Povijest vodnih snaga

Vodeno kolo za navodnjavanje-prvi oblici

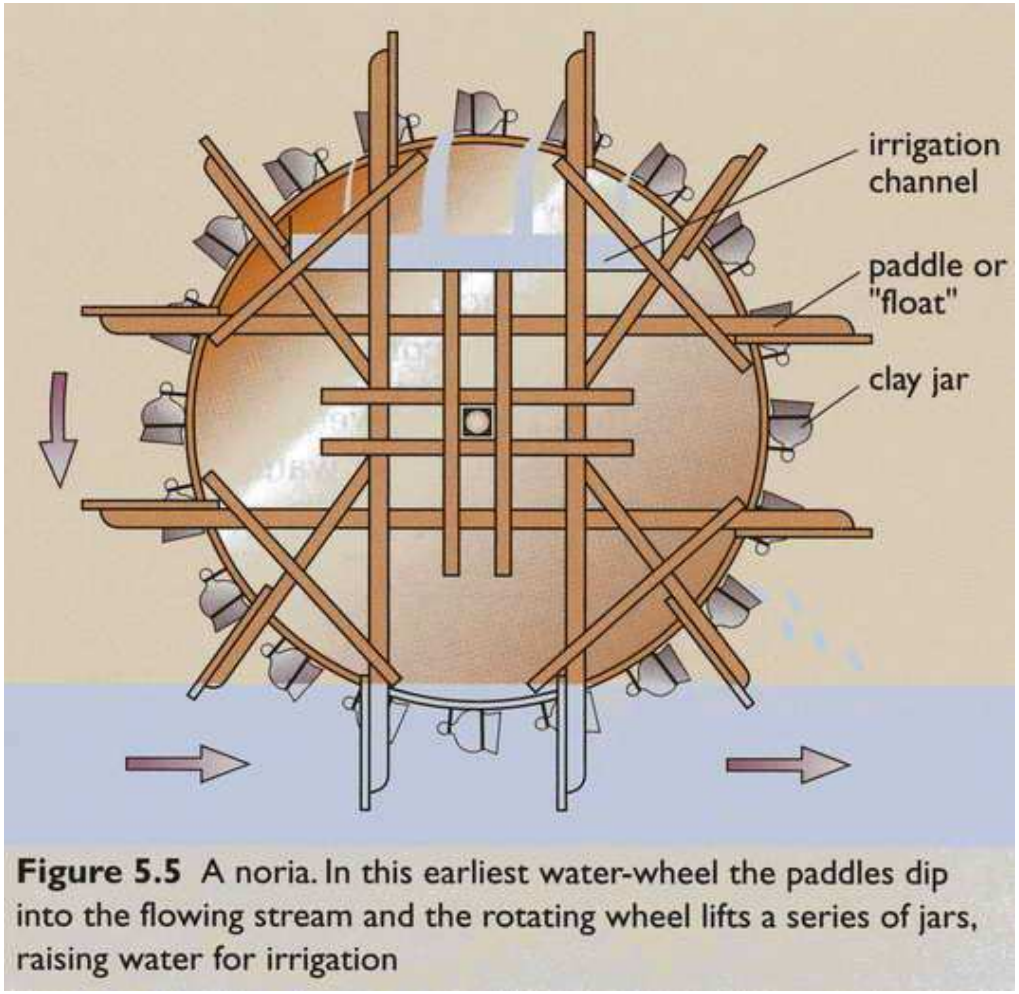


Figure 5.5 A noria. In this earliest water-wheel the paddles dip into the flowing stream and the rotating wheel lifts a series of jars, raising water for irrigation

Boyle, *Renewable Energy,* 2nd edition, Oxford University Press, 2003

Early Roman Water Mill

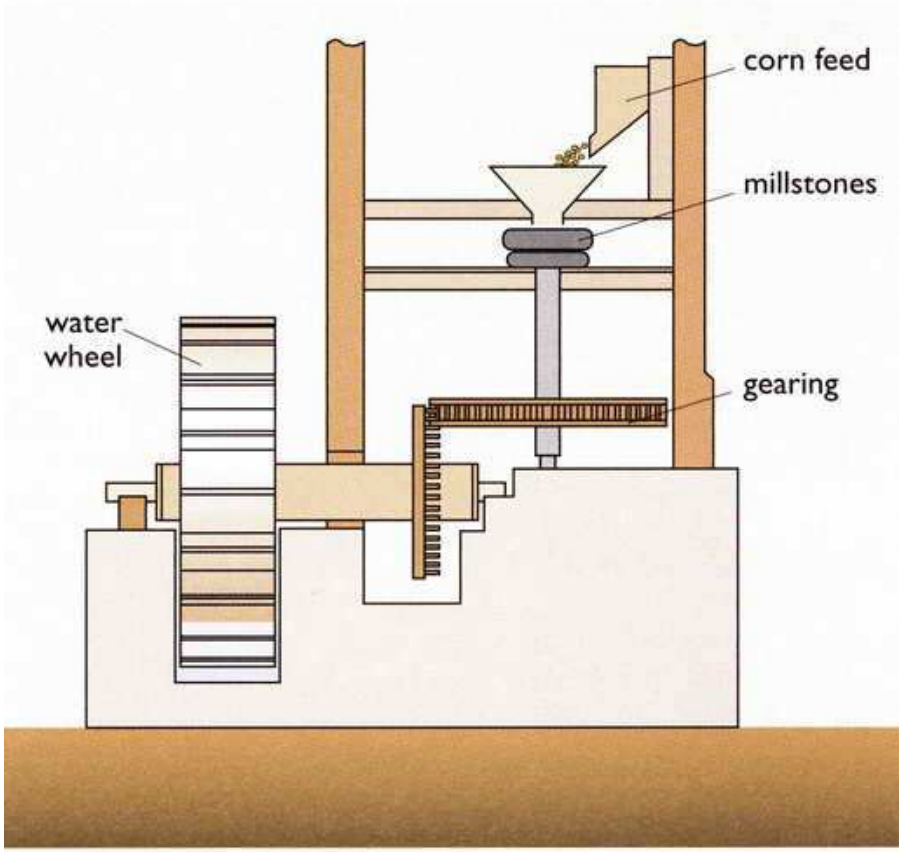


Figure 5.7 A Roman mill. This corn mill with its horizontal-axis wheel was described by Vitruvius in the first century BC. Note the use of gears

Boyle, *Renewable Energy,* 2nd edition, Oxford University Press, 2003

Early Norse Water Mill

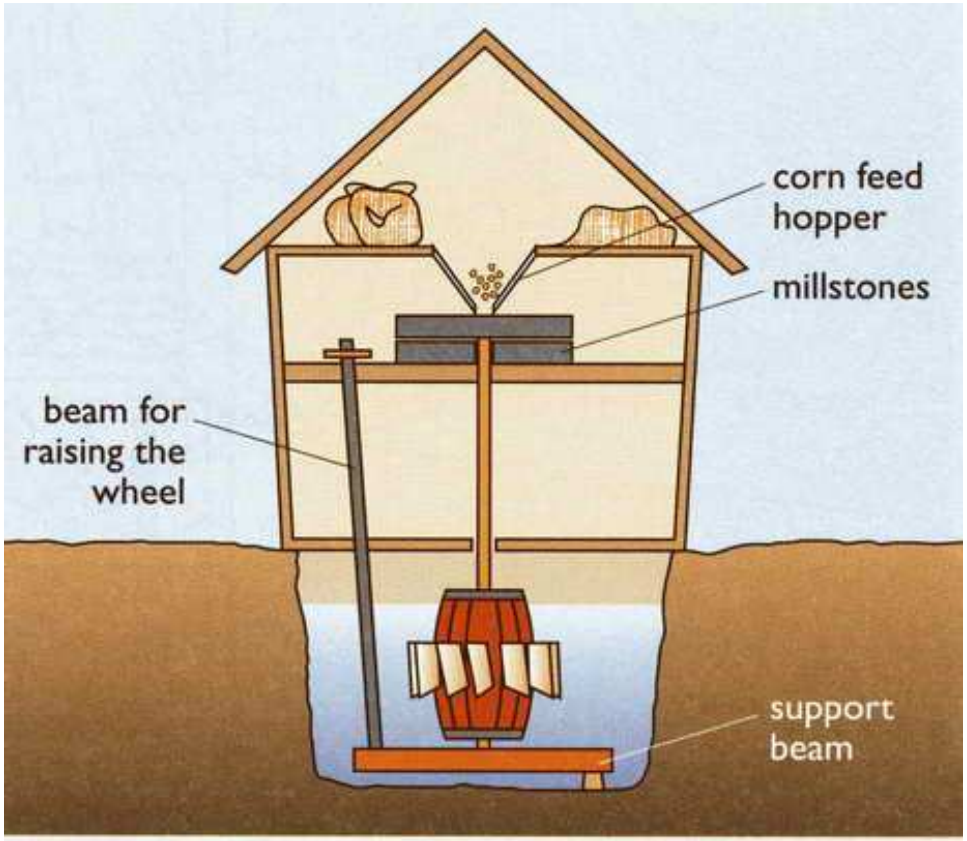


Figure 5.6 A Norse mill. Mills of this early vertical-axis type are still in use for mechanical power in remote mountainous regions

Boyle, *Renewable Energy,* 2nd edition, Oxford University Press, 2003

Fourneyron's Turbine

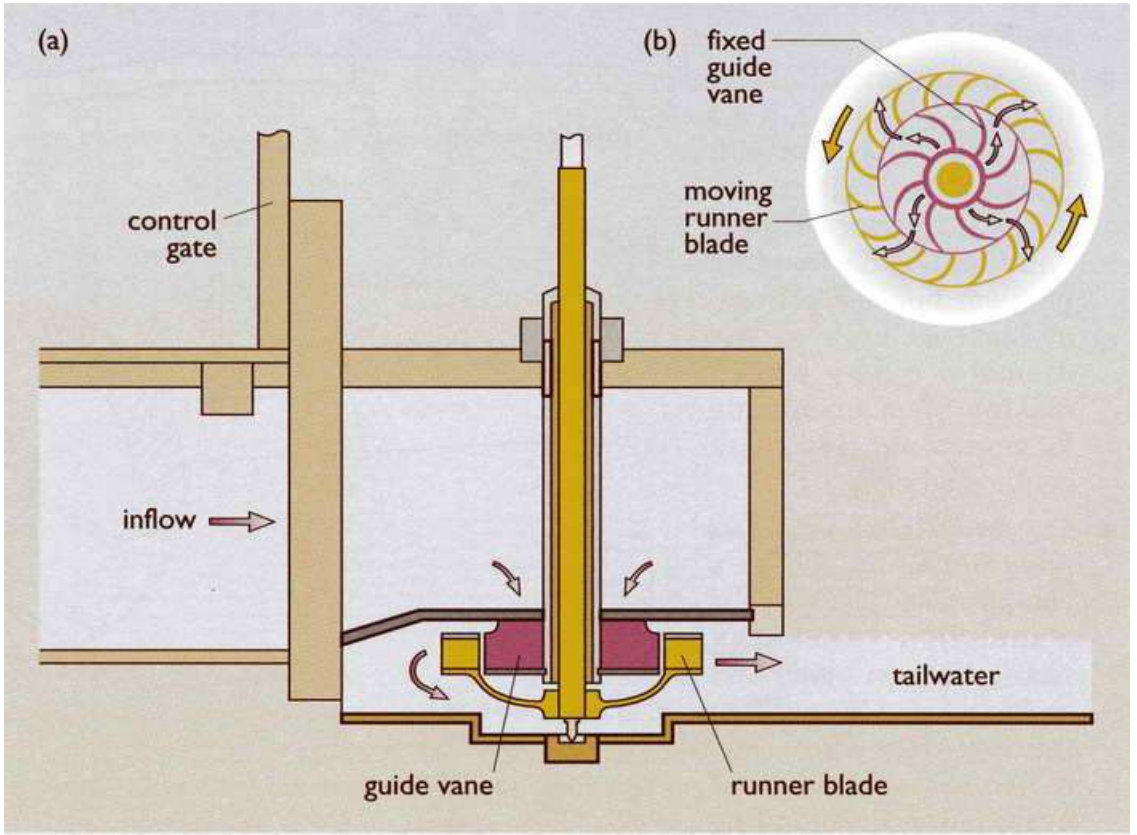


Figure 5.10 Fourneyron's turbine. The runner consists of a circular plate with curved blades around its rim and a central shaft. It spins under the force exerted by water flowing outwards between the fixed guide vanes and across its blades: (a) vertical section; (b) flow across guide vanes and runner

