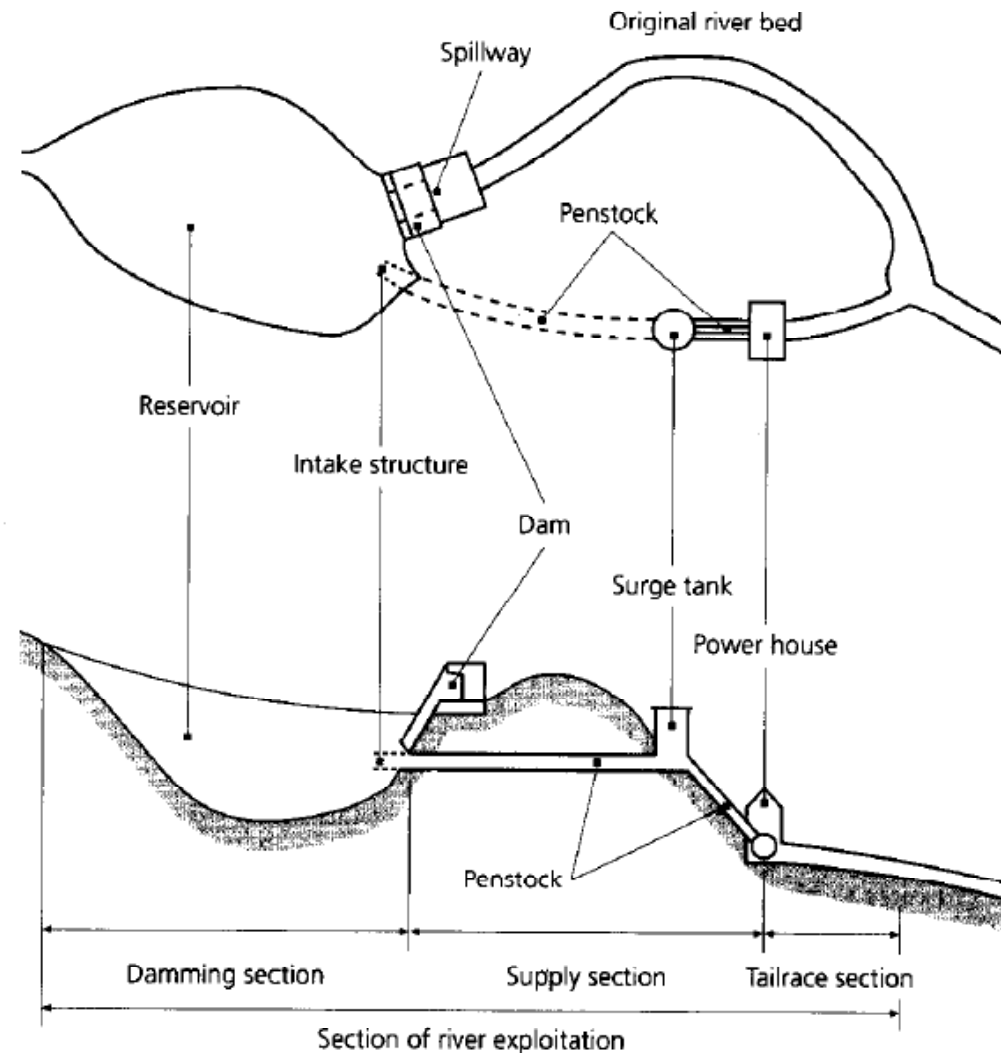
- Velike HE
  - Snaga veća od 100 MW, spojene na EES
- Srednje HE
  - Snage 15 - 100 MW, obično spojene na EES
- Male HE
  - Snage 1 - 15 MW, obično spojene na EES
- Mini HE
  - Snage od 100 kW do 1 MW
  - Otočni rad ili direktni spoj na EES ovisno o lokaciji
- Mikro HE
  - Snage od 5kW do 100 kW
  - Obično otočni rad iako se u novije vrijeme razmatra spajanja na EES.
- Piko HE
  - Od 100 W do 5kW
  - Izolirana područja, posebne aplikacije.

# HE – animacija rada različitih tipova

---

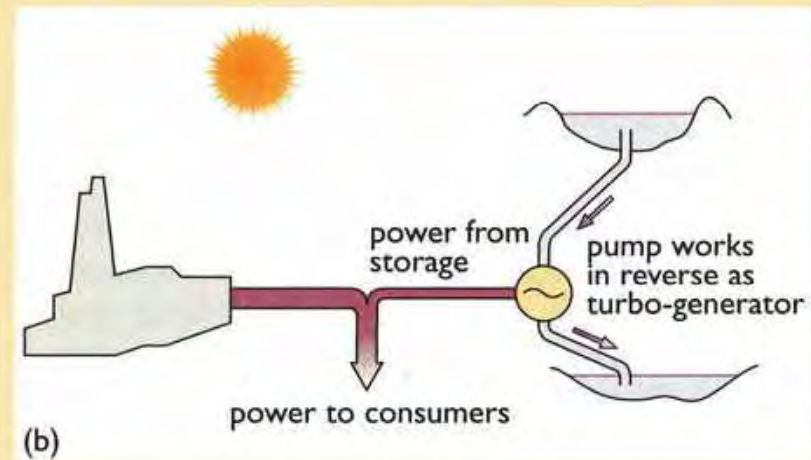
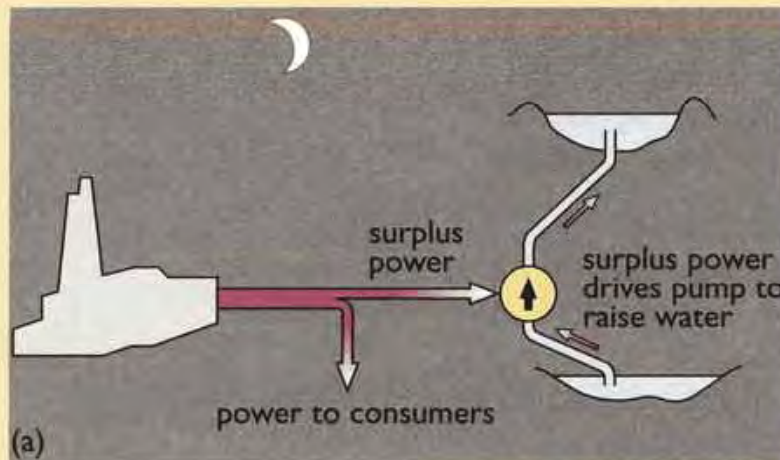
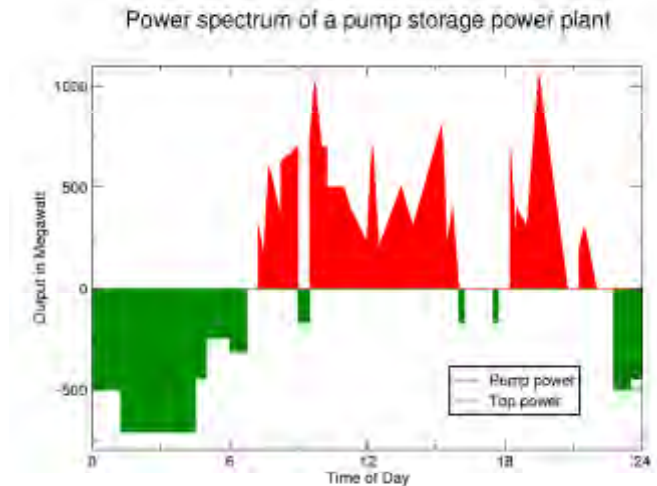


# Moguća izvedba HE s oduzimanjem vode iz akumulacije i vraćanjem u vodotok



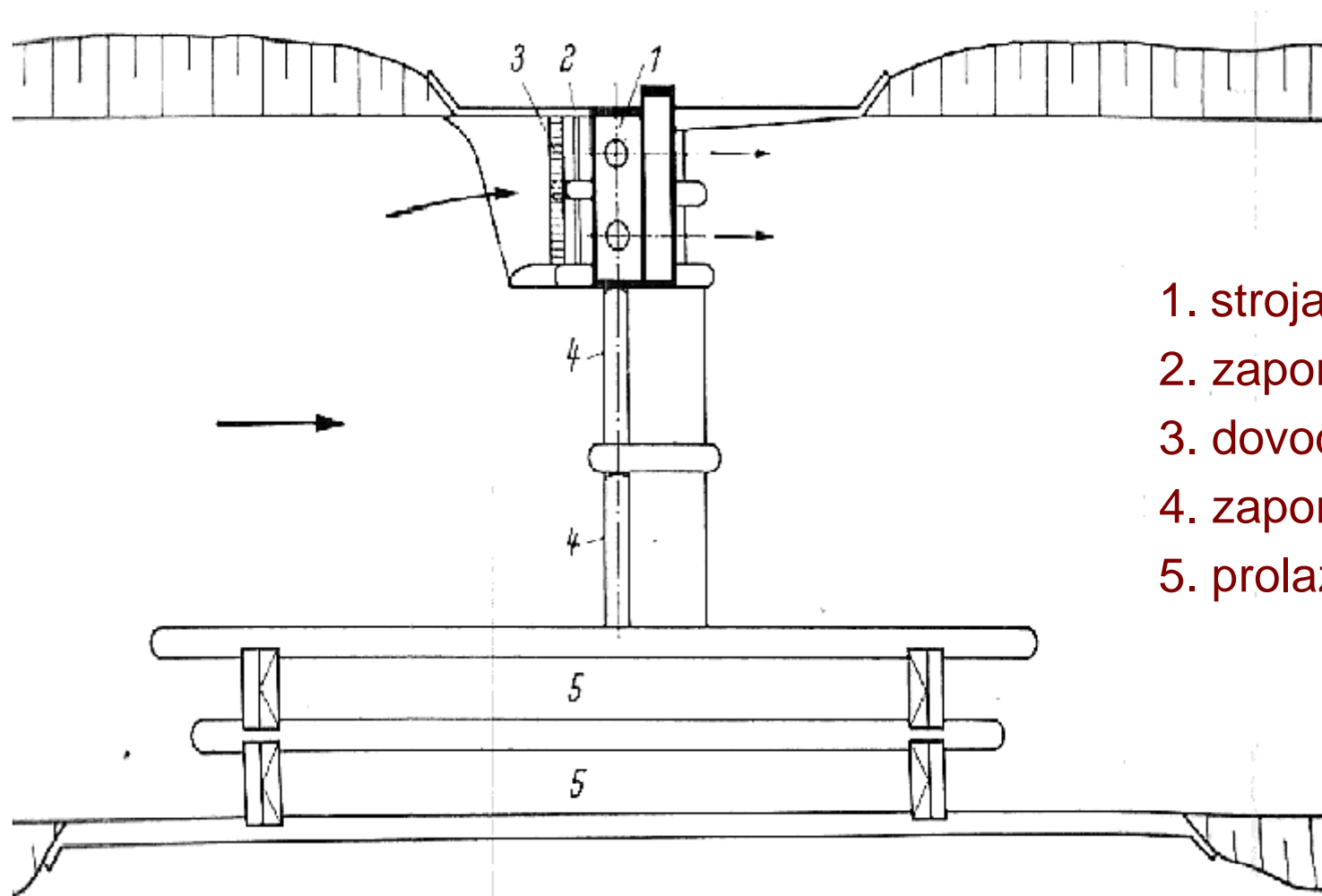
# Način korištenja pumpne HE u dnevno-noćnom režimu rada

- Efikasnost pretvorbe nije na prvom mjestu
- Zadovoljavanje potrošnje u razdobljima povećane potrošnje
- Cijena kWh ovisi o ponudi i potražnji



**Figure 5.27** Pumped storage system: (a) at time of low demand; (b) at time of high demand

# Niskotlačna hidroelektrana (1)



- 1. strojarnica
- 2. zapornice
- 3. dovod
- 4. zapornice
- 5. prolaz za brodove

## Niskotlačna hidroelektrana (2)

---





# Niskotlačna hidroelektrana (3)

HE PODSUSED

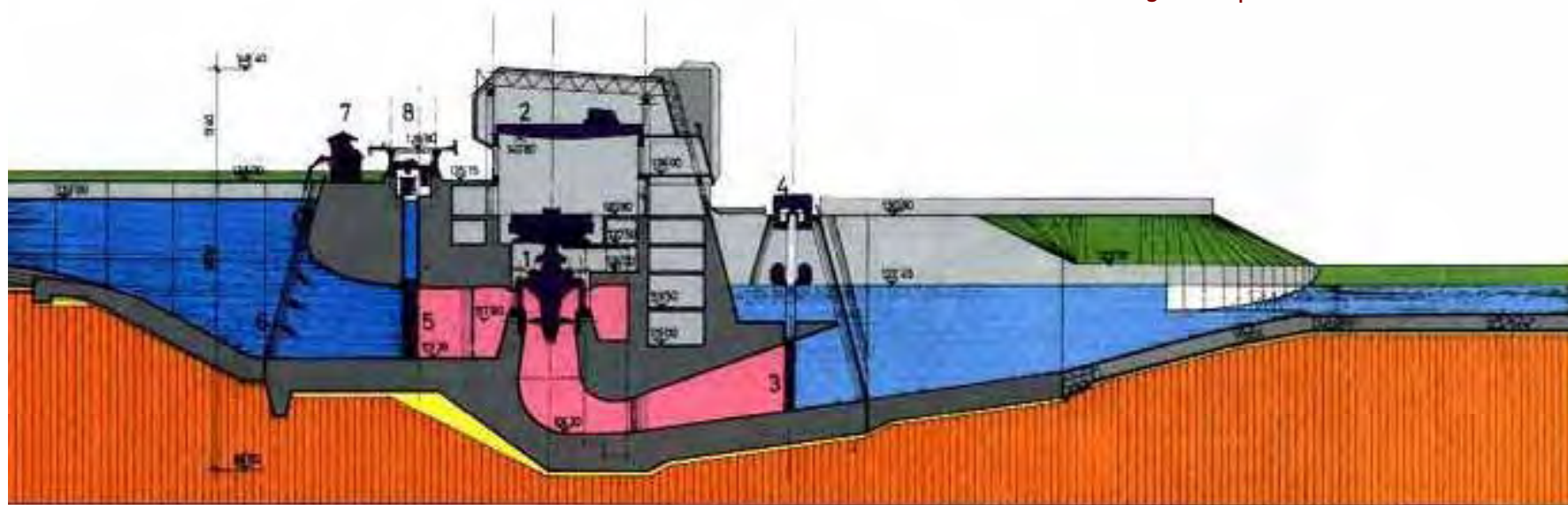
## LEGENDA:

1. PROIZVODNA JEDINICA
2. MOŠNA DIZALICA
3. GREDNA POMOĆNA ZAPORNICA
4. UREDAJ ZA DIZANJE
5. GREDNA POMOĆNA ZAPORNICA
6. REŠETKA
7. ČISTILICA
8. PROMETNI MOST

Instalirana snaga  $P=43$  MW

Godišnja proizvodnja  $W_{Ee}= 220 \times 10^6$  kWh

Investicija  $C_i=135 \times 10^6$  EUR



0 5 10 15 20m

PRESJEK KROZ STROJARNICU

# Niskotlačna hidroelektrana (4)

HE PODSUSED

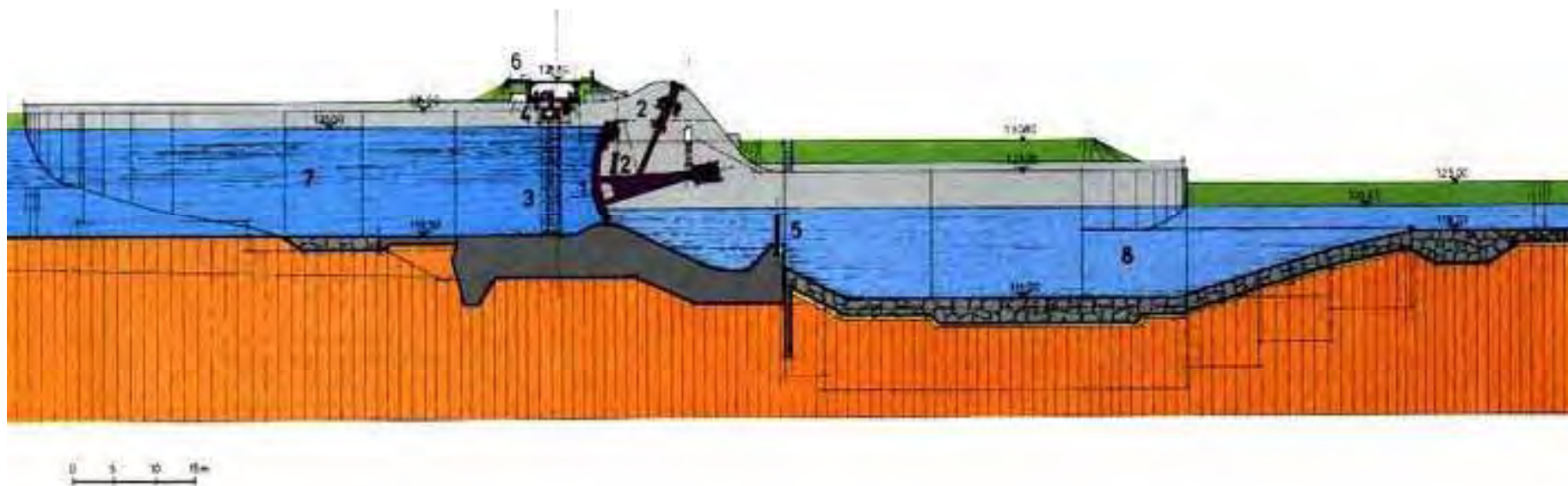
## LEGENDA:

1. SEGMENTNI ZATVARAČ SA ZAKLOPKOM
2. SERVOMOTOR
3. GREDNA POMOĆNA ZAPORNICA
4. MOĆNA DIZALICA
5. POMOĆNA ZAPORNICA
6. PROMETNI MOST
7. NORMALNI USPOR
8. DONJA VODA

Instalirana snaga  $P=43$  MW

Godišnja proizvodnja  $W_{Ee}= 220 \times 10^6$  kWh

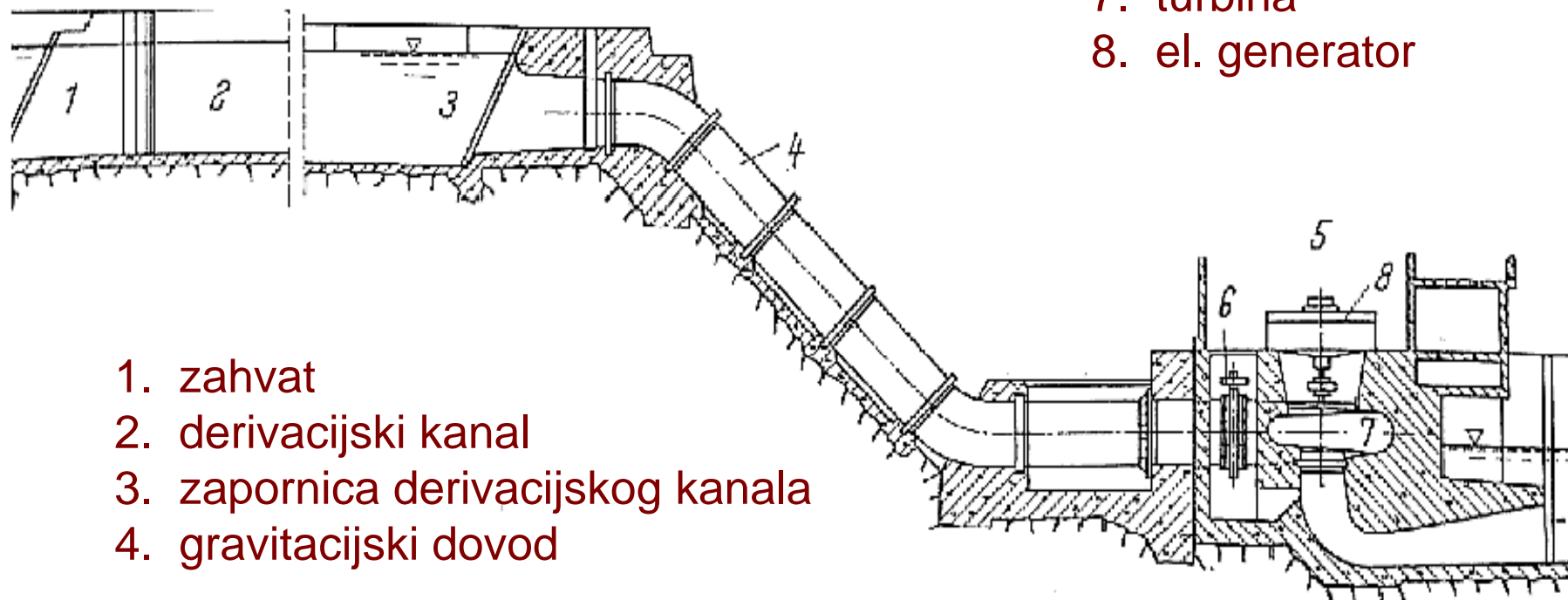
Investicija  $C_i=135 \times 10^6$  EUR



PRESJEK KROZ PROTOČNO POLJE

# Srednjetlačna HE - derivacijski tip (1)

---

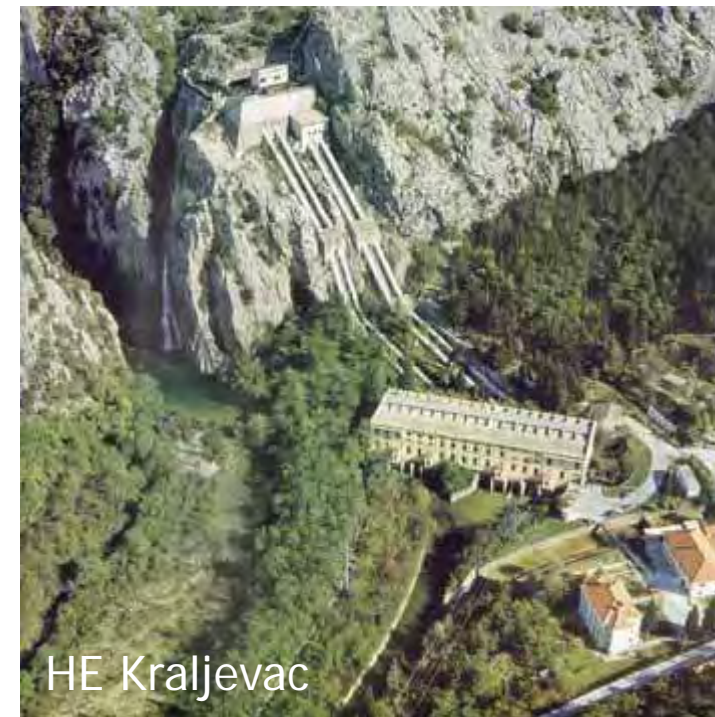


# Srednjetlačna HE - derivacijski tip (2)

## HE Kraljevac:

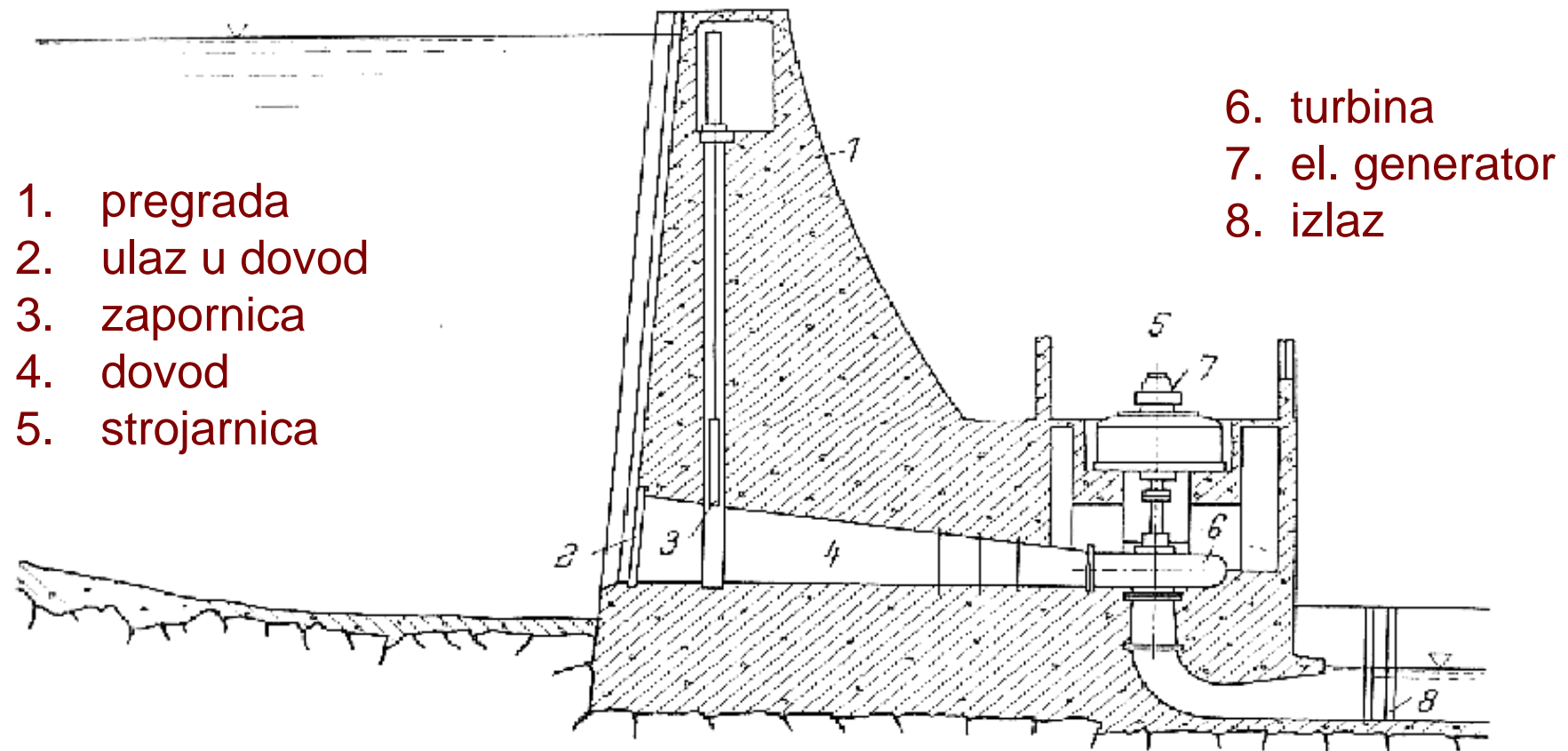
- pad od 110 m; na Cetini;
  - građena u tri etape: 1912. 30 m<sup>3</sup>/s, 2x12,8 MW; 1932. dodano 2x20,8 MW, 50 m<sup>3</sup>/s -> najveća hidroelektrana na Balkanu; 1990. 4.8 MW (mjesto agregata iz 1912.)
- Instalirana snaga HE Kraljevac iznosi 59,2 MW (2x20,8 + 12,8 + 4,8), a prosječna godišnja proizvodnja 40 GWh.

Puštanjem u pogon druge etape na HE Zakućac, gubi se značaj HE Kraljevac. Voda iz kompenzacijskog bazena Prančevići najvećim dijelom ide prema turbinama HE Zakućac dok se prema HE Kraljevac ispuštaju vode radi održavanja biološkog minimuma (~ 6 m<sup>3</sup>/s). Taj dio vode kasnije preradi HE Kraljevac s agregatom biološkog minimuma. U slučaju velikih dotoka, kad HE Zakućac ne može primiti svu vodu koja pristigne u Prančeviće, višak se ispušta prema HE Kraljevac.