Boyle, *Renewable Energy,* 2nd edition, Oxford University Press, 2003

Osnovi Energije

Osnovne definicije

- Energija je sposobnost da se izvrši rad
- Rad

$$W = F \cdot D$$

Sila na tijelo u pokretu
ili sila na putu

Sila *F=ma* (drugi Newton-ov zakon)

Newton (N), [ML/T^2], – sila koja djeluje na tijelo mase 1 kg te mu daje ubzanje 1 m/s^2

Osnovne definicije (nastavak)

- Osnovna jedinica za rad – Joul (J) [ML^2/T^2]

Rad učinjen silom od 1N na putu od 1m

Ostale jedinice u literaturi:

- 1 (erg) = 10^{-7} (J)
- 1 (KWh) = 3.6 10^{-6} (J)
- 1 (kalorija) = 4,185 (J) (enrgija potrebna da se 1g vode ugrije 1^0C)
- 1(British Thermal Unit, BTU) = 1.055 10^3 (J)

Jednadžba energije

- Potencijalna energija

$$p_e = \gamma h = \rho g h \Rightarrow h = \frac{p_e}{\gamma} = \frac{p_e}{\rho g}$$

Hidraulička visina je potencijalna energija sadržana u jediničnoj masi vode u obliku pritiska (kolona vode potrebna da proizvede ekvivalentni pritisak u bazi)

Rad po jediničnoj masi vode

$$\frac{Sila \cdot put(L)}{\text{jedinicna masa vode}} = \frac{p}{\gamma}[L]$$

Jednadžba energije (nastavak)

- Pozicijska energija (dio potencijalne)

$$\frac{\gamma(dV)y}{\gamma(dV)} = \frac{(\text{tezina})(\text{visina dizanja})}{\text{tezina}} = y$$

Energija jediničnog volumena koji se nalazi iznad referentne ravnine; dakle jednaka je radu potrebnom da se jedinični volumen vode digne na tu visinu

- Jednadžba hidrostatike:

$$\frac{p_1}{\gamma} + y_1 = \frac{p_2}{\gamma} + y_2 = konst$$

Potencijalna energija je suma visine pritiska i pozicijske visine

Održanje energije

- Voda u kretanju ima dodatnu kinetičku energiju u obliku visine (brzinska visina, h_v)

$$h_v = \frac{\text{Ukupna kinetička energija po jedinici vremena}}{\text{Ukupna težina po jedinici vremena}}$$

$$= \frac{\int \frac{1}{2} v^2 \frac{dm}{t}}{\int g \frac{dm}{t}} = \frac{\frac{1}{2}\int v^2 \rho v dA}{g\int \rho v dA} = \frac{1}{2g}\frac{\int v^3 dA}{\int v dA} \cong \frac{v^2}{2g}$$

Pretpostavka da sve strujnice imaju istu brzinu, ako ne, onda je v osrednjena brzina kroz neki presjek korigirana za Coriolisov coeficijent, α (nešto veći od 1)

Održanje energije (nastavak)

- Ukupna energetska visina

$$H = \frac{p}{\gamma} + y + \alpha \frac{v^2}{2g}$$

- Unutar jednog strujnog toka (Bernoulli jed.)

$$\frac{p_1}{\gamma} + h_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + h_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_f$$

h_f = gubitak energije, usljed dinamičkih napona otporu toka, koji se uz trenje pretvara u toplinu (2. zakon termodinamike)

Održanje energije (nastavak)

- Fizikalno objašnjenje:

  Energija je rad koji može izvršiti vodena masa na ukupnoj visini H

$$E = \rho g H \cdot V = HV\gamma \quad \left[\frac{\mathrm{ML}^2}{\mathrm{T}^2}\right] \qquad (\mathrm{Joule})$$

  Volumen vode je količina u nekom vremenu

$$V = \int Q dt \Longrightarrow$$

  odnosno *Qt* ako je *Q*=konst ili neka srednja vrijednost

Zakon održanja mase

- svaka materija je jedan oblik energije, dakle mora se ponašati prema zakonu održanja energije. Masa vode koja ulazi u strujni tok u vremenu dt mora biti ista na izlazu iz strujnog toka:

$$\rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 \quad \Longrightarrow$$

(*ρQ* je protok mase vode)

- množenjem s konstantnom silom gravitacije

$$\gamma_1 Q_1 = \gamma_2 Q_2 \quad \Longrightarrow$$

(težina vode po jedinici vremena)

- pri nestišljivoj tekućini *ρ*=konst i *γ*=konst

$$Q_1 = Q_2 \Rightarrow \int_{A_1} v dA = \int_{A_2} v dA$$

Jednadžba kontinuiteta

Jednadžba Snage

- Snaga je definirana kao energija po jedinici vremena (*P=E/t*). Kombinirajući jednadžbu kontinuiteta s jednadžbom energije, dobije se jednadžba snage.
- Dakle, pri tečenju vode s protokom Q; ovo tečenje se može pisati kao težina vode po jedinici vremena:

gravitaciona sila *w=m* (masa) x *g* (gravitacija)*=[ML/T²]*

w/T *=[ML/T³]*

$$\gamma Q = \rho g Q \qquad \left(M/L^2T^2\right)\left(L^3/T\right) = \left[ML/T^3\right]$$

- Množenje (γQ) s energijom po jediničnoj težini, npr., hidraulička visina h, dobije se:

$$P(\text{snaga}) = \frac{\text{Energija}}{\text{vrijeme}} = \frac{\text{tezina}}{\text{jed.vrijeme}} \cdot \frac{\text{energija}}{\text{jed.tezina}} = \gamma Q h$$

$Q\gamma$ h

Jednadžba Snage (nastavak)

- Ako se hidraulička visina h izrazi preko ukupne energetske visine dobiva se izraz za snagu:

$$P = \gamma Q h = \gamma Q \cdot \left[\frac{p}{\gamma} + y + \alpha \frac{v^2}{2g} \right] \qquad [W]$$

- Osnovne jedinice za snagu:

Watt (W)=1 J/s [ML^2/T^3]
1KW, 1MW, 1GW, 1TW=10^3 W, 10^6 W, 10^9 W, 10^{12} W
Konjska snaga (KS)=736 W
Erg/s = 10^{-7}W
BTU/s =1,055 •10^3 W

$$P = \frac{\gamma Q h}{736} \qquad [KS]$$

Jednadžba Snage (nastavak)

- Ako uzmemo da voda ima gustoću 1000 kg/m^3 i g=9.81 m/s^2 tada se dobije izraz za hidrauličku snagu:

$$P = 1000\left(kg/m^3\right)\cdot 9.81\left(m/s^2\right) H(m)\cdot Q\left(m^3/s\right) \quad [W]$$

$$P = 9.81QH \quad [KW]$$

- Kako se u koritu rijeke protok mijenja tako je i snaga rijeke funkcija vremena i za neku sekciju vodotoka možemo izraziti snagu kao:

$$P(t) = 9.81\frac{1}{T}\int_0^T QHdt \quad [KW]$$

- Dakle, što je veći protok na dijelu vodotoka to je veća snaga tog poteza rijeke.
- Konacno se odabirom visine pregrade (brane) i lokacije osi turbine moze povećati neto pad H i time također povećati snaga hidroelektrane

Voda – nosilac energije

- Vodne snage određene su hidrološkim karakteristikama voda na slivovima i u rijekama
- Protok, njegova varijabilnost i vjerojatnost pojave daju osnovne karakteristika vodostaja (režim voda odnosno hidrološke fluktuacije)
- Umjetna jezera i rezervoari imaju zadatak smanjiti i izravnati jake hidrološke fluktuacije

Razlikujemo:

a) Energiju oborina
b) Energiju voda koje se slijevaju
c) Energiju vodotoka (koncentriranih tokova)

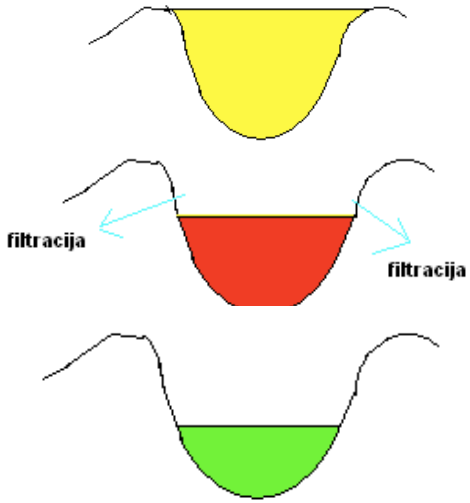
POTENCIJALNE MOGUĆNOSTI RAZVOJA RIJEČNOG SLIVA

Definicija potencijala vodnih resursa

- Vodni potencijal je granica do koje se može razviti jedno rešenje u okviru riječnog sliva ne vodeći računa o ograničenjima koja su posljedica usaglašavanja sa drugim rješenjima.

Potencijal vodnih resursa dijelimo na:

1. Tehnički
   - maksimalna granica tehničkih mogućnosti razvoja rješenja
2. Teorijski
   - maksimalna granica do koje se može razviti jedno rješenje
3. Ekonomski
   - maksimalna granica razvoja koja je ekonomski opravdana



Definicija potencijala vodnih resursa (2)

Potencijali vodnih resursa koji se analiziraju:

1. Vodoprivredni potencijal
2. Potencijal različitih korisnika
   a. Vodoopskrba
   b. Hidroenergetika
   c. Navodnjavanje
   d. Navigacija
3. Potencijal zaštite od poplava
4. Potencijal kvalitete vode (ODV)
   a. Biologija
   b. Kemija
   c. Morfologija
5. Potencijal za prihvat efluenta

Vodoprivredni potencijal

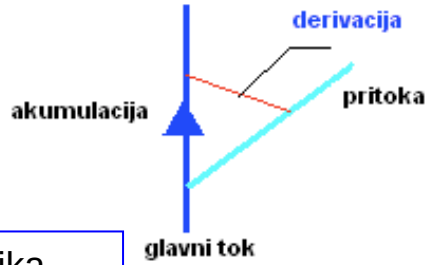
Vodoprivredni potencijal odnosi se na izgradnju:

Akumulacija

- **Morfološki** — Analiza zapremine koja se može realizirati neovisno o drugim ograničenjima
- **Tehnički** — Hidrološki uvjeti koji mogu npuniti akumulaciju
- **Ekonomski** — Analiza da ekonomska efikasnost ne prelazi granicu isplativosti

Derivacija

- **Tehnički** — Predstavlja mogući potencijal realizacije derivacija radi proširenja riječnog sliva



- **Ekonomski** — Predstavlja koštanje kubika vode isporučenog korisniku

Potencijal različitih korisnika

- Potencijal različitih korisnika je ograničen kapacitetom vodnih resursa

- Kapacitet vodnih resursa definira:

  - Potencijal snabdjevanja vodom – vodoopskrba
  - Hidroenergetski potencijal
  - Potencijal navodnjavanja

- Morfologija vodnih resursa definira:

  - Potencijal za navigaciju

1. Vodoopskrba kao potencijal snabdjevanja vodom predstavlja tehnički raspoloživu količinu vode koja se pregradom može akumulirati na određenom presjeku rijeke

2. Hidroenergetski potencijal

- **Teorijski**

  - Potencijal prema padavinama

    Predstavlja idealnu snagu i energiju padavina koja se može dobiti na jednom riječnom slivu

  - Specifični potencijal padavina

    Predstavlja potencijal snage i energije padavina po km^2 sliva

  - Potencijal specifičnog proticaja

    Predstavlja potencijal snage i energije protoke po km^2 sliva

  - Linearni potencijal

    Predstavlja potencijal snage i energije protoke rijeke prema dužini riječnog toka (uzdužnom profilu rijeke)

- **Realni**

  - Dobije se kada se teorijski potencijal pomnoži koeficijentima korisnog rada

3. Potencijal navodnjavanja

- **Teorijski**

  - Predstavlja ukupnu površinu koja nije pokrivena dovoljnim padavinama

- **Tehnički**

  - Predstavlja sustav navodnjavanja koji je tehnički izvodljiv s obzirom na morfologiju rijeke i topografiju sliva

- **Ekonomski**

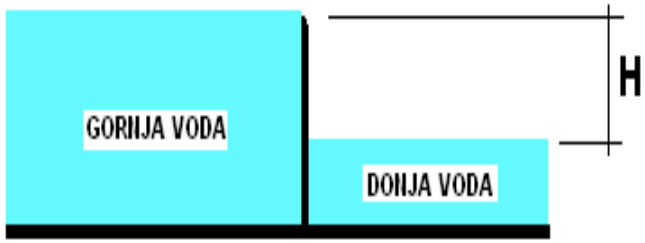
  - Predstavlja sustav navodnjavanja koji je ekonomski opravdan iznad neke granice opravdanosti (*point of marginal return*)