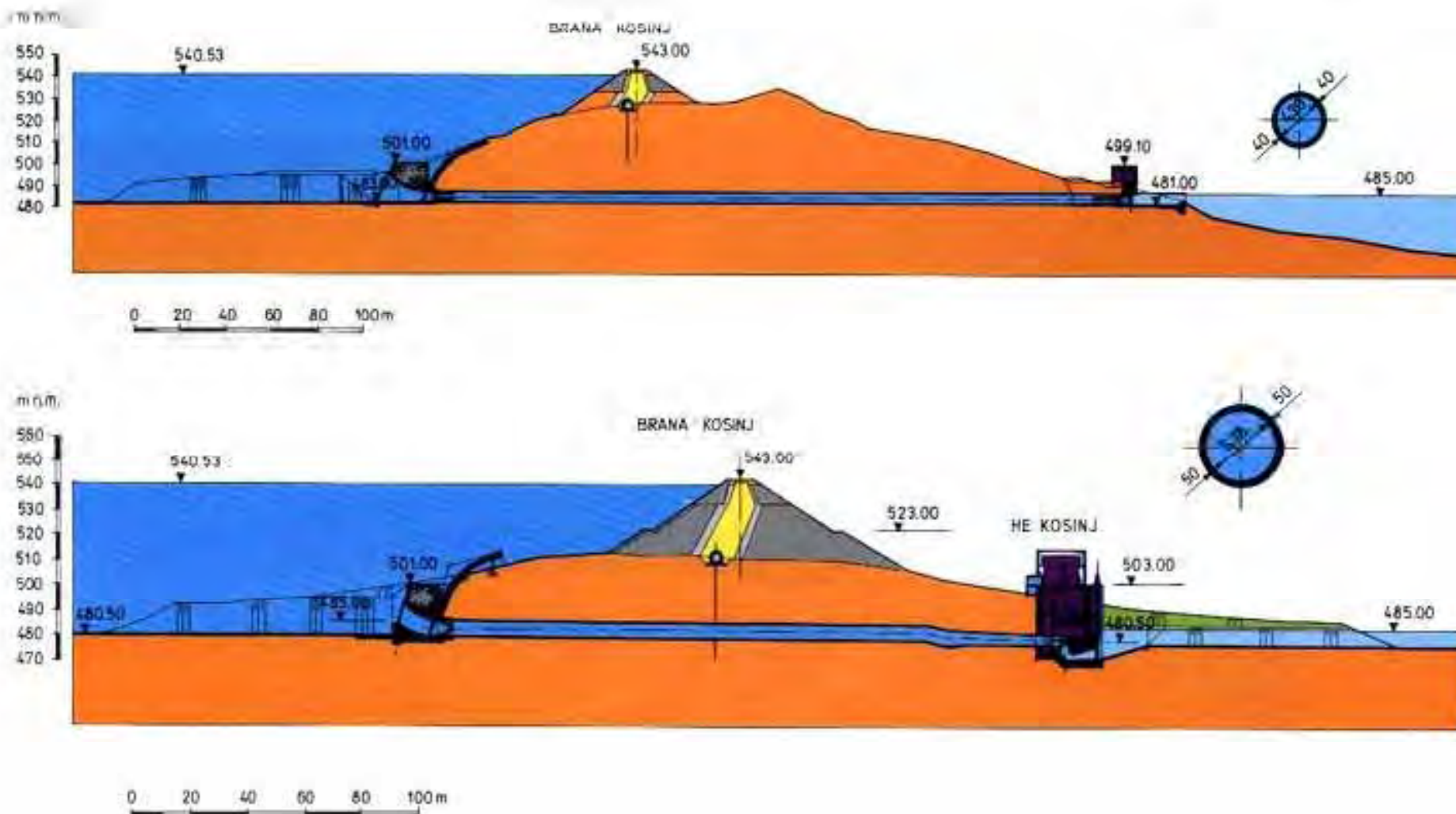
# Srednjetlačna HE - pribranski tip (1)



# Srednjetlačna HE - pribranski tip (2)

Instalirana snaga  $P > 25$  MW Godišnja proizvodnja  $W_{Ee} = 76 \times 10^6$  kWh  
Investicija  $C_i = 160 \times 10^6$  EUR

HE KOSINJ



UZDUŽNI PRESJECI KROZ TEMELJNI ISPUST I POSTROJENJE HE KOSINJ

# Srednjetlačna HE - pribranski tip (3)

## HE LEŠČE

### LEGENDA

1. BRANA
2. STROJARNICA
3. TLAČNI CJEVOD
4. GENERATOR
5. TURBINA
6. ULAŽNI ZATVARAČ
7. IZLAŽNI ZATVARAČ
8. MOSNA DIZALICA
9. ANEKS STROJARNICE
10. KONTROLNA GALERIJA
11. NORMALNI USPOR
12. DONJA VODA

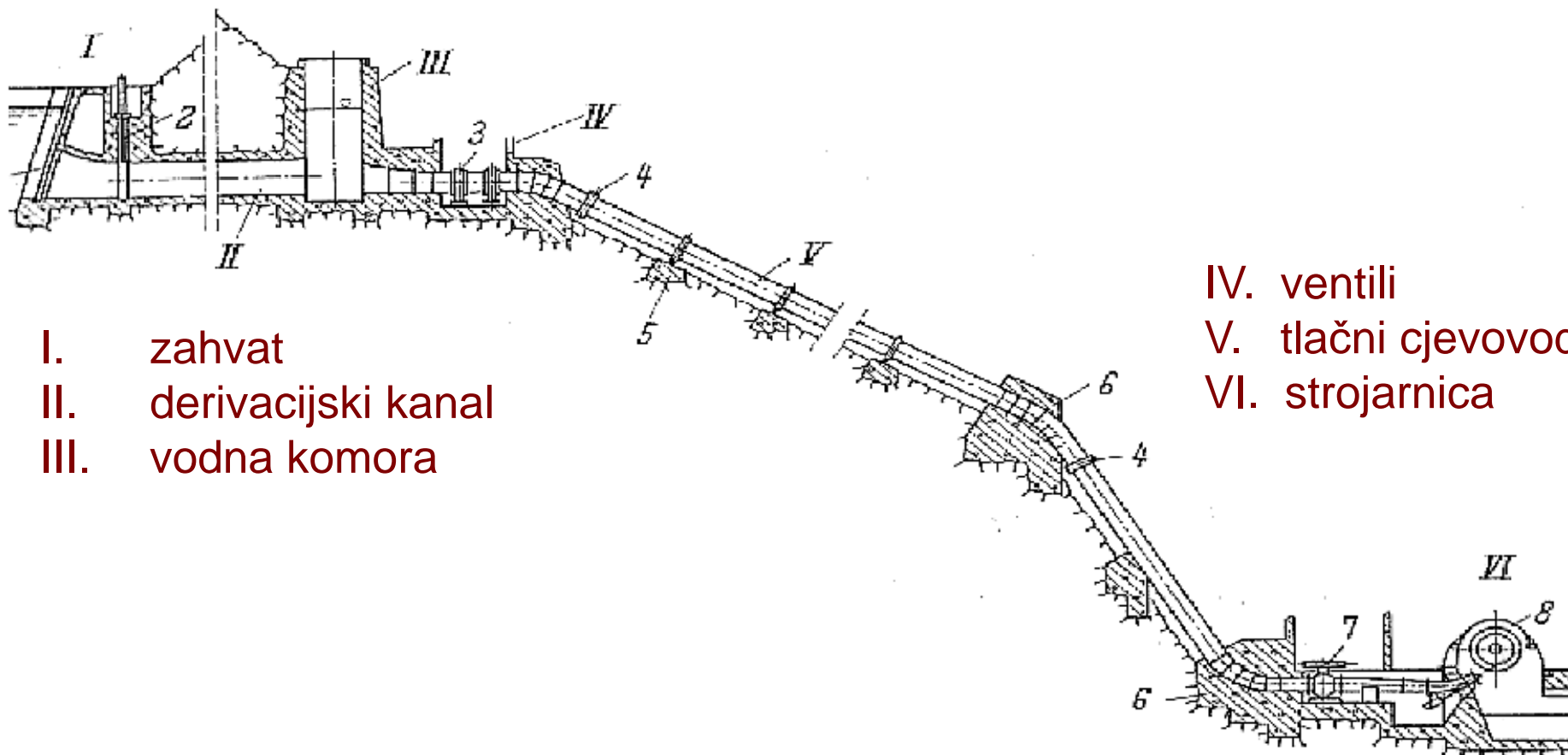
Instalirana snaga  $P=40$  MW

Godišnja proizvodnja  $W_{Ee}=94 \times 10^6$  kWh

Investicija  $C_i=80 \times 10^6$  EUR



# Visokotlačna HE (1)





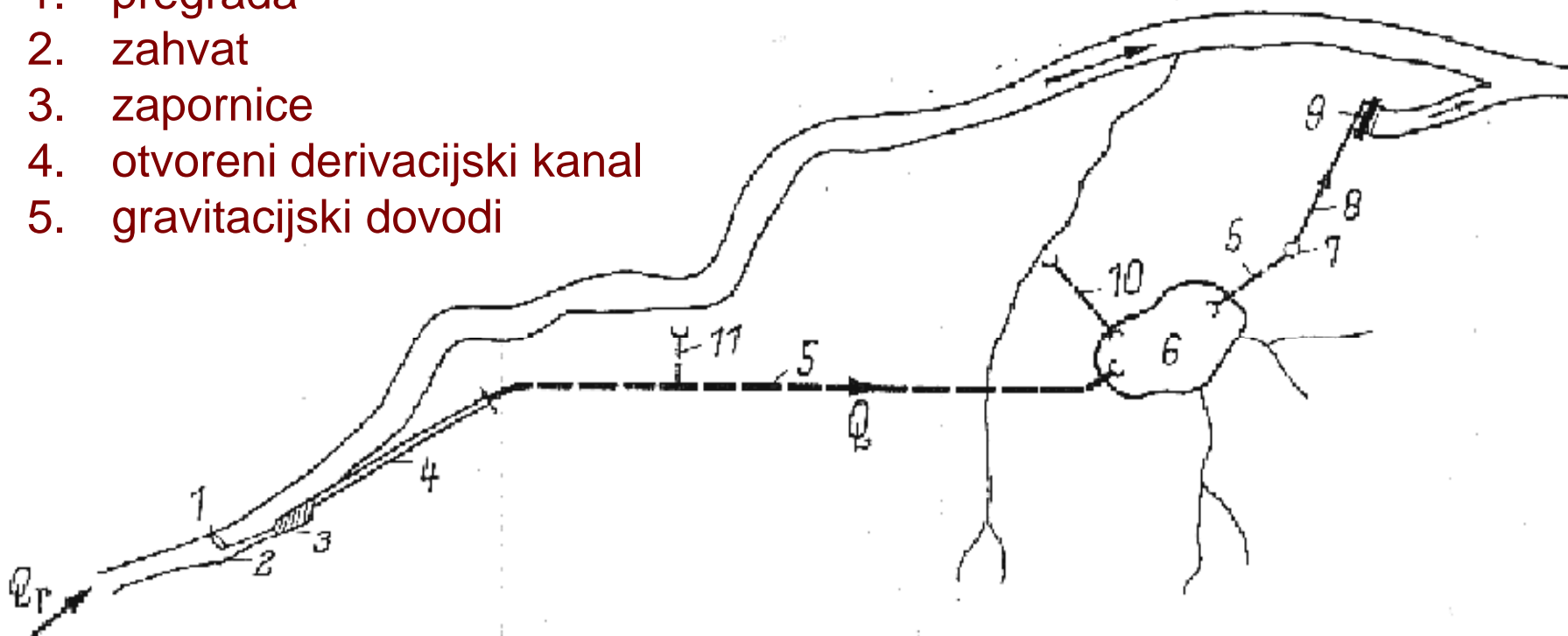
## Visokotlačna HE (2)

---



# Visokotlačna HE s akumulacijom

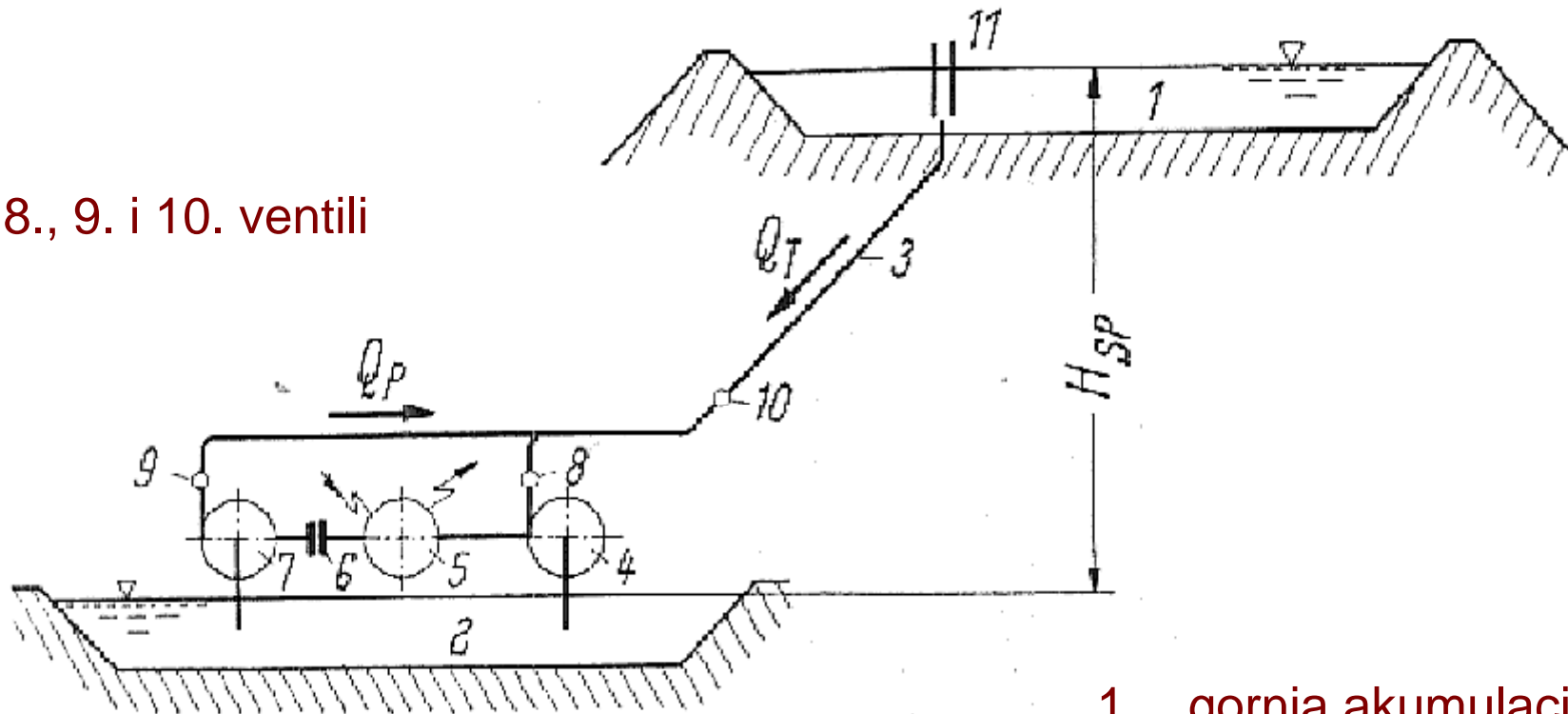
1. pregrada
2. zahvat
3. zapornice
4. otvoreni derivacijski kanal
5. gravitacijski dovodi