Izračun hidroenergetskog potencijala

1. Pad (H)
   - Da bi se koristila energija rijeke potrebno je da na odabranom profilu postoji pad ili ga se pregradom uspostavi
   - razlika između gornjeg i donjeg nivoa vode naziva se bruto pad postrojenja
2. Rad elementarnog volumena vode
   - Definiran je izrazom

$$dW = \rho \cdot g \cdot dV \cdot H = \gamma \cdot dV \cdot H \qquad \left[\frac{ML^2}{T^2}\right]$$

   - dW je Elementarni rad
   - H je pad
   - γ je specifična težina vode



Izračun hidroenergetskog potencijala (2)

3. Snaga

$$dP = \frac{dW}{dt} = \frac{dV}{dt} \cdot \gamma \cdot H = dQ \cdot \gamma \cdot H$$

$$P = 9.81 \cdot Q \cdot H \ \ [KW] = 13.33 \cdot Q \cdot H \ \ [\mathrm{KS}]$$

3. Energija

$$dE = dP \cdot dt = dV \cdot \gamma \cdot H$$

Energije vode

Pretvorbe energije vode

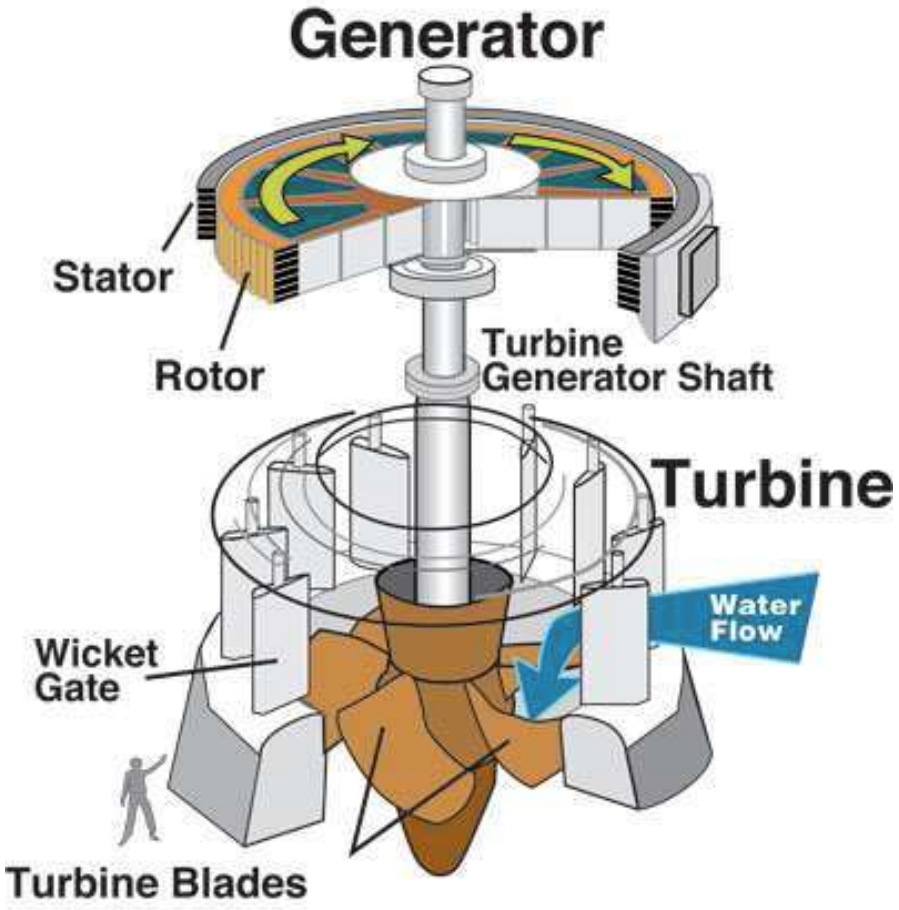
❑ **Sunčeva energija kao toplinska dopire do Zemljine površine izaziva** isparavanje vode, tla i bilja, što uzrokuje podizanje vode: posljedica je energija položaja vode (potencijalna) i energija kretanja vode (kinetička)! **Energija položaja vode je početni oblik energije vode u** prirodi koji se može iskoristiti u tehničkim pretvorbenim sustavima.

❑Oblici energije položaja vode: **vodotoci, plima i oseka, morski valovi.**

Pretvorba energije vode

Osnovni način uporabe:

- pretvorba energije položaja vode (potencijalna u akumulacijama)
- kinetičke energije vode (protočne) u mehaničku energiju protjecanjem kroz vodne turbine
- potom najčešće u električnu u generatorima



Projektiranje hidroelektrana

Terminologija

- Pad vode
  - Voda mora padati s veće visine na nižu da bi se potencijalna energija pretvorila iz potencijalne u kinetičku
  - Razlika između ta dva nivoa generirana pregradom ili branom zove se **pad vodnog** lica
- Brane:
  - **visoke** (200 ili više metara)
  - **srednje** (30 do 200 m)
  - **male** (ispod 30 m)
- Snaga je proporcijonalna umnošku

  pad x protok

http://www.wapa.gov/crsp/info/harhydro.htm

Hidraulička snaga

$$P_h = \rho Q \cdot gH \qquad [W]$$

ρQ = protok mase vode [*kg/s*]
ρ = specifična gustoća vode [kg/m^3]
Q = protok [m^3/s]
gH = specifična hidraulička energija [*J/kg*]
g = akceleracija [m/s^2]
H = neto pad [*m*]

Mehanička snaga

$$P_{meh} = P_h \cdot \eta_{tot} \qquad [W]$$

$\eta_{tot} =$ Ukupni koeficijent iskorištenja = η turbine x η generatora x η trafostanice

Ako se hidraulička snaga izrazi bez specifične gustoće vode onda je konačna snaga turbine u kilovatima:

$$P_{meh} = 9.81 Q H \eta_{tot} \qquad [kW]$$

Rangiranje hidroelektrana po snazi

- Velike HE
  - Preko 100 MW spojene direktno na mrežu
- Srednja HE
  - 15 - 100 MW uglavnom spojene na mrežu
- Male HE
  - 1 - 15 MW uglavnom spojene na mrežu
- Mini HE
  - Iznad 100 kW ali ispod 1 MW
  - Priključene direktno na potrošaća ili na mrežu
- Micro-hydro
  - Od 5kW do 100 kW
  - Često se koriste za izolirana naselja ili industriju daleko od mreže.
- Pico-hydro
  - Od nekoliko stotina W do 5kW
  - Izolirana područja daleko od mreže

www.itdg.org/docs/technical_information_service/micro_hydro_power.pdf

Načini instalacije hidroelektrana

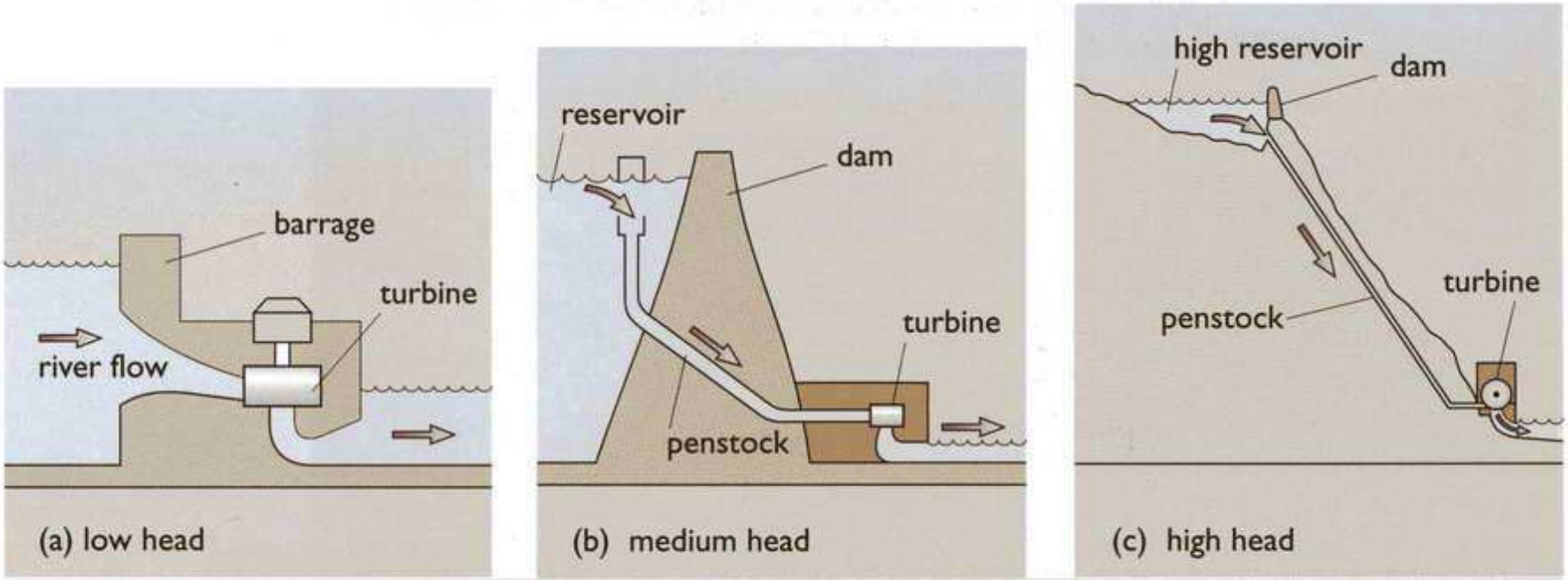


Figure 5.13 Types of hydroelectric installation

Boyle, *Renewable Energy,* 2nd edition, Oxford University Press, 2003

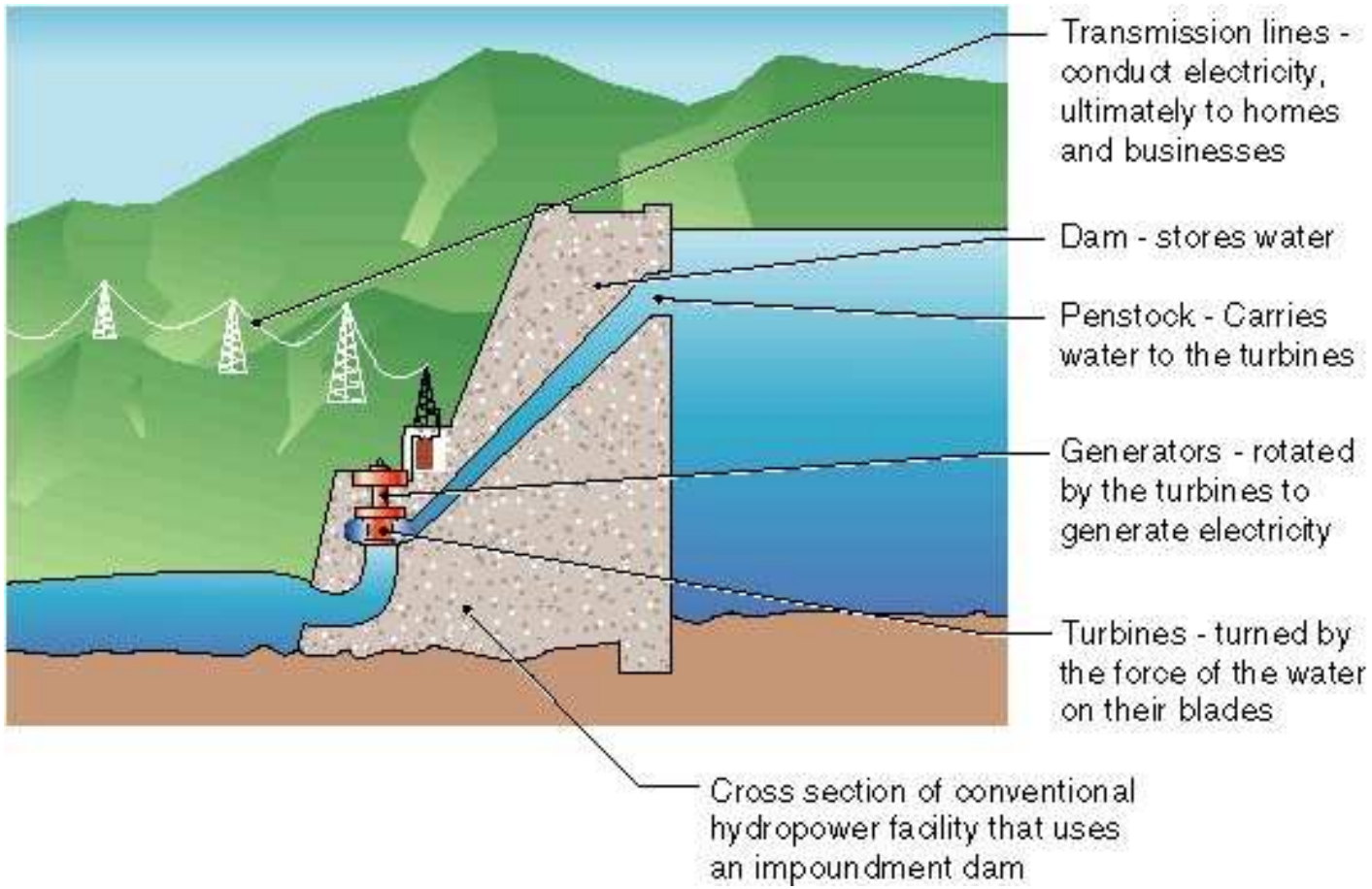
Osnovne karakteristike

- HIDROELEKTRANE:
  - Pokreću se jednostavno i brzo te mjenjaju izlaznu snagu promptno
  - Komplementarne su termo elektranama (ugljen ili plin) i nuklearkama koje su najefikasnije za pokrivanje temeljne snage
  - Pokrivaju vršnu potrebu za snagom
  - Uštede milijune tona nafte