6. akumulacijsko jezero
7. vodna komora
8. tlačni cjevovod
9. strojarnica

# Crpno-akumulacijska HE

8., 9. i 10. ventili

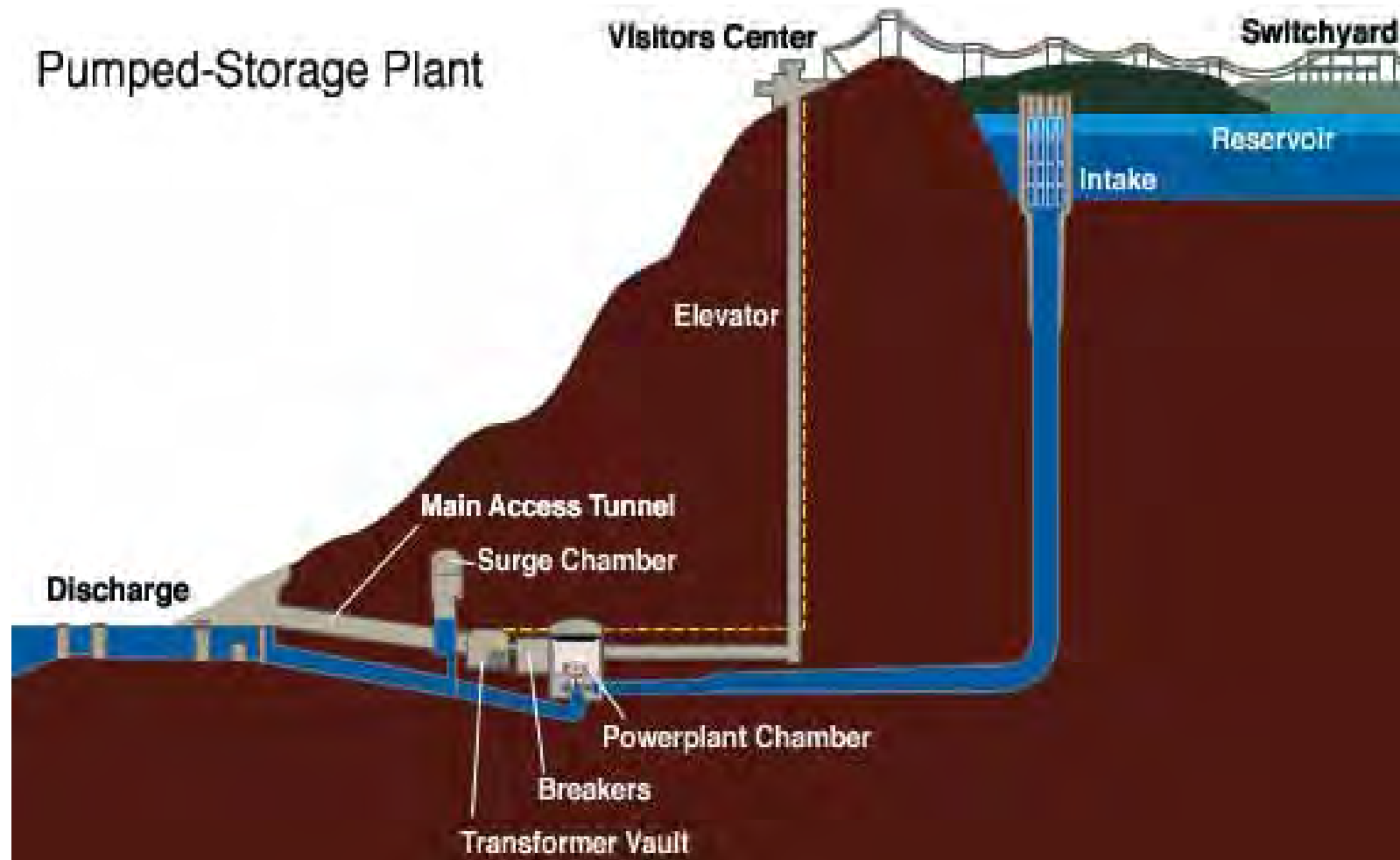


- 5. sink. generator
- 6. spojka
- 7. crpka

- 1. gornja akumulacija
- 2. donja akumulacija
- 3. tlačni cjevovod
- 4. turbina

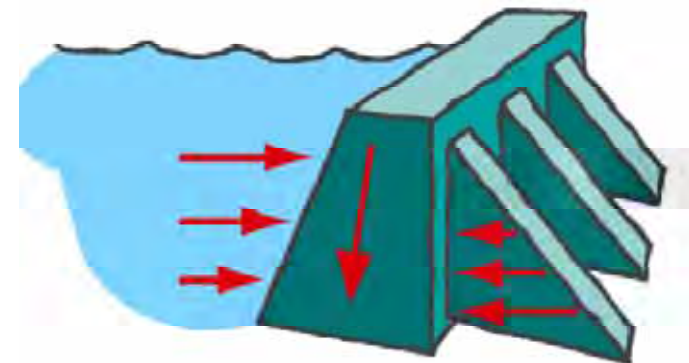
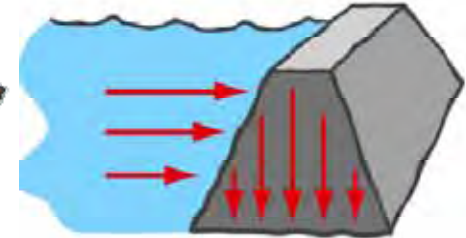
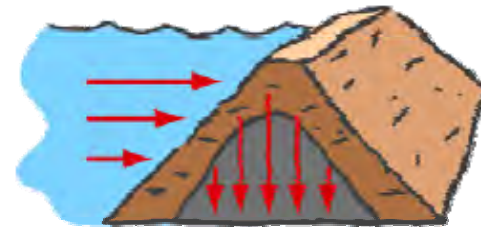
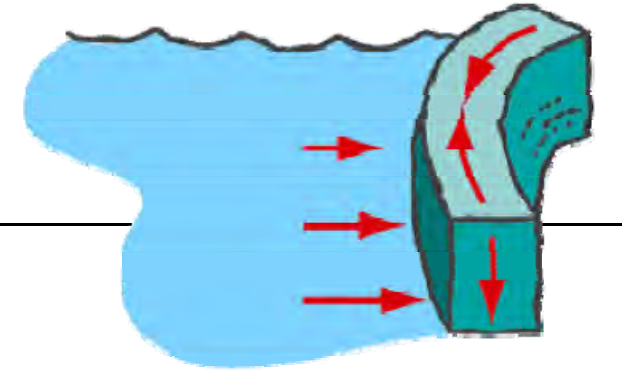
# Derivacijska crpno-akumulacijska HE

---



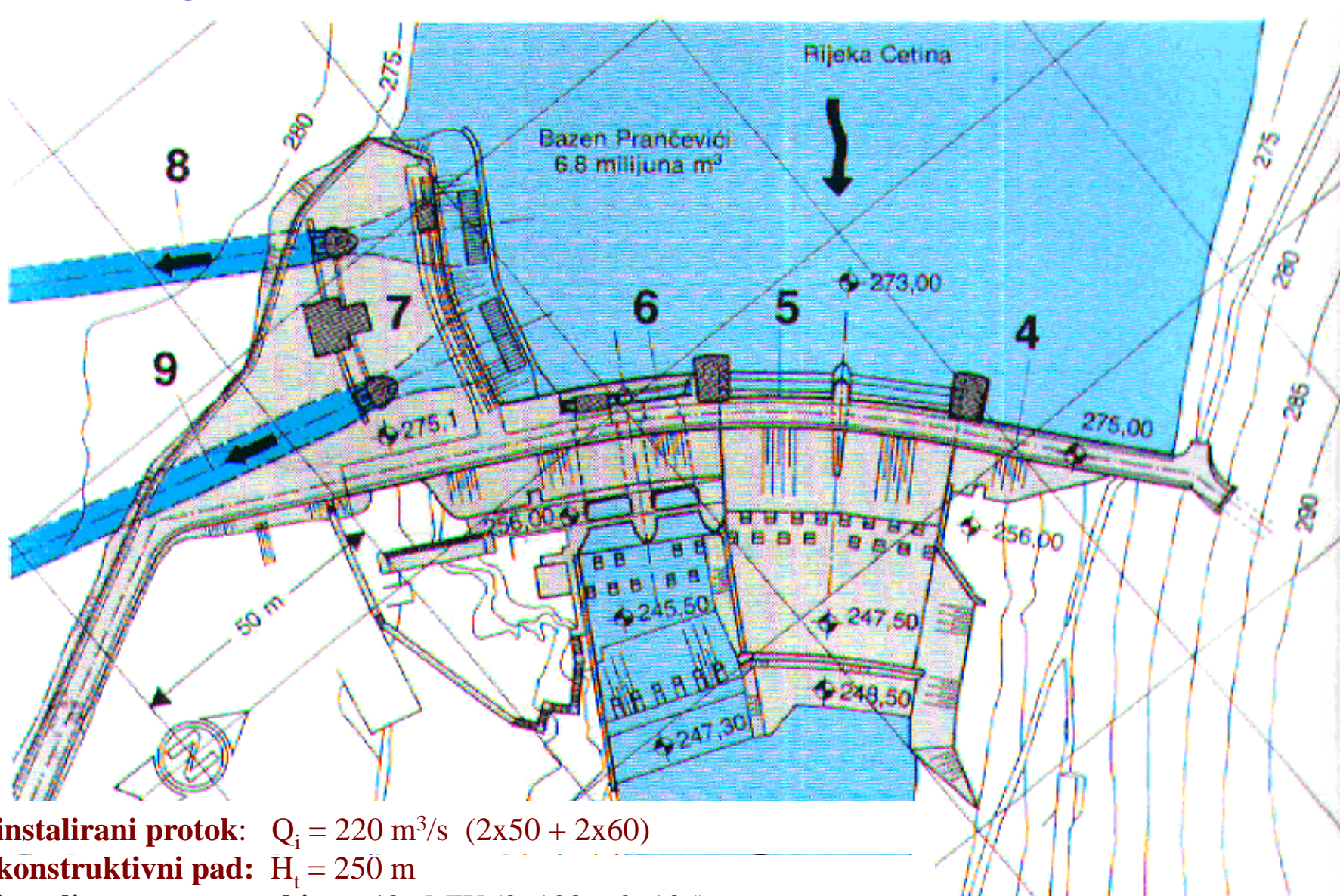
# Dijelovi HE - pregrada

- višestruka namjena
  - skretanje vode od njezinog prirodnog toka prema zahvatu
  - povišenje razine vode radi postizanja većeg pada
  - ostvarivanje akumulacije
- sastavni dijelovi pregrade
  - tijelo pregrade
  - elementi za regulaciju vodenog toka:
    - preljevi, ispusti, preljevna polja (zapornice), temeljni ispust
- osnovni tipovi:
  - gravitacijska pregrada (vlastitom težinom osigurava stabilnost)
  - lučna pregrada (oblikom osigurava stabilnost)
  - lučno - gravitacijska
  - olakšana pregrada





# Pregrada "Prančevići"-HE Zakučac



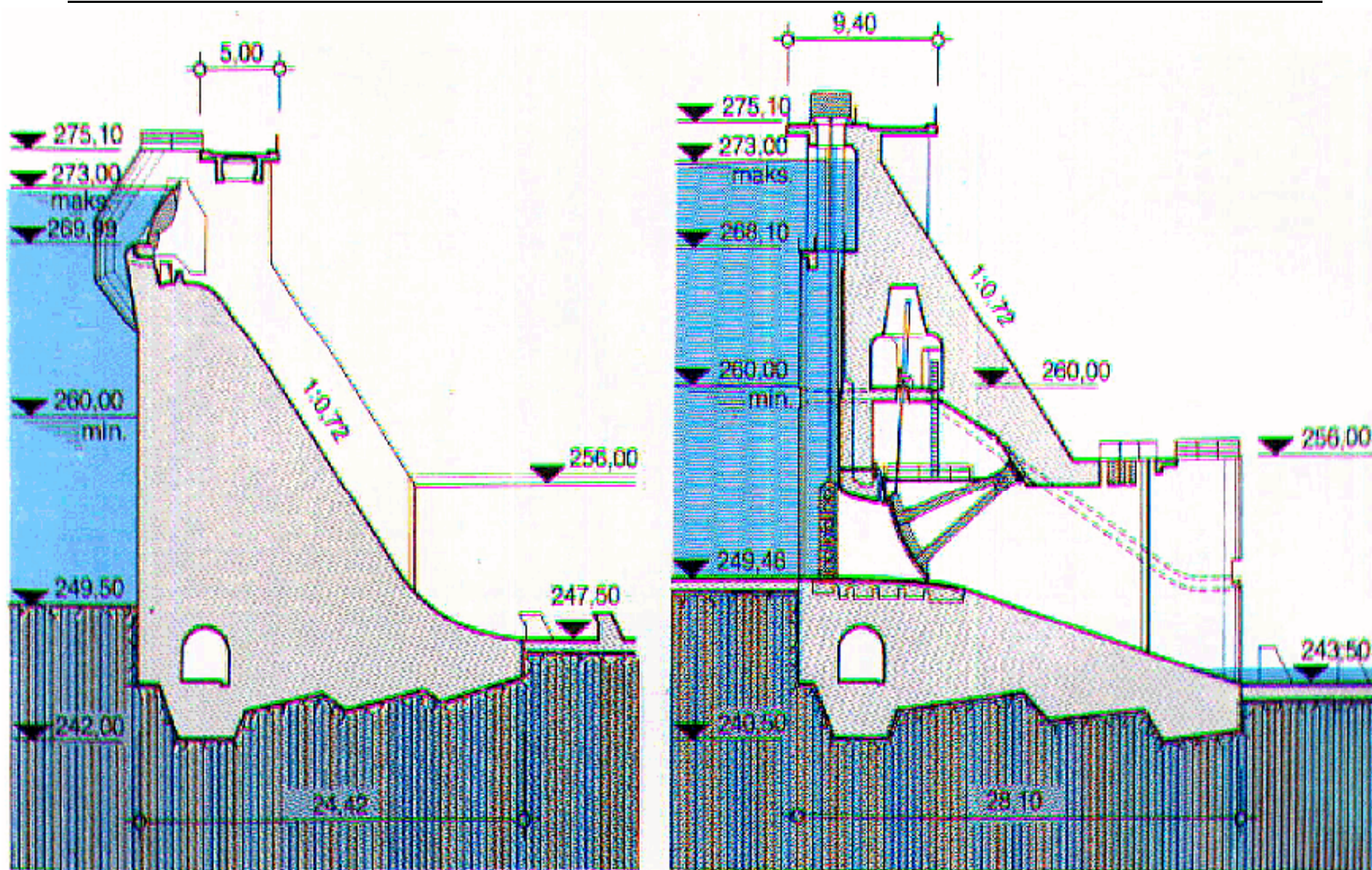
- instalirani protok:  $Q_i = 220 \text{ m}^3/\text{s}$  (2x50 + 2x60)
- konstruktivni pad:  $H_t = 250 \text{ m}$
- instalirana snaga turbina: 486 MW (2x108 + 2x135)
- maksimalna godišnja proizvodnja: ('74-'97)  $W_{\text{max}} = 2022 \text{ GWh}$  ('96)

2000.