Podjela po načinu zapremanja vode

- Akumulacijske
  - Hoover Dam, Grand Coulee ...
- Derivacijske
  - Niagara Falls
- Reverzibilne
  - Protok u oba smjera
  - Voda se pumpa u girnji rezervoar i vraća se na nižu kotu generirajući energiju

Tipične akumulacijske



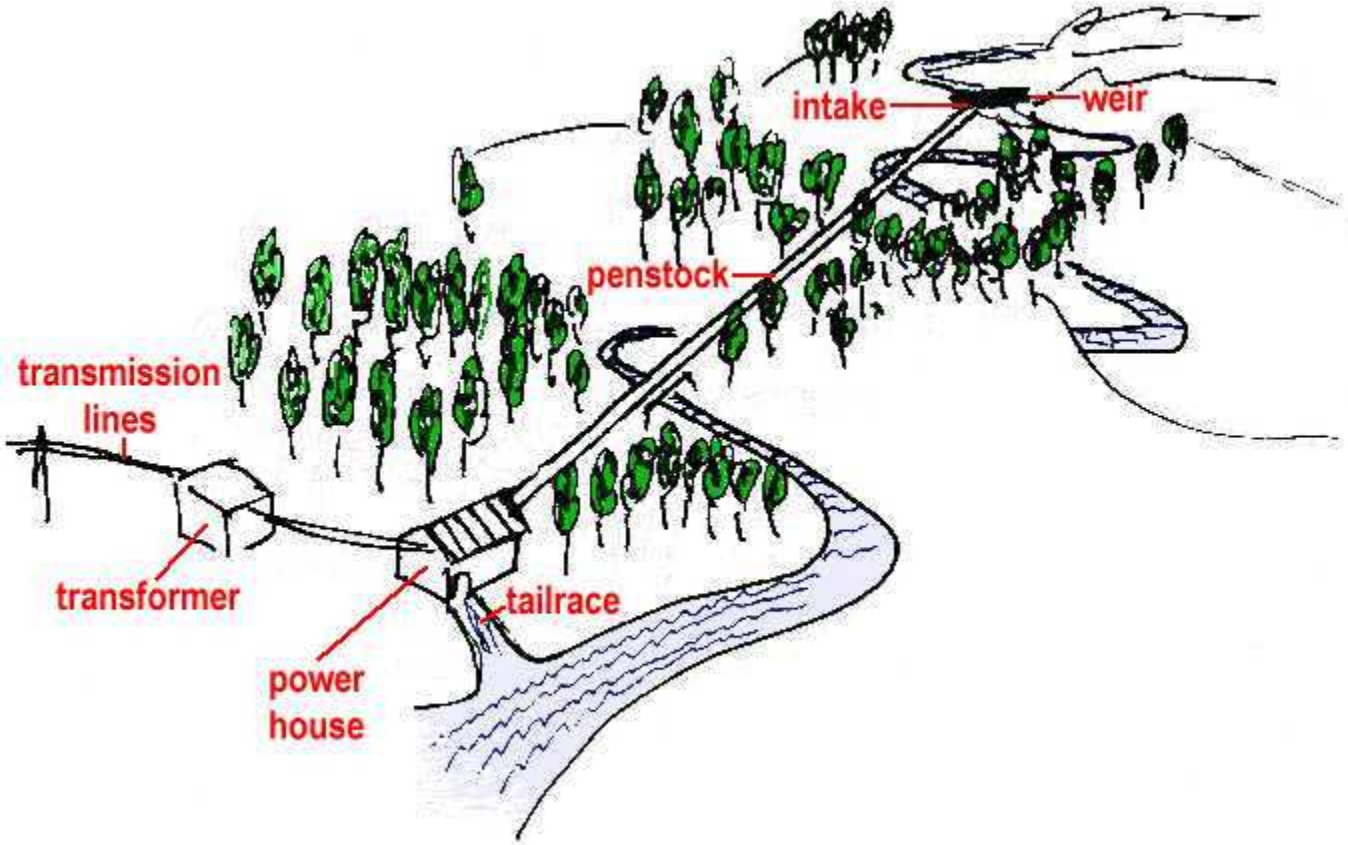
http://www1.eere.energy.gov/windandhydro/hydro_plant_types.html

Primjer:

Hoover Dam (US)

http://las-vegas.travelnice.com/dbi/hooverdam-225x300.jpg

Derivacijske

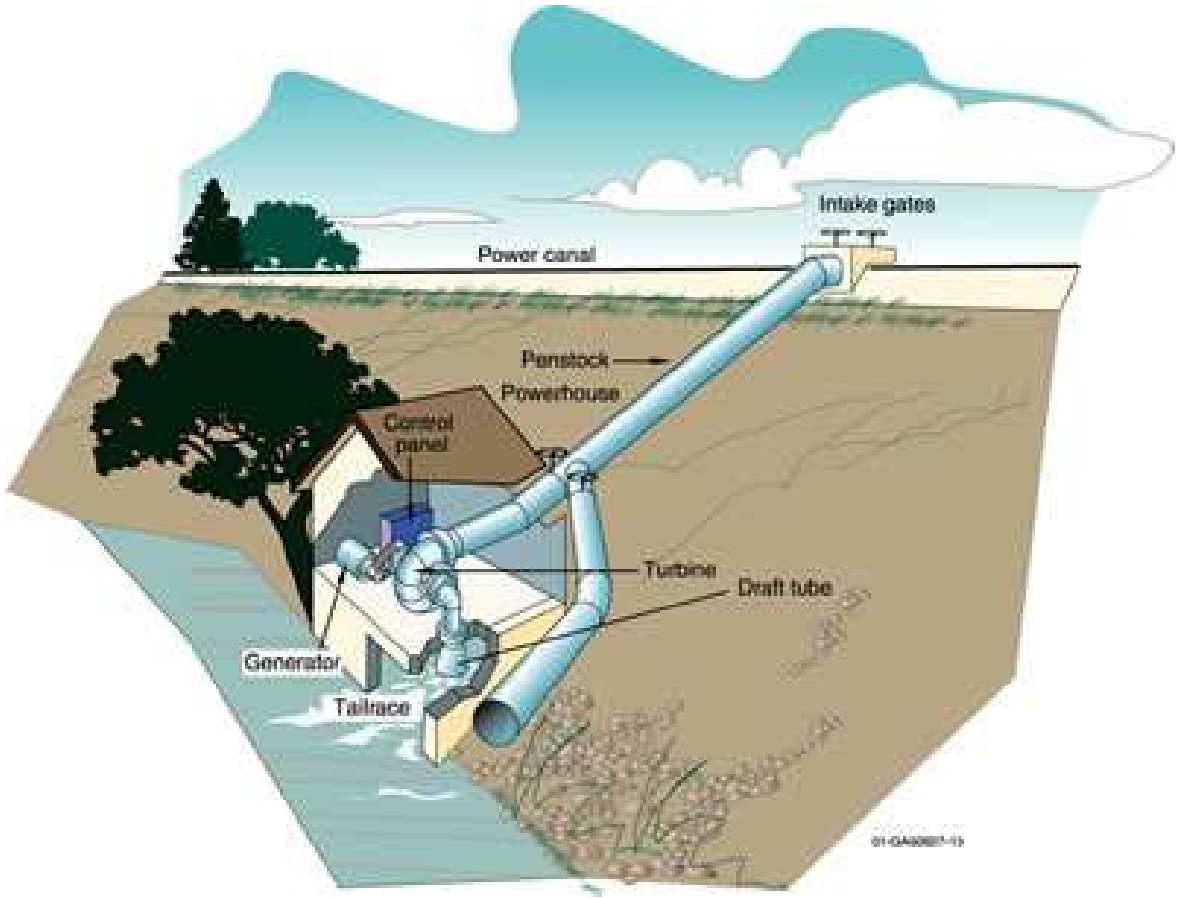


Primjer:

Derivacijska HE (Tazimina, Alaska)

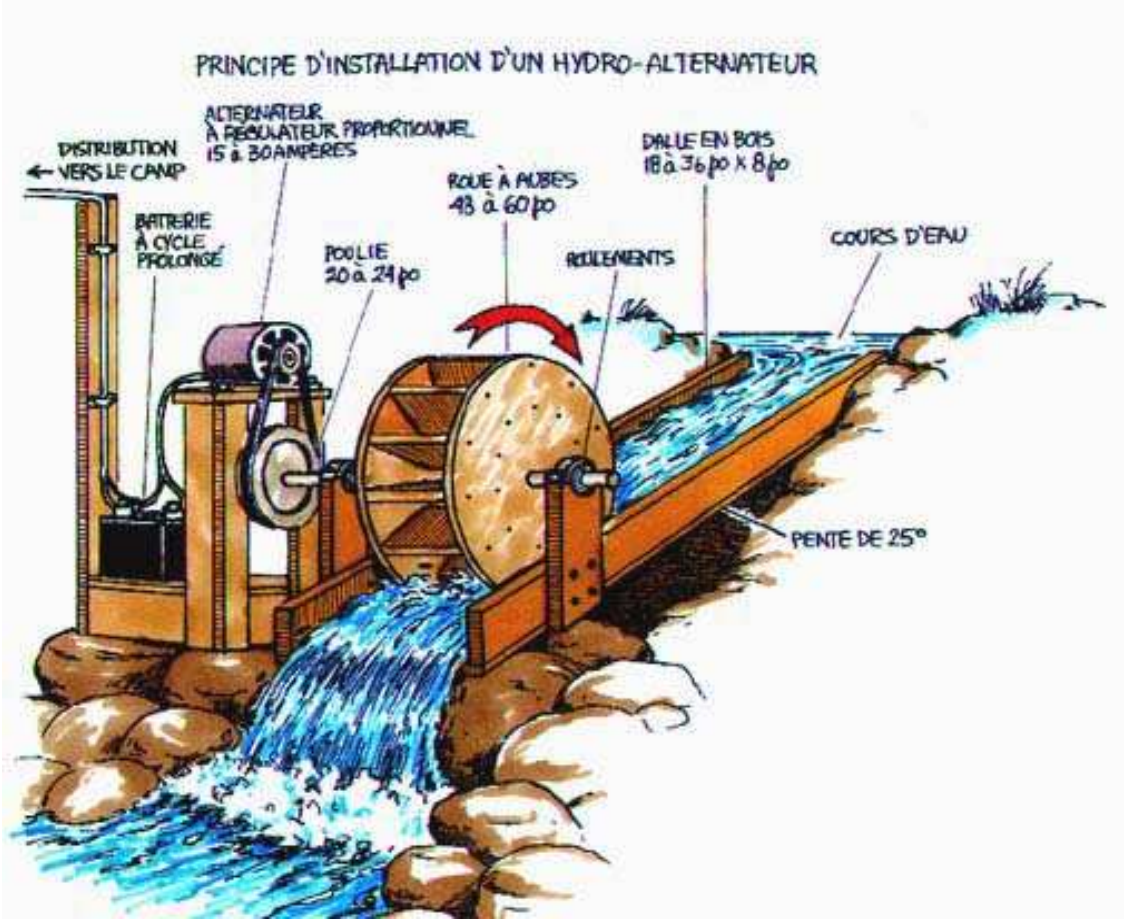
http://www1.eere.energy.gov/windandhydro/hydro_plant_types.html

Micro derivacijska HE



http://www1.eere.energy.gov/windandhydro/hydro_plant_types.html

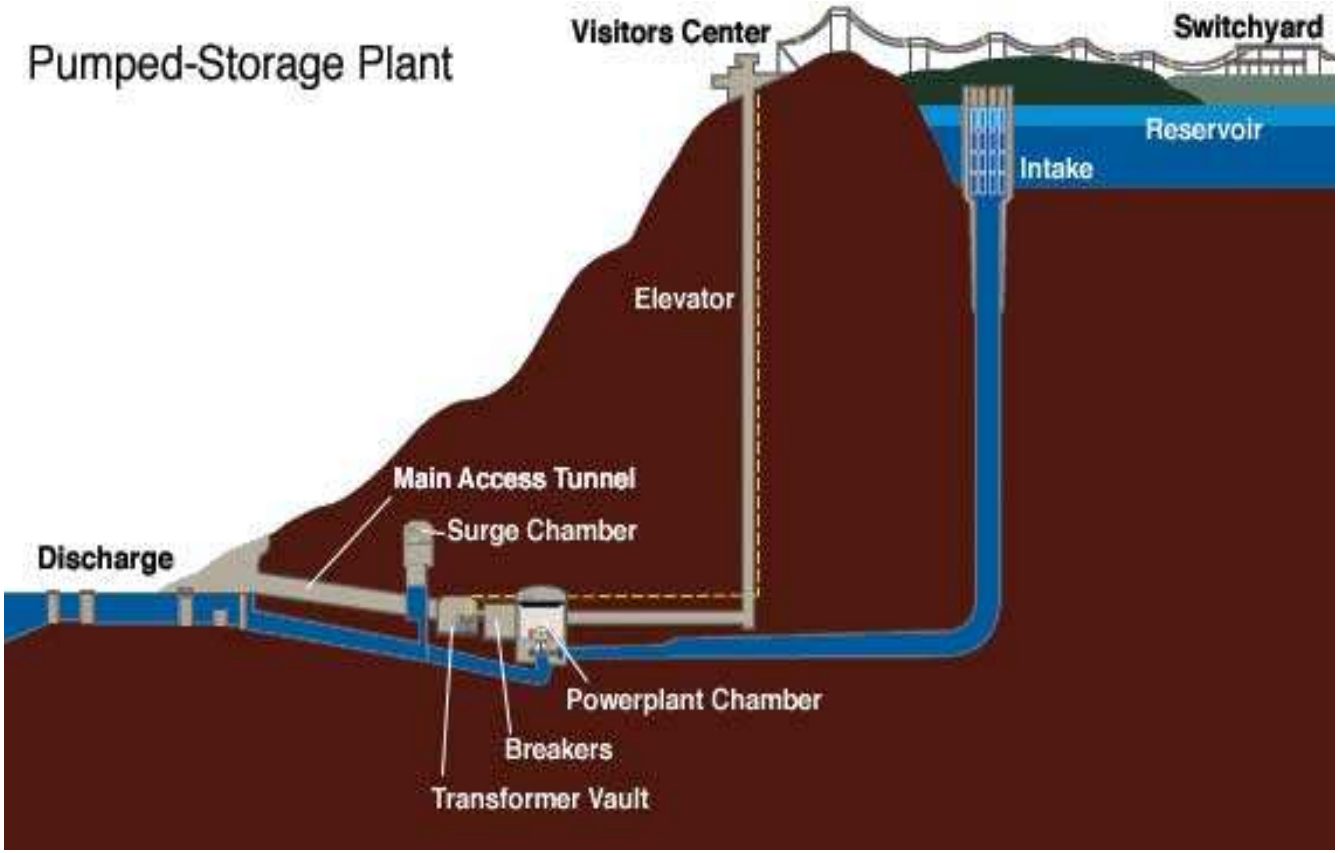
Micro Hydro Example



Used in remote locations in northern Canada

http://www.electrovent.com/#hydrofr

Koncept Reverzibilne HE



Pumped Storage System (reverzibilne)

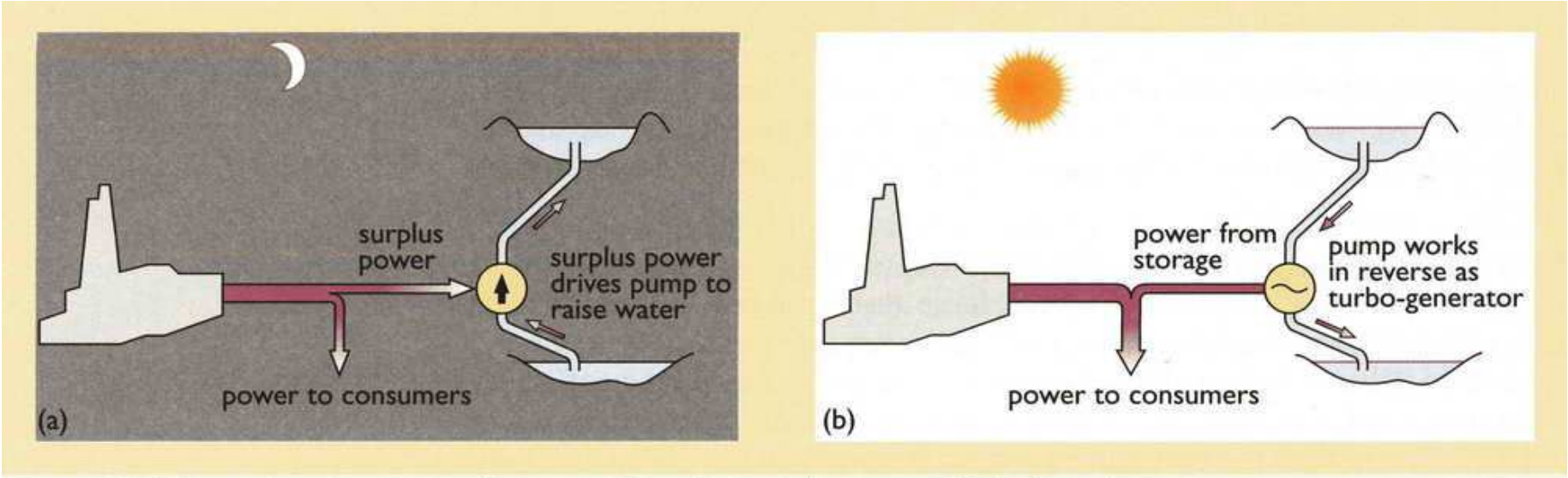


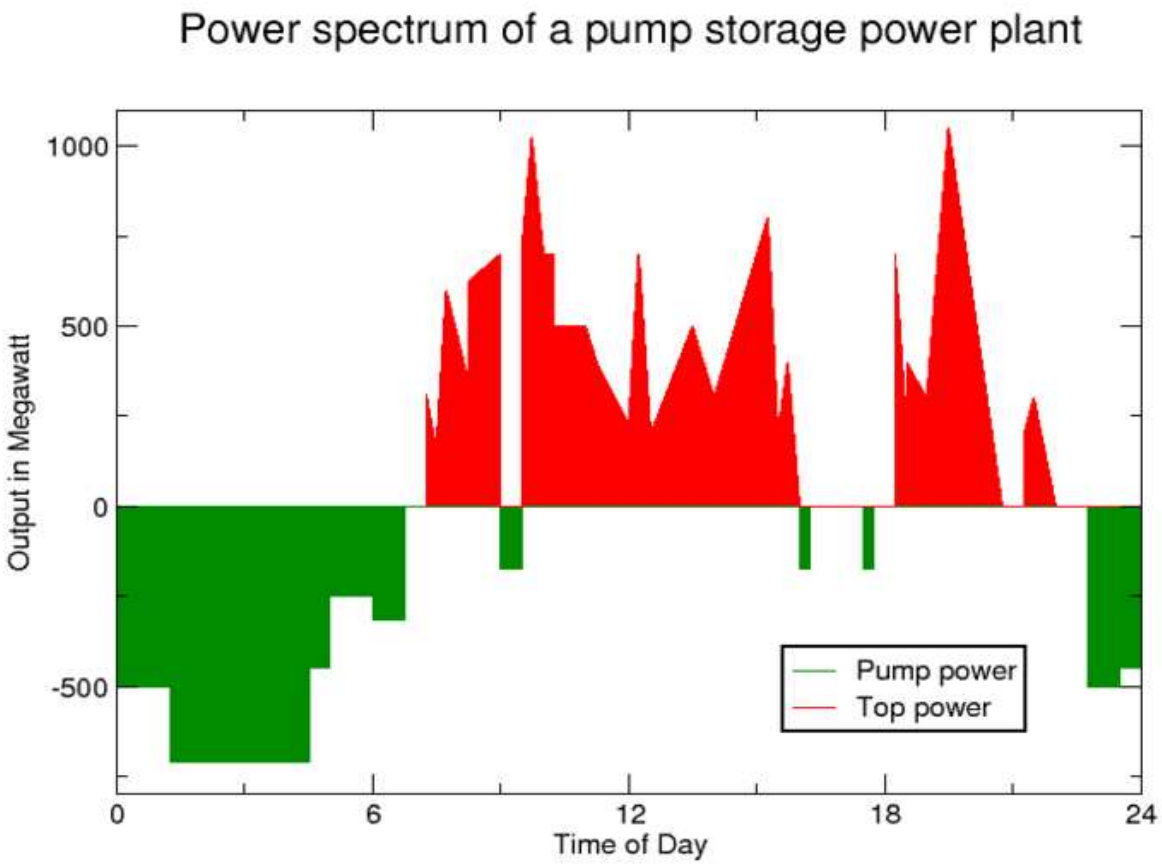
Figure 5.27 Pumped storage system: (a) at time of low demand; (b) at time of high demand

Boyle, *Renewable Energy,* 2nd edition, Oxford University Press, 2003

Primjer:
Cabin Creek Pumped Hydro (Colorado)

- Completed 1967
- Capacity – 324 MW
  - Two 162 MW units
- Purpose – energy storage
  - Water pumped uphill at night
    - Low usage – excess base load capacity
  - Water flows downhill during day/peak periods
  - Helps Xcel to meet surge demand
    - E.g., air conditioning demand on hot summer days
- Typical efficiency of 70 – 85%

Pumped Storage Power Spectrum



Turbine Design

Francis Turbine
Kaplan Turbine
Pelton Turbine
Turgo Turbine
New Designs

Types of Hydropower Turbines

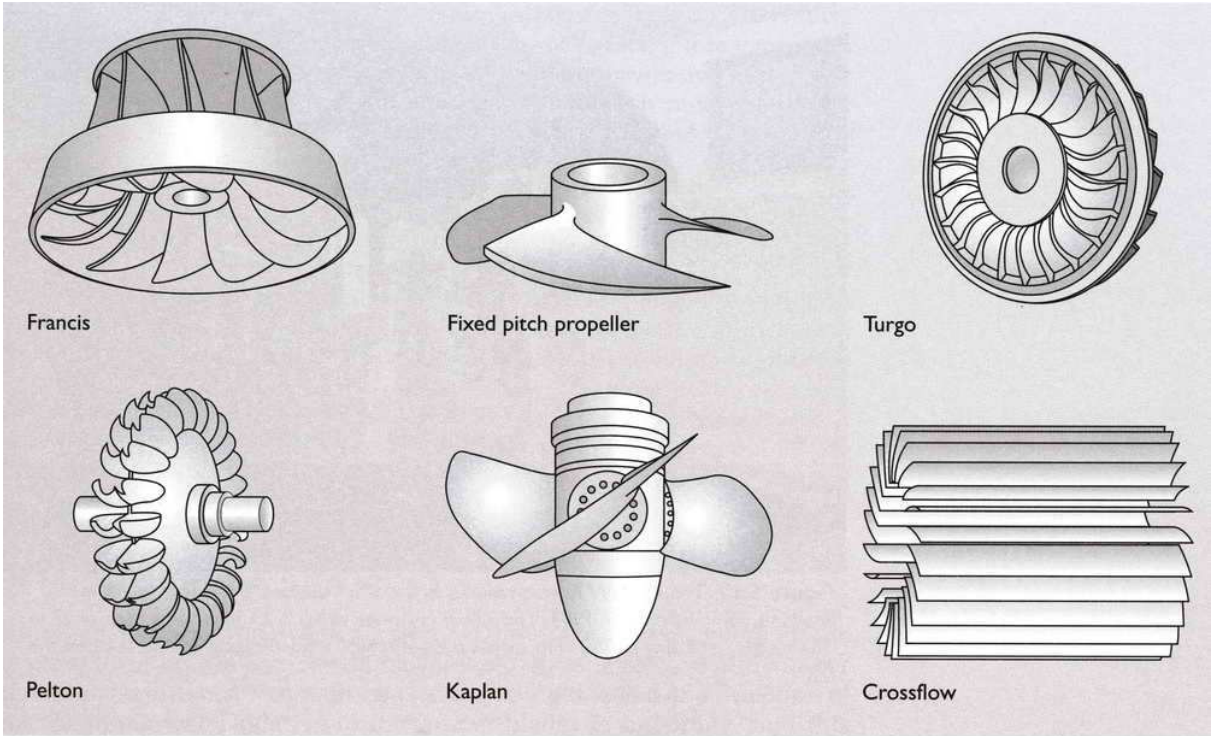


Figure 5.15 Types of turbine runner

Boyle, *Renewable Energy,* 2nd edition, Oxford University Press, 2003

Classification of Hydro Turbines

- Reaction Turbines
  - Derive power from pressure drop across turbine
  - Totally immersed in water
  - Angular & linear motion converted to shaft power
  - Propeller, Francis, and Kaplan turbines
- Impulse Turbines
  - Convert kinetic energy of water jet hitting buckets
  - No pressure drop across turbines
  - Pelton, Turgo, and crossflow turbines