Energijske tehnologije. Energijske pretvorbe i procesi u hidroelektranama



# Preg. "Prančeviči"-preljev i temeljni ispust

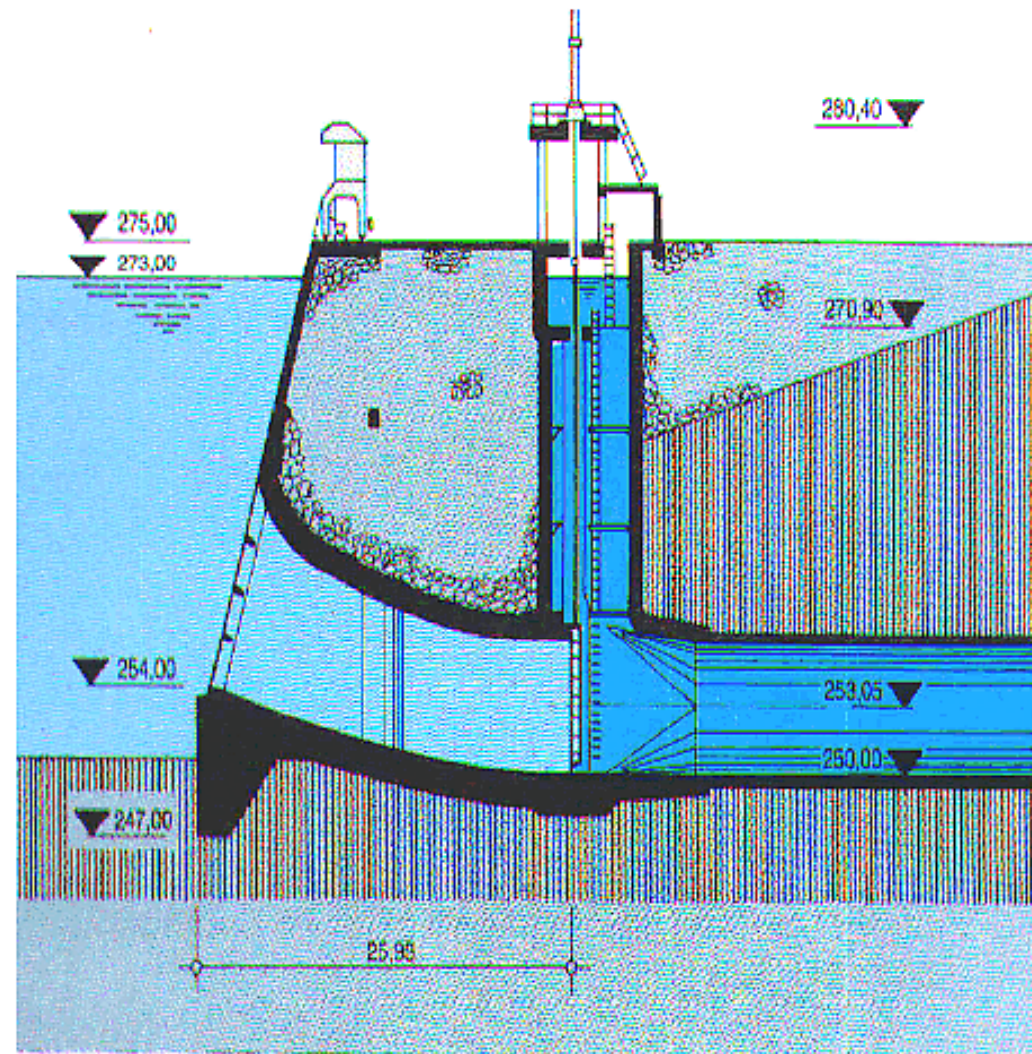




# Dijelovi HE - zahvat

Zahvat prima i usmjerava  
prema hidroelektrani  
vodu

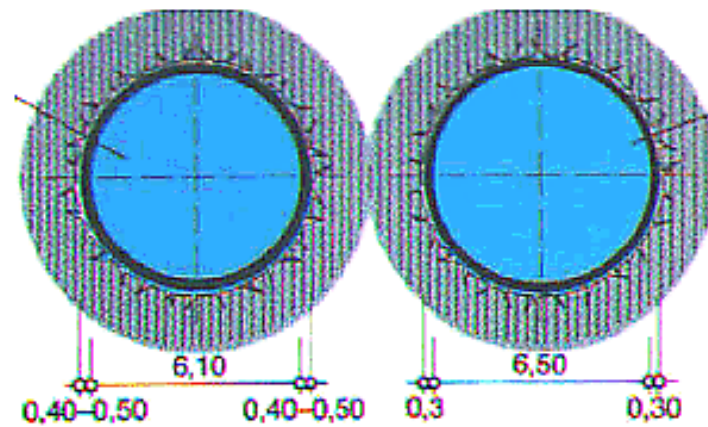
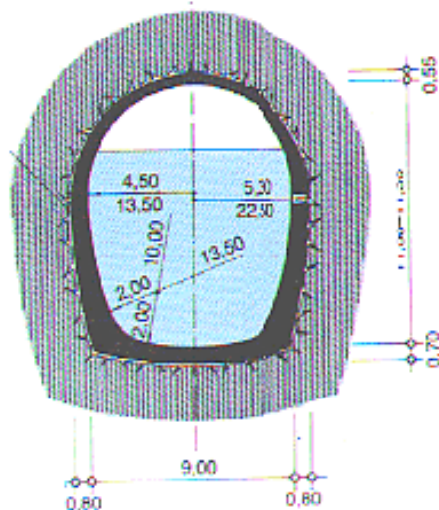
- zahvat na površini (razina vode stalna)
- zahvat ispod površine (akumulacija ili promjenjiva razina vode)





# Dijelovi HE - dovod vode

- Dovod vode spaja zahvat sa vodnom komorom ili vodostanom
  - gravitacijski dovod (kanal ili tunel nije posve ispunjen vodom)
  - tlačni tunel (tunel posve ispunjen vodom)
- Regulacija protoka u dovodu
  - kod gravitacijskog dovoda protok se regulira visinom zahvata
  - kod tlačnog tunela samo odvodom odn. otvorom na turbini



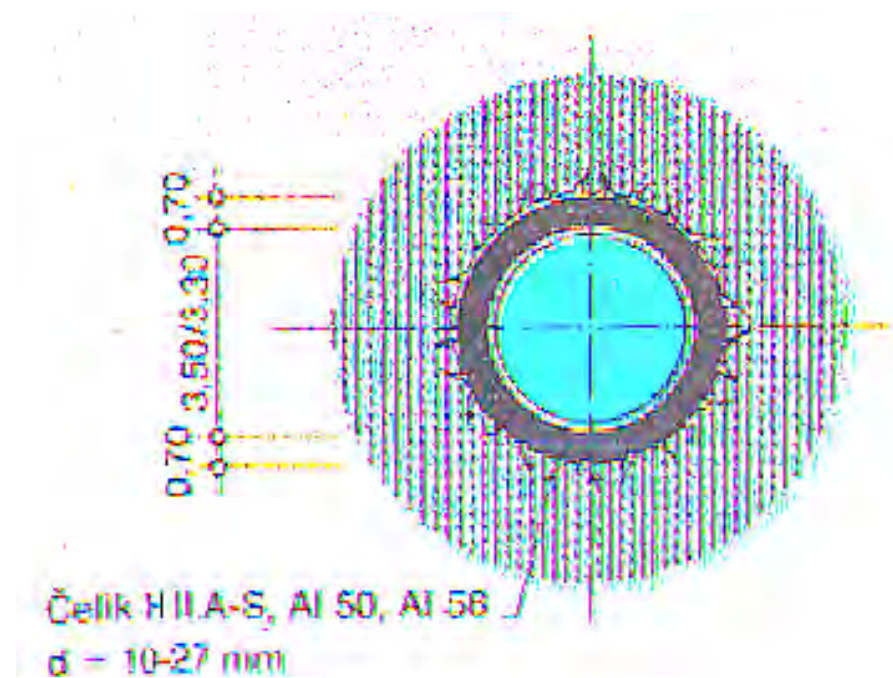
# Dijelovi HE - vodna komora

---

- Vodna komora
  - nalazi se na početku tlačnog cjevovoda sa svrhom da kod naglog smanjenja opterećenja HE tlak vode u cjevovodu ne poraste iznad dopuštene granice

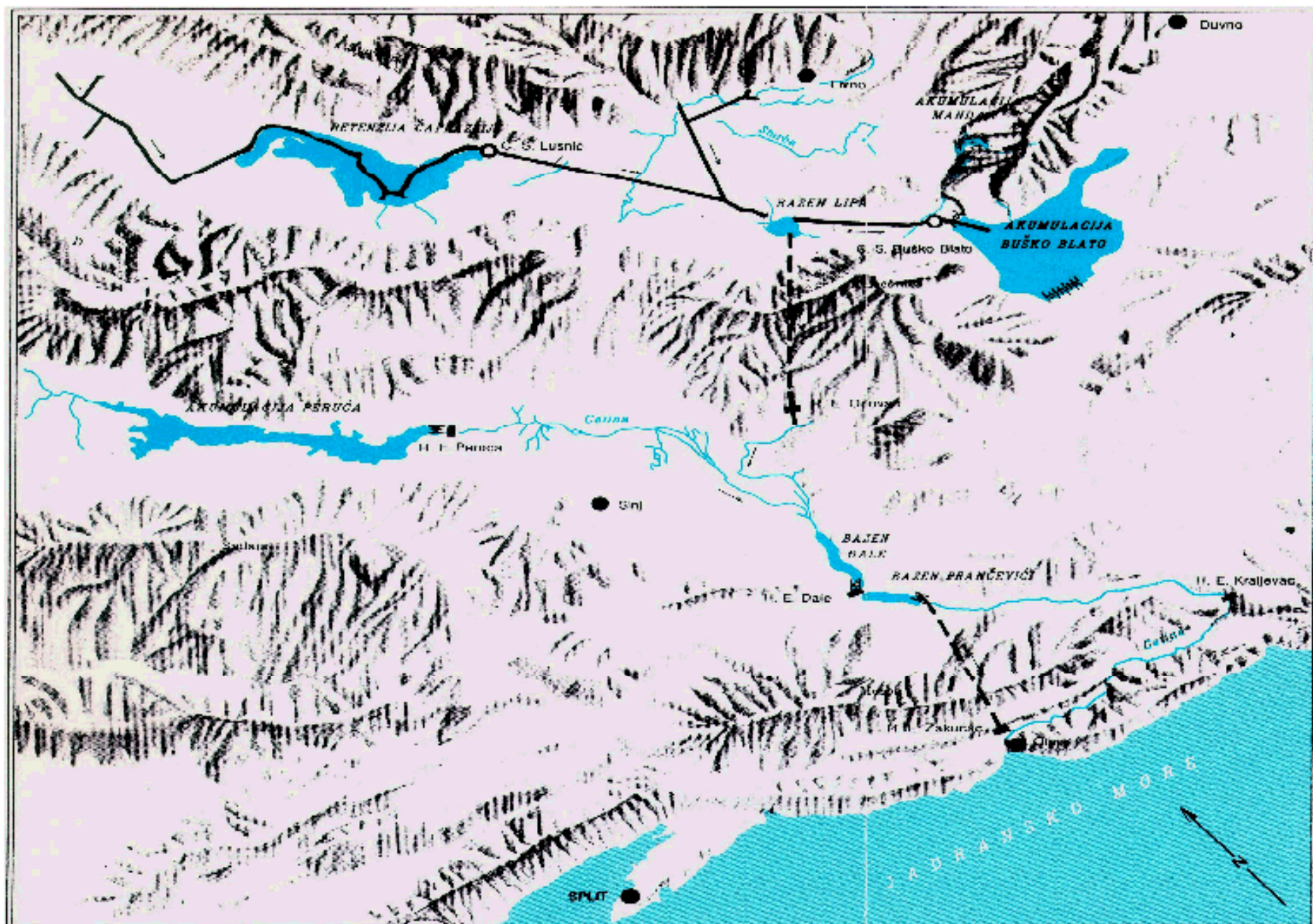
# Dijelovi HE - tlačni cjevovod

- Tlačni cjevovod je specijalne izradbe i koristi se za dovod vode do turbine
  - slobodno stojeći
  - integralni dio stijene