Schematic of Francis Turbine

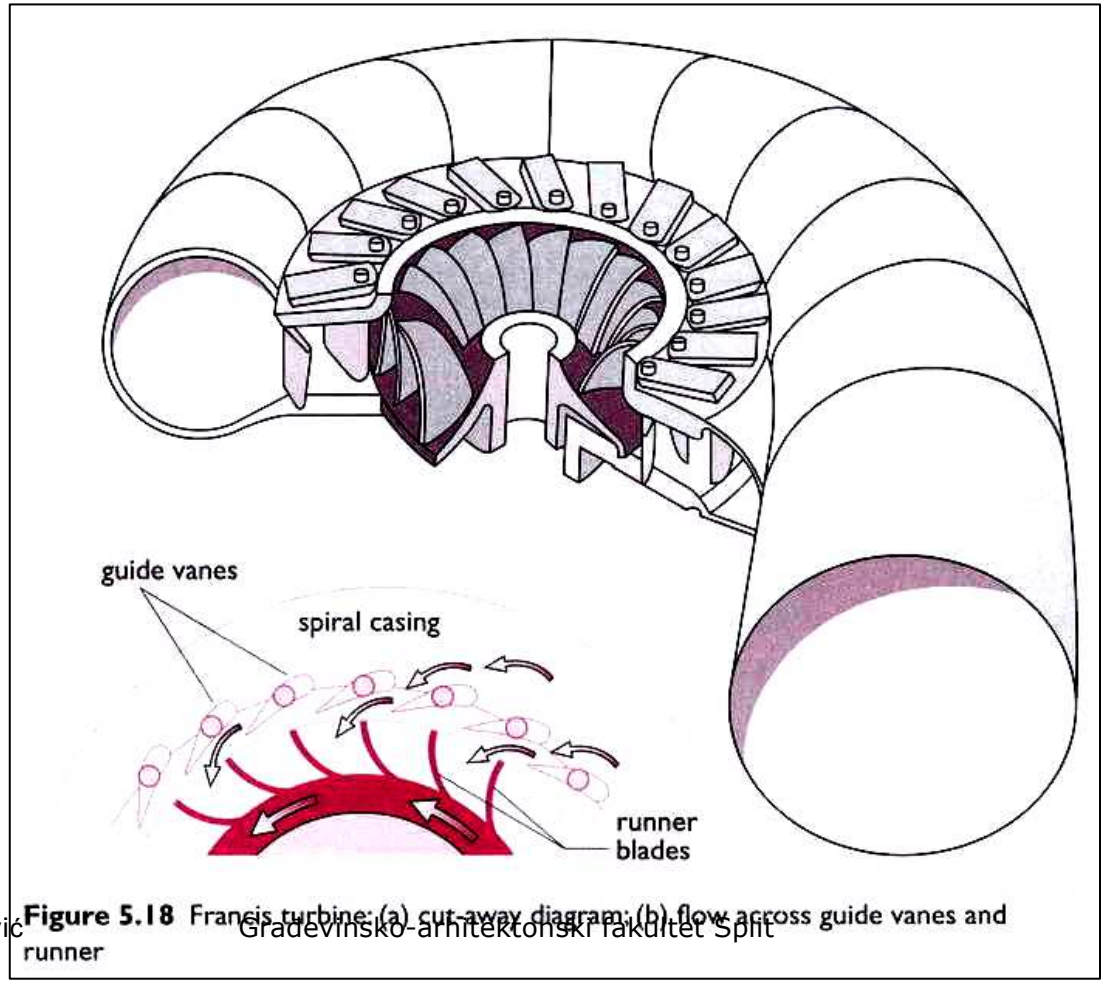
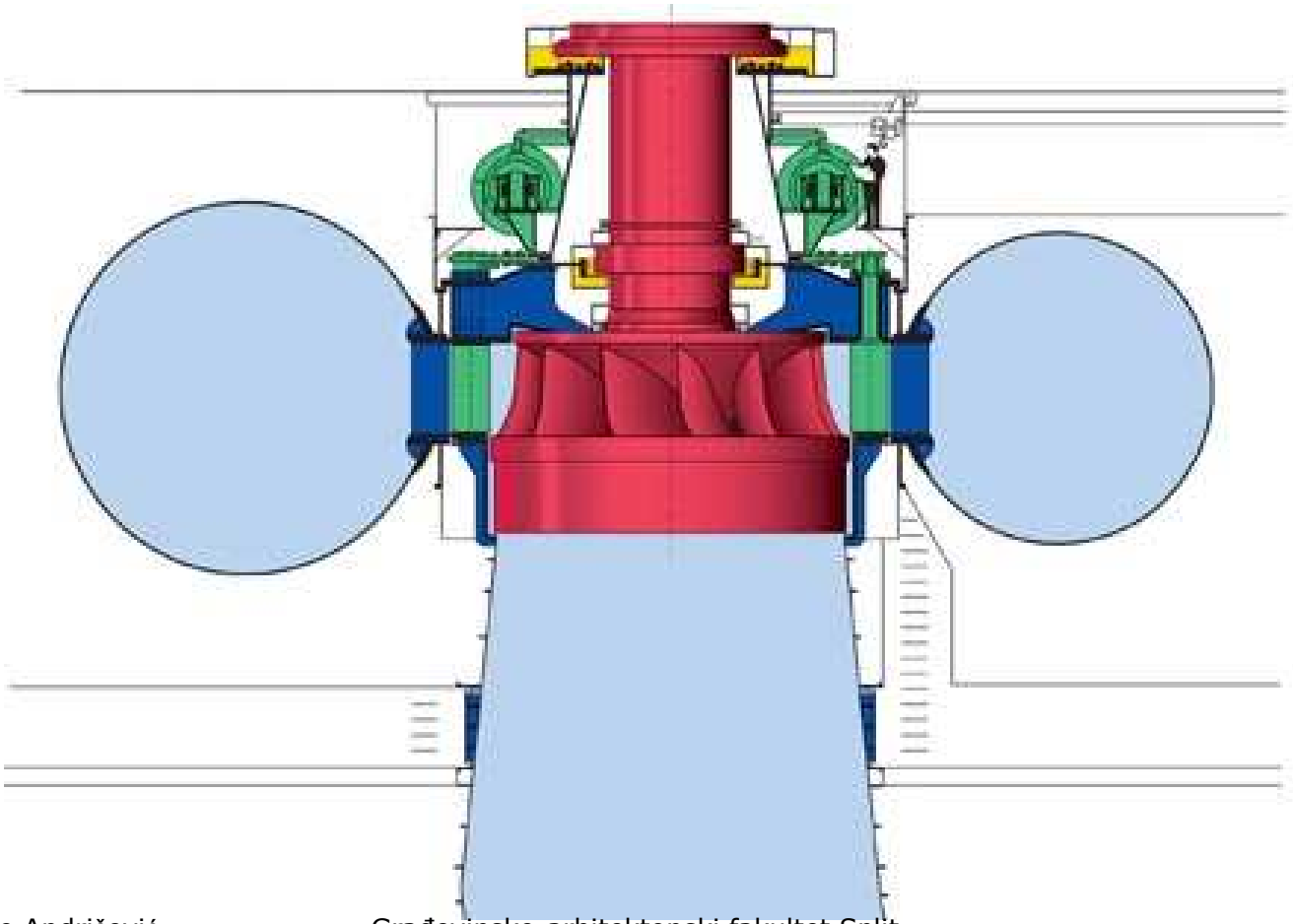


Figure 5.18 Francis turbine: (a) cut-away diagram; (b) flow across guide vanes and runner