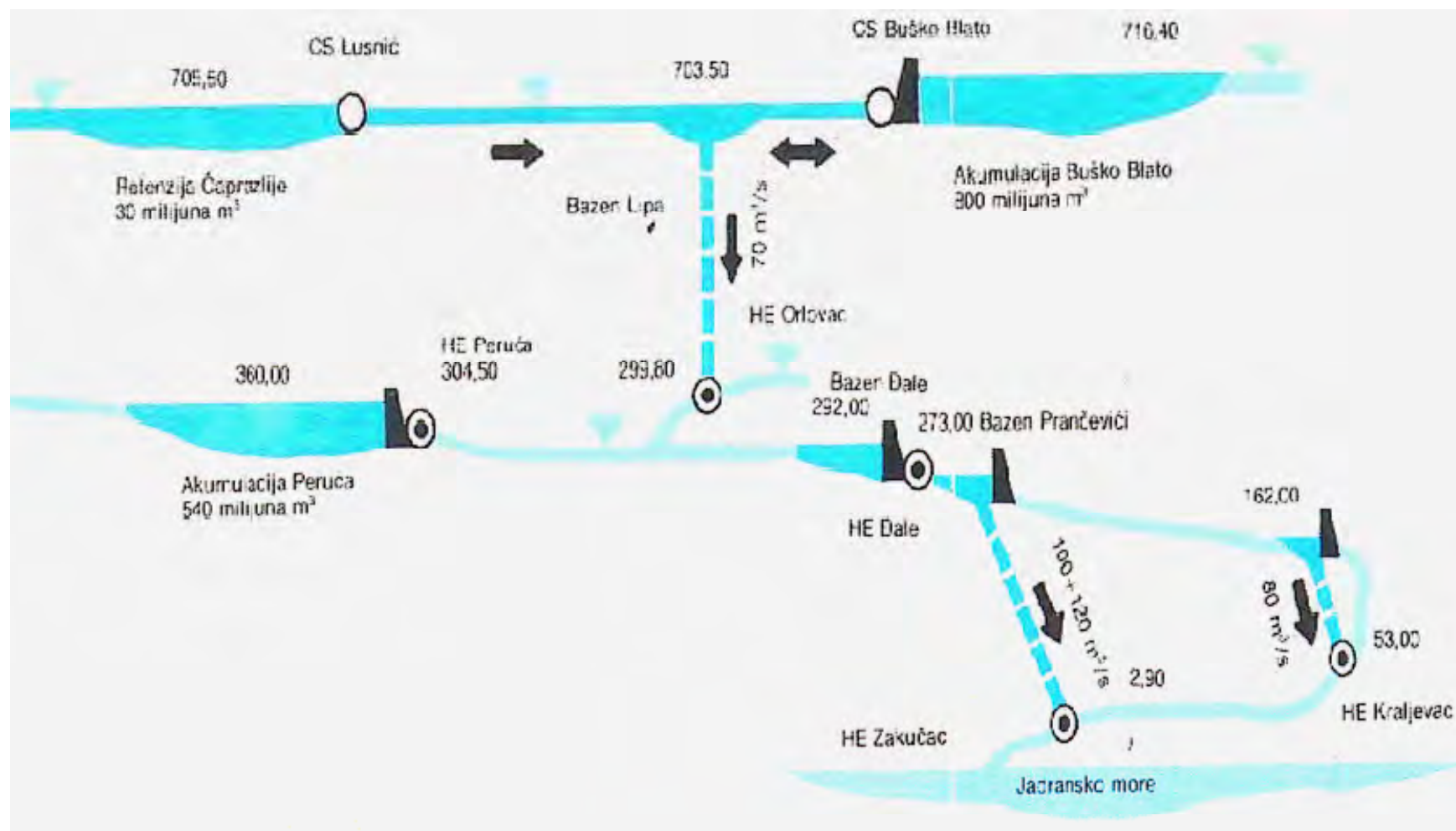




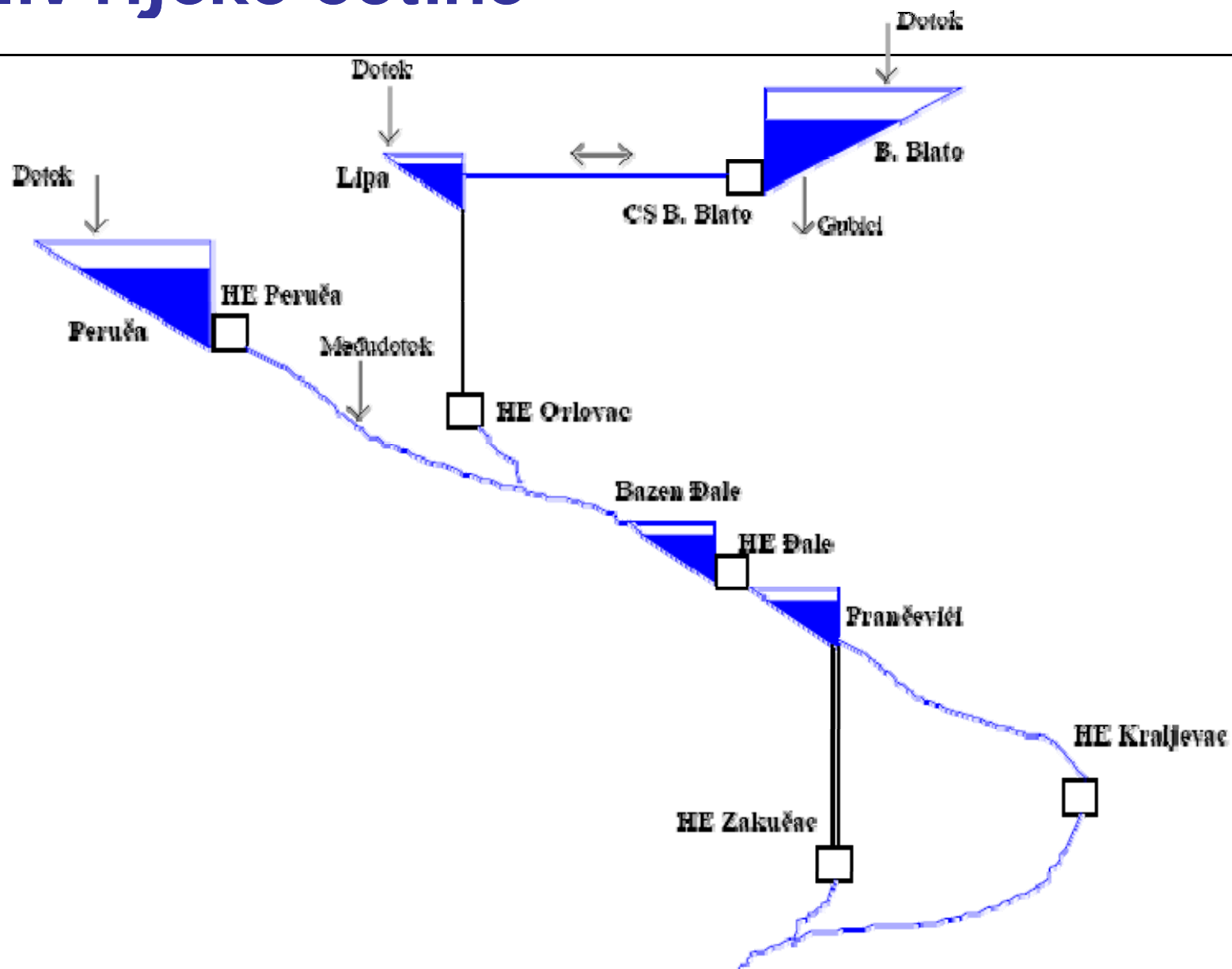
# Hidroelektrane sliva Cetine (1)



## Hidroelektrane sliva Cetine (2)



# Sliv rijeke Cetine

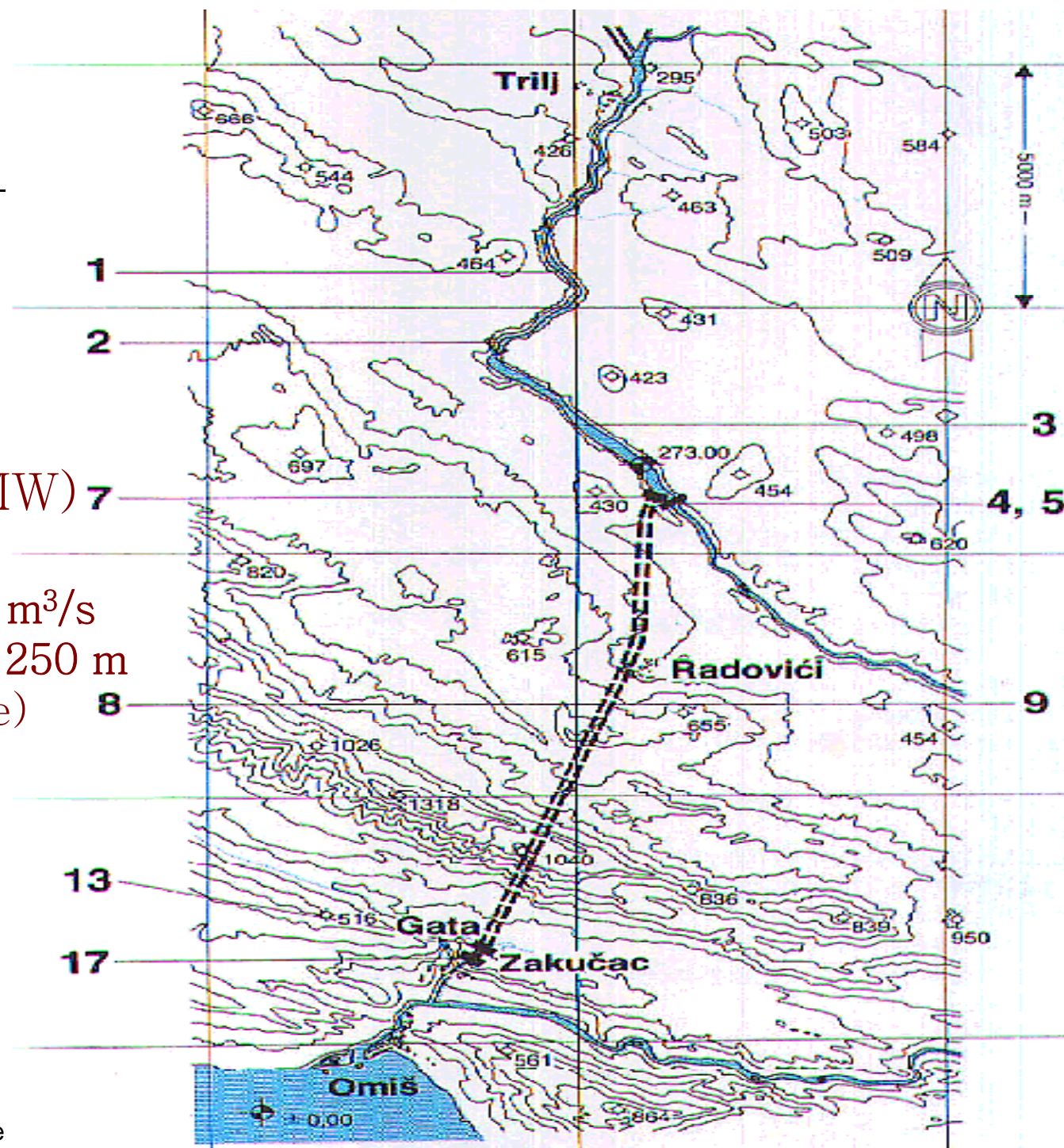




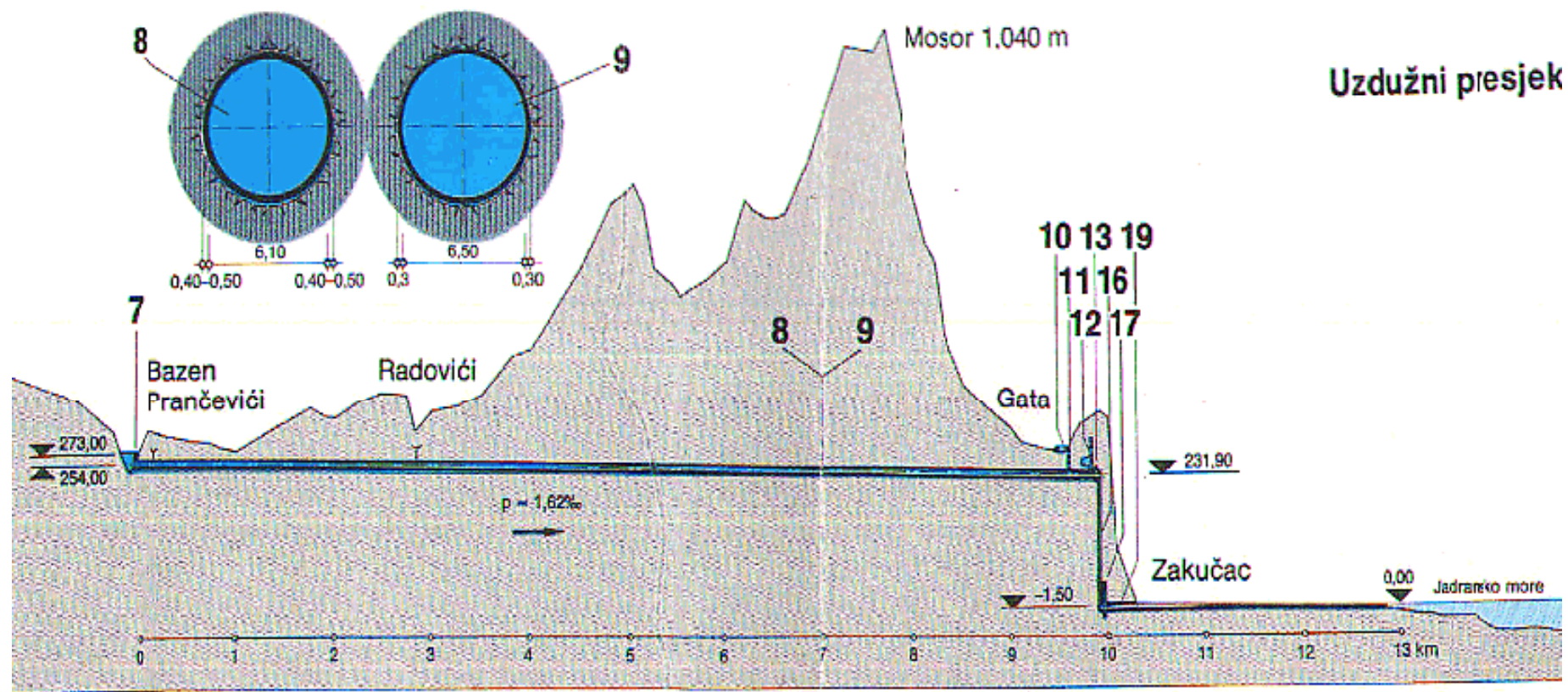
# Situacija objekata HE Zakučac (1)