Boyle, *Renewable Energy,* 2nd edition, Oxford University Press, 2003

Francis Turbine Cross-Section

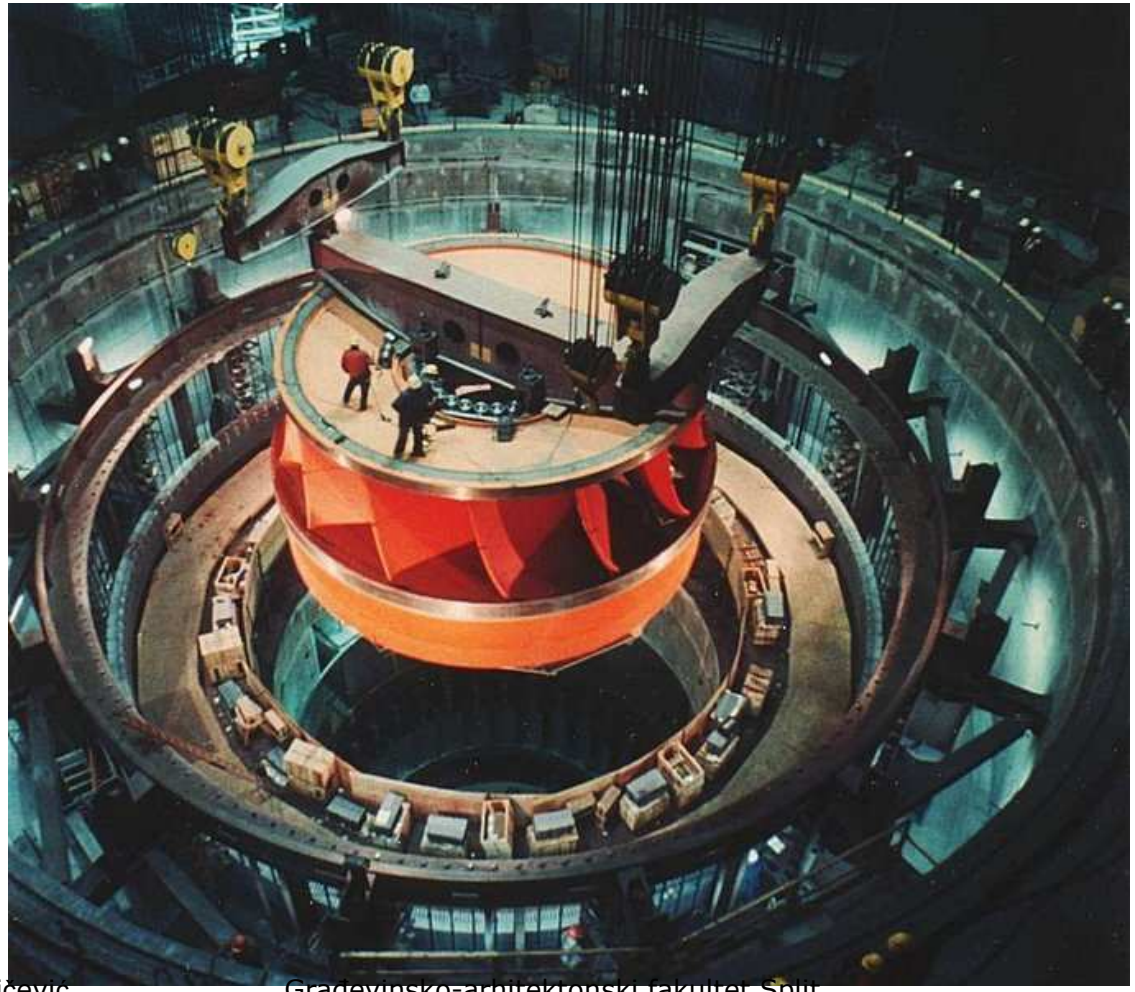


Boyle, *Renewable Energy,* 2nd edition, Oxford University Press, 2003

Small Francis Turbine & Generator

"Water Turbine," Wikipedia.com

Francis Turbine – Grand Coulee Dam

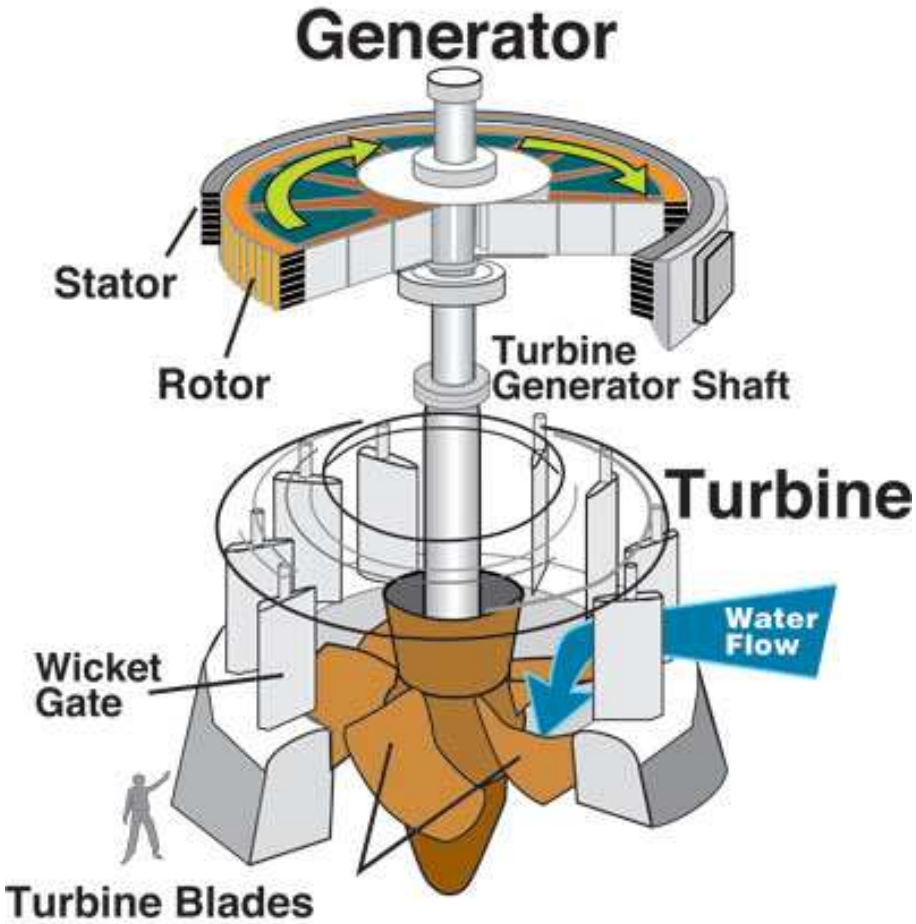


"Water Turbine," Wikipedia.com

Fixed-Pitch Propeller Turbine

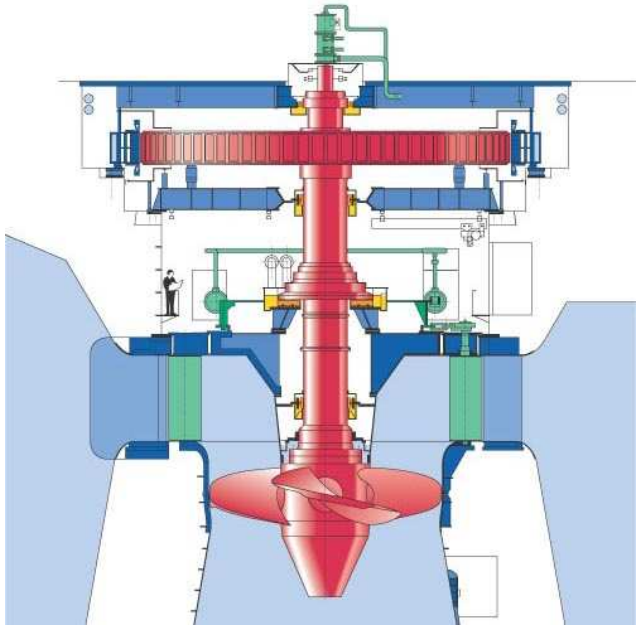
"Water Turbine," Wikipedia.com

Kaplan Turbine Schematic



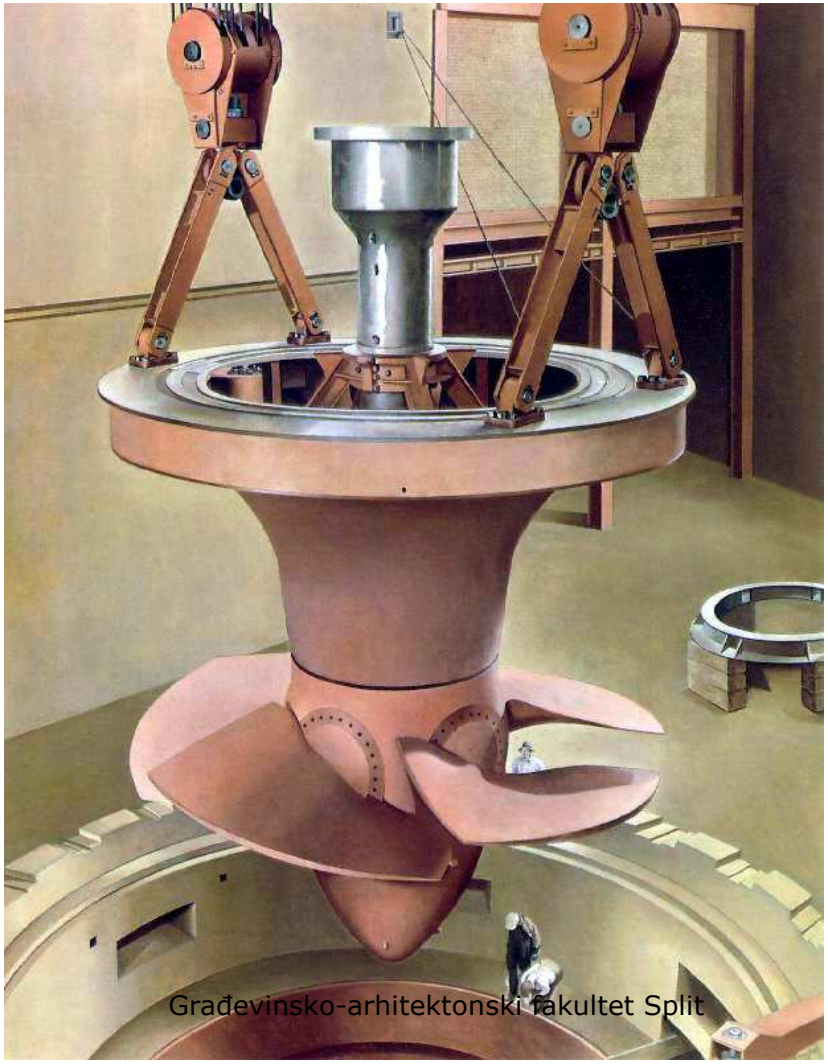
"Water Turbine," Wikipedia.com

Kaplan Turbine Cross Section

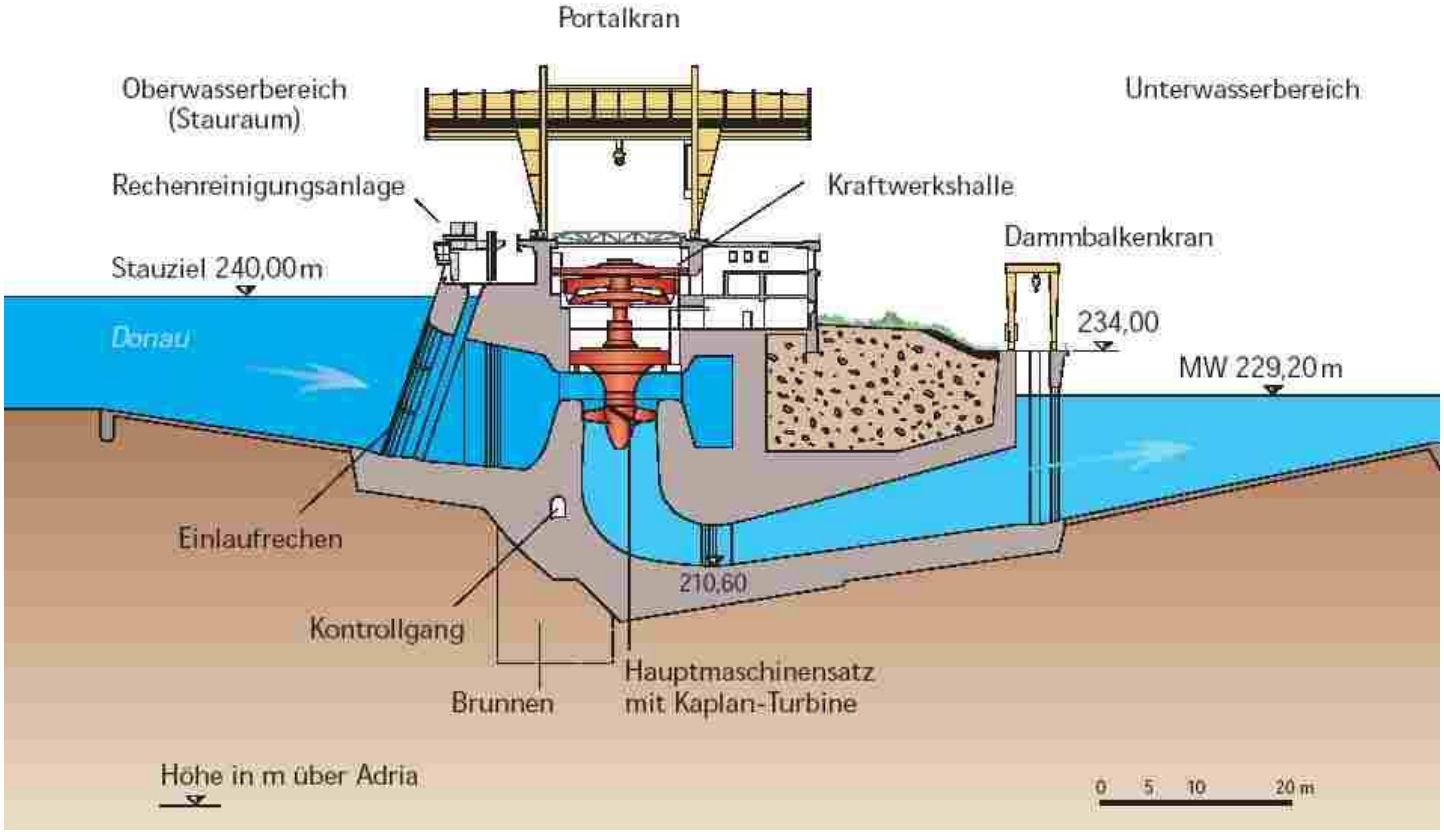


"Water Turbine," Wikipedia.com

Suspended Power, Sheeler, 1939

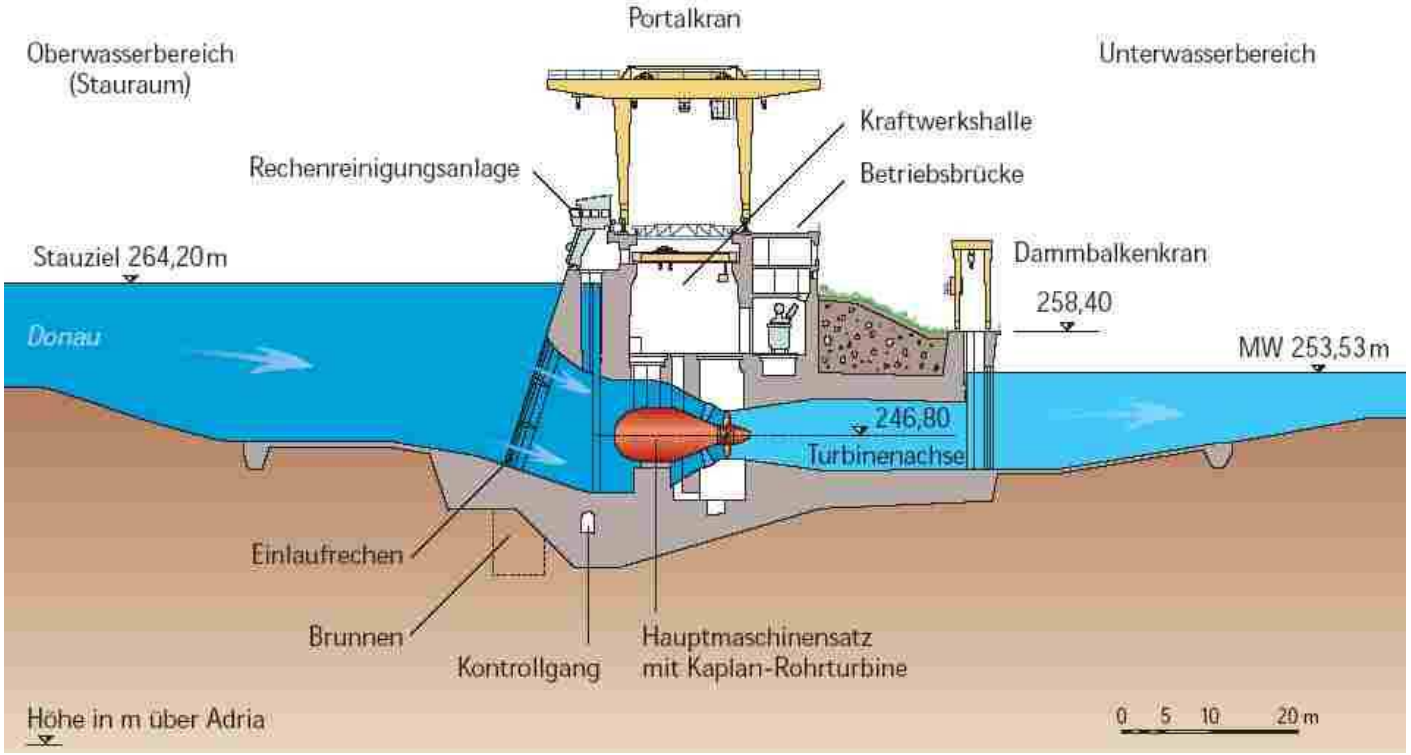


Vertical Kaplan Turbine Setup



Boyle, *Renewable Energy,* 2nd edition, Oxford University Press, 2003

Horizontal Kaplan Turbine