486 MW  
(216 MW i 270 MW)

$Q_i = 2 \times 50 + 2 \times 60 = 220 \text{ m}^3/\text{s}$   
konstruktivni pad je 250 m  
(Francis – vertikalne)



## Situacija objekata HE Zakućac (2)





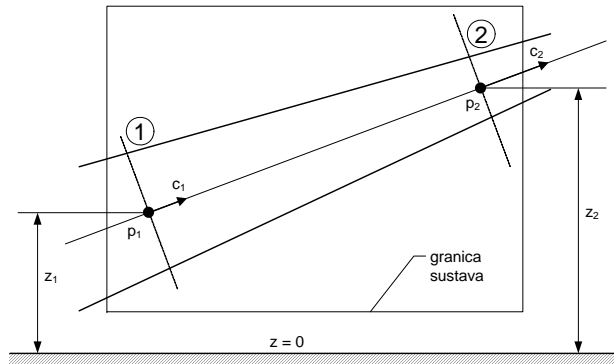
# Proračuni vezani za HE – prvi dio

---

- Primjena 1. glavnog stavka za otvorene sustave na vodnu turbinu
- Bernoullieva jednadžba – pristup preko energije
- Jednostavni primjeri proračuna – ilustracija ovisnosti snage elektrane o padu vode i raspoloživom protoku
- Proračun lociranja pribranske i derivacijske HE

# JSS procesi otvorenih sustava – strujanje vode

## Strujanje vode u cjevovodu: Bernoullijeva jednačba



$$q_{12} = 0, w_{RT12} = 0$$

$$u_1 + p_1 v_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + g z_1 = u_2 + p_2 v_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + g z_2$$

$$q_{12} = \int_{v_1}^{v_2} p dv - |w_{RT12}| + u_2 - u_1 \quad u_1 = u_2$$

$$(q_{12} = 0, w_{RT12} = 0, \int_{v_1}^{v_2} p dv = 0 \text{ / } v = \text{konst, } dv = 0 \text{ /})$$

$$p_1 v_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + g z_1 = p_2 v_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + g z_2$$

# JSS procesi otvorenih sustava - proces u vodnoj turbini

---

## Tehnički rad vodne turbine

$$q_{12} = 0, u_1 = u_2 \quad v_1 = v_2 = v$$

$$w_{t12} = -v(p_2 - p_1) - \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) \text{ [J/kg]}$$

$$v = \text{konst.}$$

$$w_{t12} = - \int_{p_1}^{p_2} v dp - \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) =$$

$$= -v(p_2 - p_1) - \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) \text{ [J/kg]}$$

## Primjer 1a

---

*Mala hidroelektrana stupnja djelovanja 83% smještena je na planinskom potoku koji ima efektivni pad vode od 25 m i volumni protok od 600 l/m. Kolika je snaga navedene male HE?*

- $H = 25 \text{ m}$  (pad vode)
- $Q = 600 \text{ l/min} \times 1 \text{ m}^3/1000 \text{ l} \times 1 \text{ min}/60\text{s}$   
 $= 0,01 \text{ m}^3/\text{s}$  (volumni protok)
- Stupanj djelovanja HE  $\eta = 0,83$
- $P \cong 9,81\rho\eta QH = 9,81(1000)(0,83)(0,01)(25) = 2036 \text{ W}$   
 $\cong 2,0 \text{ kW}$

## Primjer 1b

---

*Koliko energije (E) može proizvesti navedena mala HE ako radi cijelu godinu bez prekida i koliko ljudi može opskrbljivati električnom energijom ako je prosječna godišnja potrošnja energije po osobi 3000 kWh?*

$$\begin{aligned} E &= P \cdot t \\ &= 2,0 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h/dan} \cdot 365 \text{ dan/god} \\ &= 17520 \text{ kWh godišnje} \end{aligned}$$

$$\text{Populacija} = E/3000 = 17520/3000 = 5,84$$

5 ljudi ima sigurnu opskrbu el.energijom

## Primjer 2

---

*HE stupnja djelovanja 83% je izgrađena na lokaciji s efektivnim padom vode od 100 m i raspoloživim volumnim protokom 6000 m<sup>3</sup>/s (približno uvjeti na lokaciji Niagara Falls). Kolika je snaga elektrane, proizvedena električna energija (uz pretpostavku nepromjenjivih uvjeta protoka i nivoa vode) i koliki je potencijalni broj potrošača uz pretpostavke navedene u primjeru 1)?*

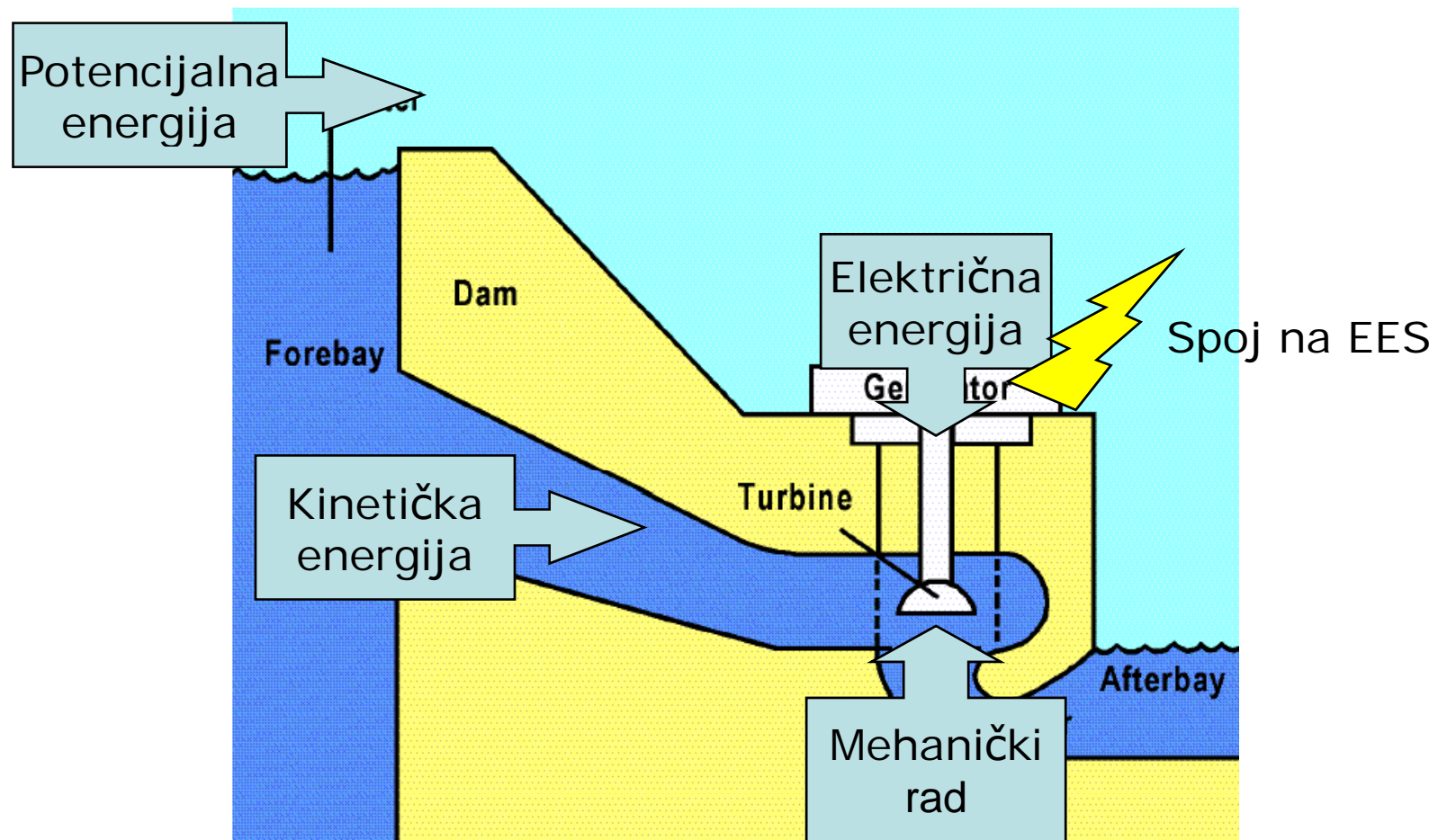
- $P \cong 9,81\rho\eta QH = 9,81(1000 \cdot 0,83)(6000)(100) \cong 4,88 \cdot 10^9 \text{ W}$   
 $\cong 4,88 \text{ GW}$
- $E = P \times t = 4,88 \text{ GW} \times 24 \text{ h/dan} \times 365 \text{ dan/god}$   
 $= 42749 \text{ GWh} = 42,7 \text{ TWh}$
- $\text{Populacija} = E/3000 = 42,7 \text{ TWh} / 3000 \text{ kWh}$   
 $= 1,42 \text{ milijuna ljudi}$
- (pretpostavljena je 100% raspoloživost, tj. 8760 sati rada godišnje, što nije ostvarivo čak i uvjetima povoljnih hidroloških uvjeta jer je potrebno planirati i održavanje)

# Zadatak 1: pribranska elektrana

---

*Izgradnjom se pribranske hidroelektrane, na nadmorskoj visini 200 m, rijeke koja ima srednji godišnji protok  $Q_{sr} = 300 - H[m]/2$  [ $m^3/s$ ], želi omogućiti rad agregata  $S_n = 80$  MVA (nazivni faktor snage 0,8) i stupnja iskorištenja 0,93 punom snagom. Kolika je potrebna visina vode ispred pregrade/brane HE?*

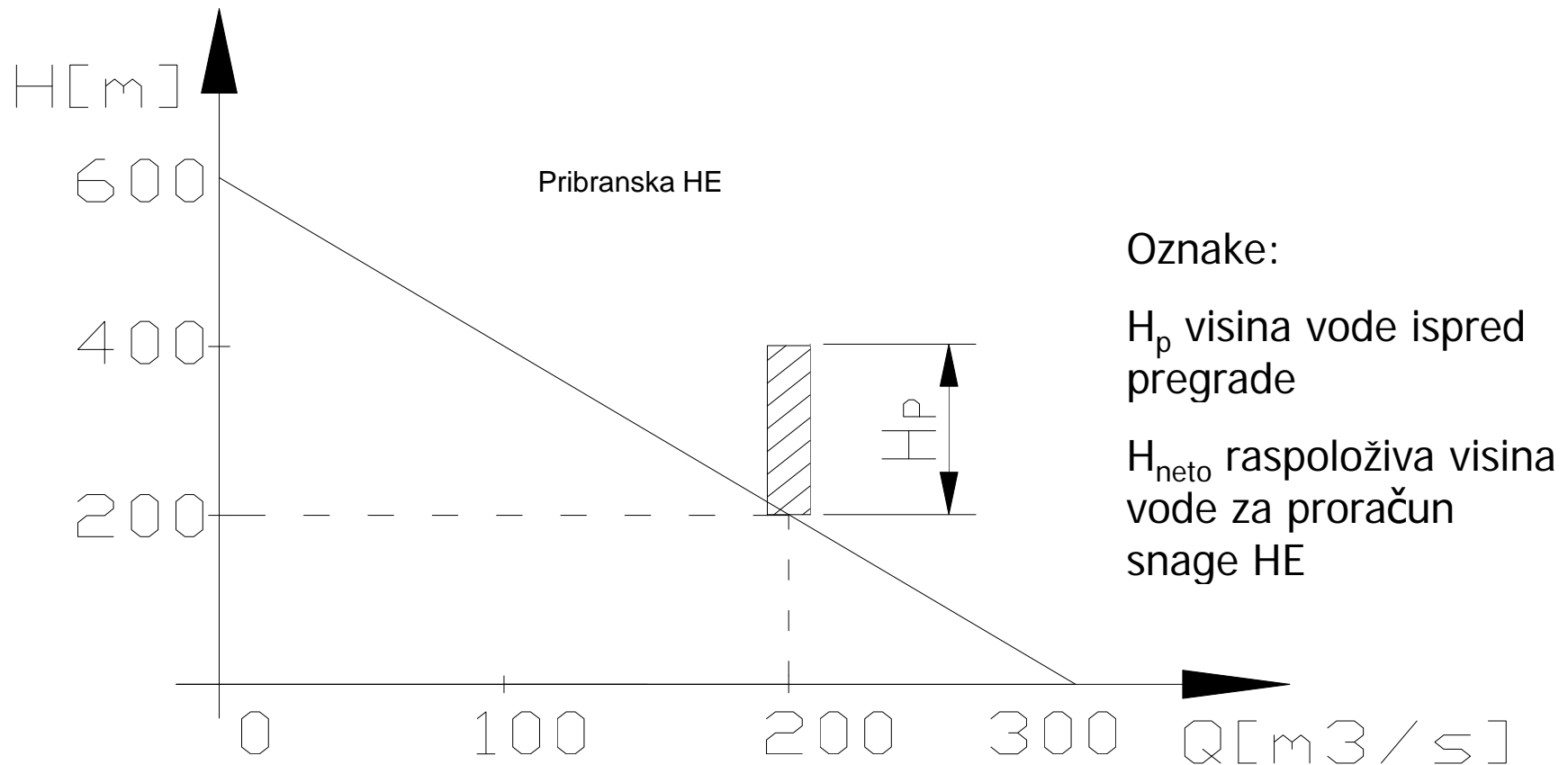
# Pribranska HE





# Q-H dijagram vodotoka i lokacija HE

$$\Rightarrow Q_i = Q_{sr}(H_z) = 300 - \frac{200}{2} = 200 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$



## Zadatak 1

---

Rješenje:

$$P = S_n \cdot \cos \varphi_n = \rho \cdot g \cdot Q_{sr} \cdot H_{neto} \cdot \eta = \left\{ \rho = 10^3 [kg/m^3] \right\} =$$

$$P = g \cdot Q_{sr} \cdot H_{neto} \cdot \eta \quad [kW]$$

$$H_{neto} = H_p$$

$$H_p = \frac{S_n \cdot \cos \varphi_n}{g \cdot Q_{sr} \cdot \eta} = \frac{80 \cdot 10^3 \cdot 0,8 [kW]}{9,81 \cdot 200 \cdot 0,93} = 35 \quad [m]$$

## Zadatak 2: derivacijska elektrana

---

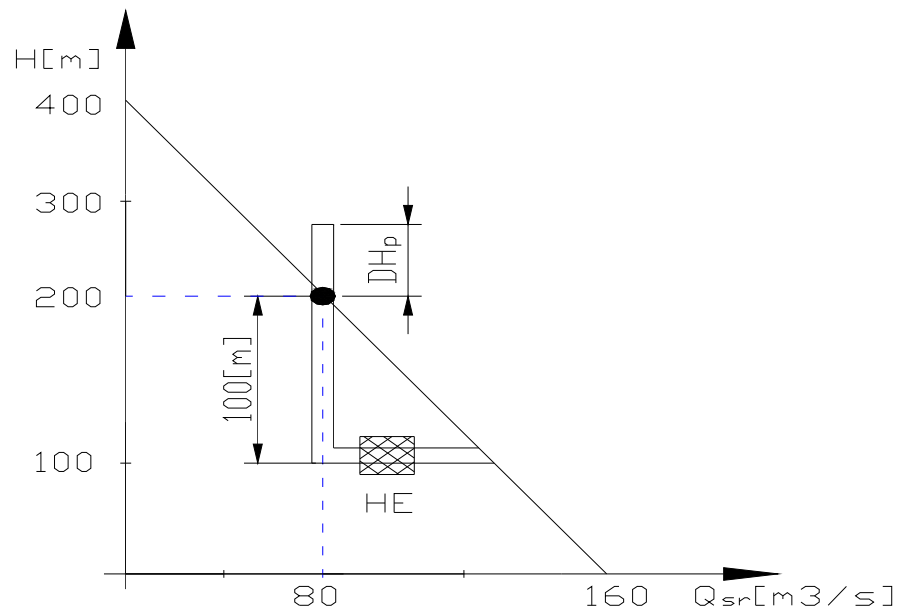
*Planira se izgradnja derivacijske HE sa zahvatom na n.v. (nadmorskoj visini) 200 m, na vodotoku koji ima srednji godišnji protok  $Q_{sr}=160-H[m]/2,5$  [m<sup>3</sup>/s]. Agregat elektrane je izabran tako da na punoj snazi daje u mrežu snagu  $S_n=100$  MVA uz faktor snage 0,8. Pretpostavljen je stupanj iskorištenja na pragu HE 0,9.*

*Kolika mora iznositi visina vode iza pregrade/brane HE ako je donja voda na n.v. 100 m?*

*Ukupni gubitci u dovodu vode su procijenjeni na 10 m.*

# Q-H dijagram vodotoka i lokacija HE

$$DH_P = \Delta H_P$$



## Korištene oznake:

$DH_p = H_{\text{brane}}$  visina vode ispred pregrade/brane

$Q_{\text{sr}}$  srednji godišnji volumni protok na mjestu izgradnje

$H$  nadmorska visina

$H_g$  -smanjenje visine zbog gubitaka,

$H_{\text{neto}}$  efektivna visina vode,

$H_{\text{te}}$  razlika u elevacijama korijena brane i turbine derivacijske HE

## Zadatak 2

---

Rješenje:

$$H = 0[m] \Rightarrow Q_{sr} = 160 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

$$Q_{sr} = 0 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \Rightarrow H = 400[m]$$

$$Q_{sr} = 160 - \frac{H}{2.5} = 160 - \frac{200}{2.5} = 160 - 80 = 80 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

$$H_{te} = 100[m]; H_g = 10[m]$$

$$P = 9.81 \cdot Q_{sr} \cdot H_{neto} \cdot \eta \cdot 10^{-3} [MW]$$

$$H_{neto} = \frac{S_n \cdot \cos \varphi}{9.81 \cdot Q_{sr} \cdot \eta \cdot 10^{-3}} = \frac{100 \cdot 0.8 \cdot 10^3}{9.81 \cdot 80 \cdot 0.9} = 113.3[m]$$

$$H_{neto} = H_{brane} + H_{te} - H_g \Rightarrow H_{brane} = H_{neto} - H_{te} + H_g = 113.3 - 100 + 10 = 23.3[m]$$

# Hidroenergija i okoliš – za i protiv

---

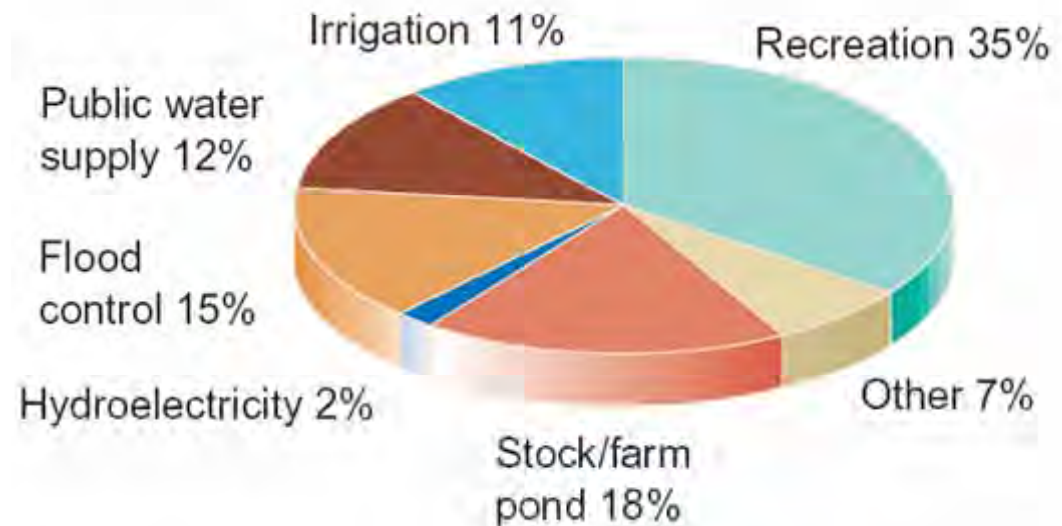
- Nema emisije u okoliš (uvjetno)
- Reguliranje toka vode
- Ugrožavanje riba
- Umanjivanje kvalitete vode u toku iza
- Negativan utjecaj na neposredni bio-sustav
- Društveni utjecaj na regiju

# Pozitivno

---

- Kontrola plavljenja i toka
- Obnovljivi izvor el. en.
- Efikasnost – do 90% za el. en.

## Primary Purpose or Benefit of U.S. Dams



Source: U.S. Army Corps of Engineers, National Inventory of Dams

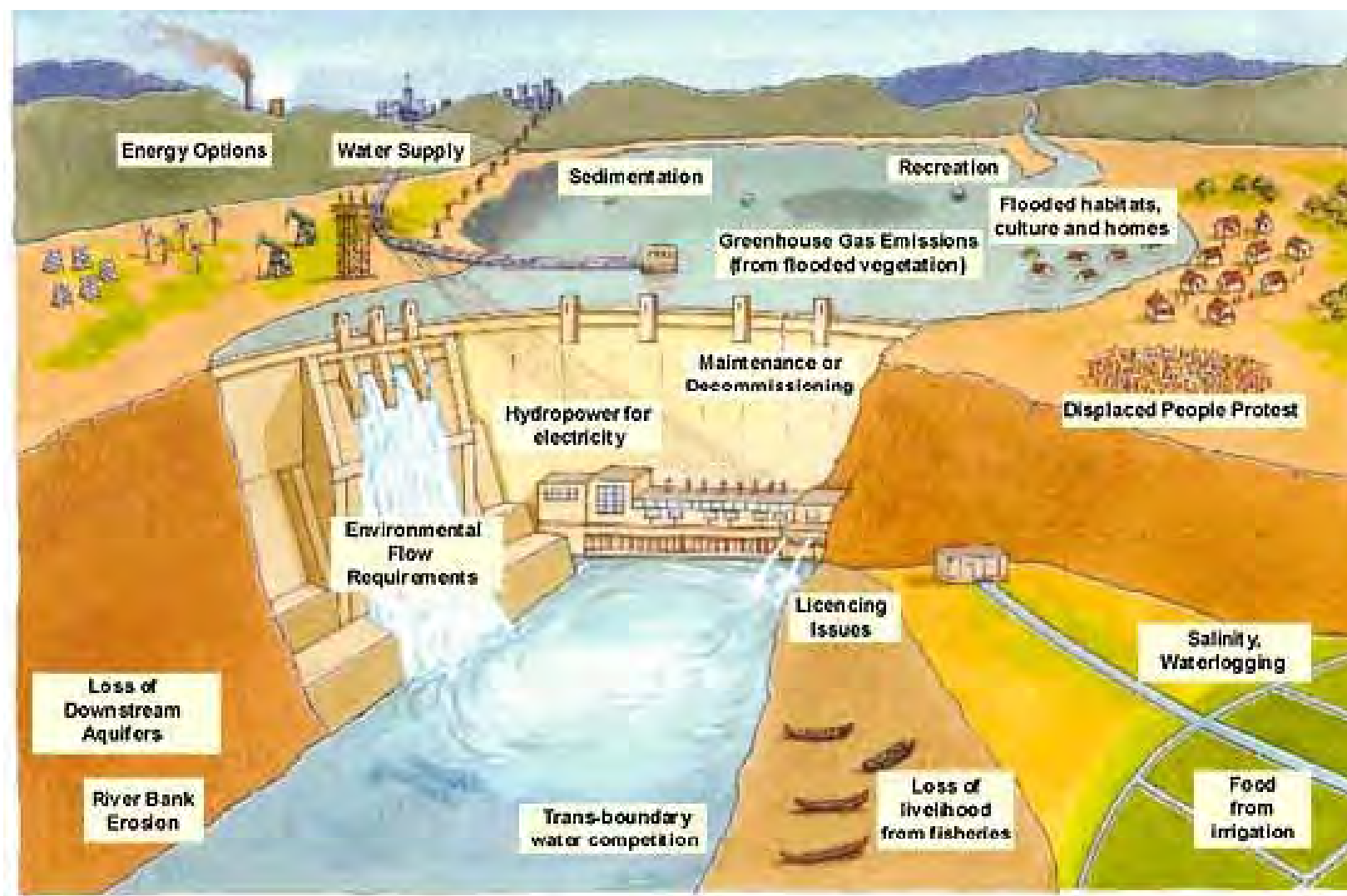


# Negativno

---

- Drastično mijenja prirodni tok rijeke
- Preseljenje ljudi
- Fertilizacija potopljenog prostora
- Migracije riba
- Sedimentacija
- Dekomisija uklanjanje brane
- Izgradnja i održavanje hidro postrojenja
  - Niz državnih institucija s nejasnim ovlastima i procedurama.
  - Javno mnijenje

# Utjecaj velikih brana na okoliš



# HE Itaipú (Brazil & Paraguay)

---

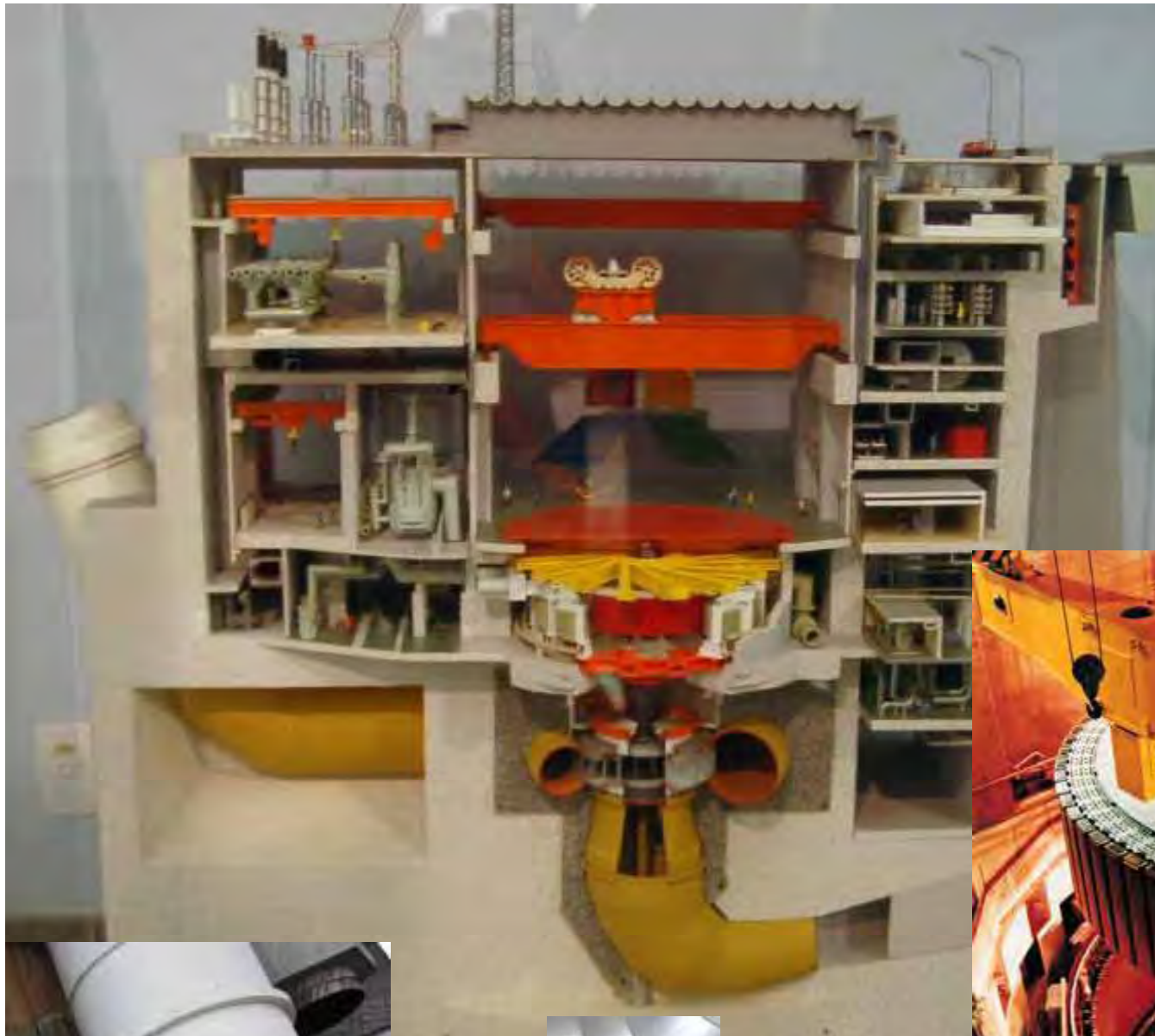








# ITAIPU - strojarnica



Energijski



Energetske pretvorbe