Boyle, *Renewable Energy,* 2nd edition, Oxford University Press, 2003

Pelton Wheel Turbine

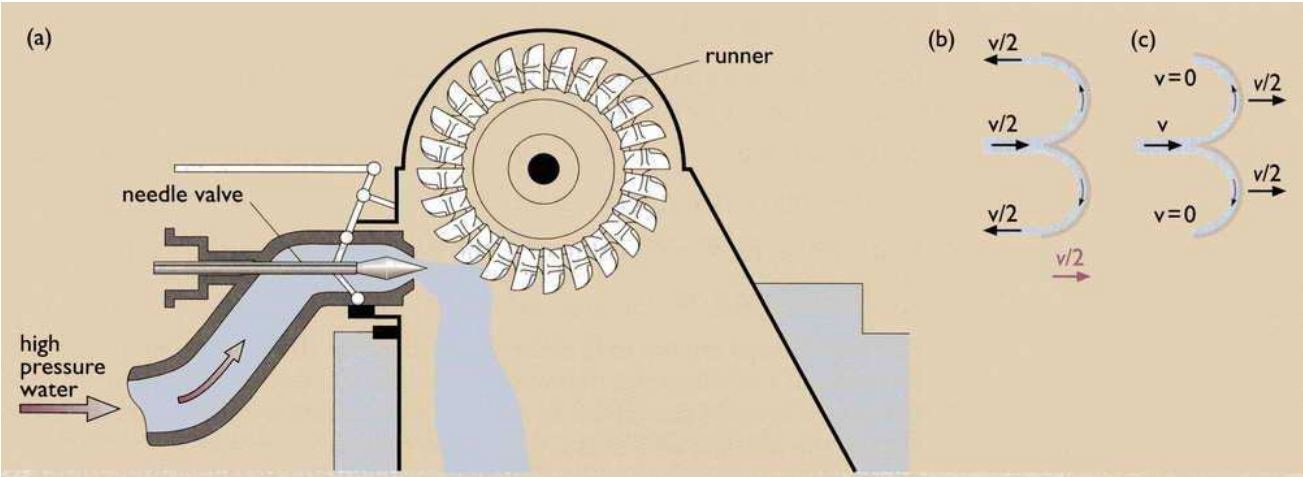


Figure 5.21 Pelton wheel turbine: (a) vertical section; (b) water flow as seen from moving cup; (c) actual motion of water and cup

Boyle, *Renewable Energy,* 2nd edition, Oxford University Press, 2003

Turgo Turbine

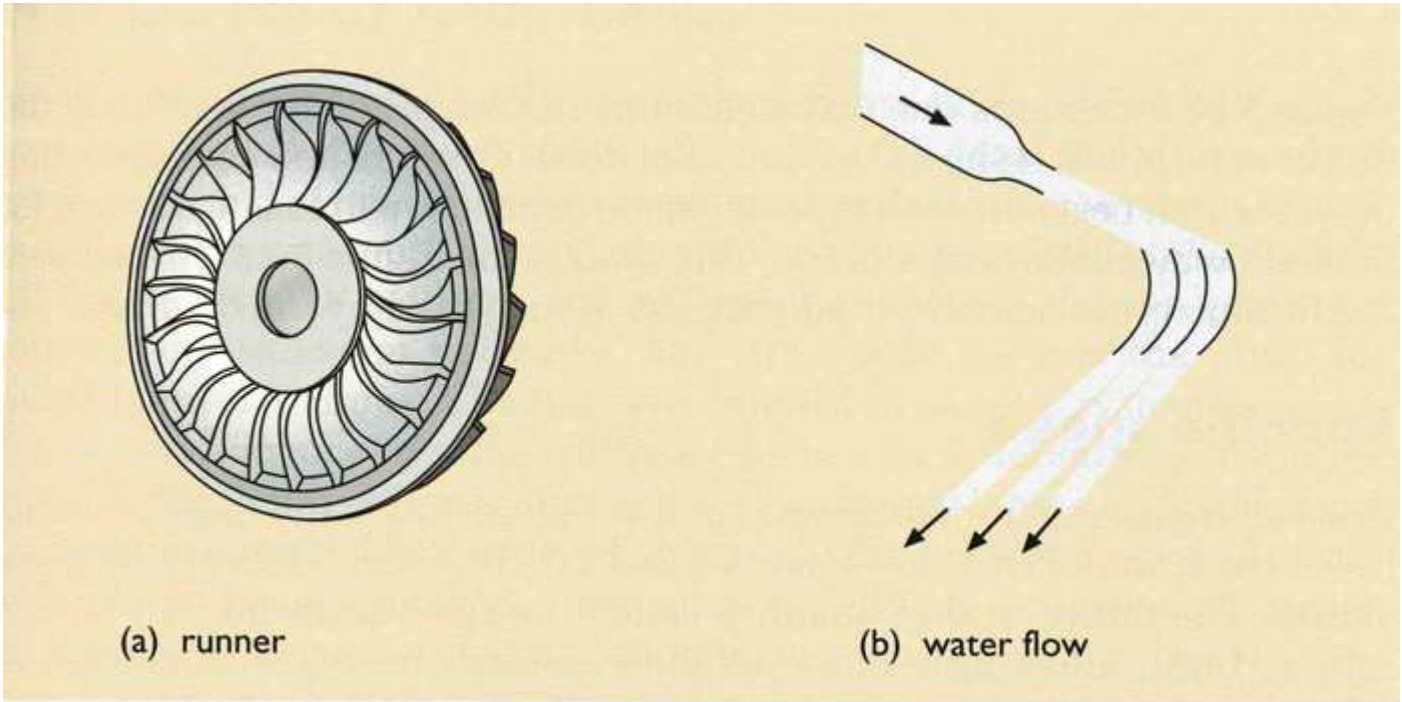


Figure 5.22 Turgo turbine: (a) runner; (b) water flow

Boyle, *Renewable Energy,* 2nd edition, Oxford University Press, 2003

Turbine Design Ranges

- Kaplan $2 < H < 40$
- Francis $10 < H < 350$
- Pelton $50 < H < 1300$
- Turgo $50 < H < 250$

(H = head in meters)

Boyle, *Renewable Energy,* 2nd edition, Oxford University Press, 2003

Turbine Ranges of Application

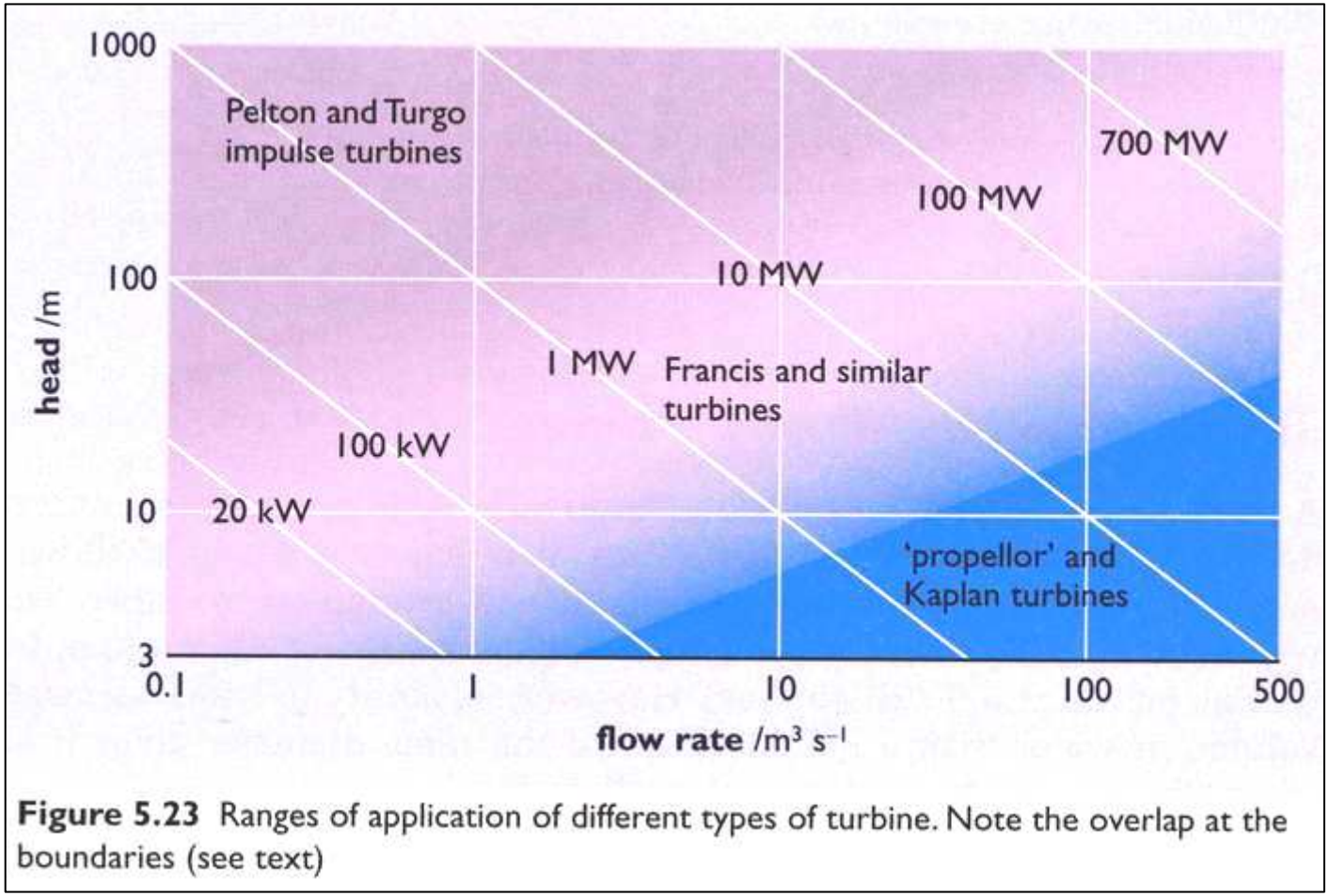


Figure 5.23 Ranges of application of different types of turbine. Note the overlap at the boundaries (see text)

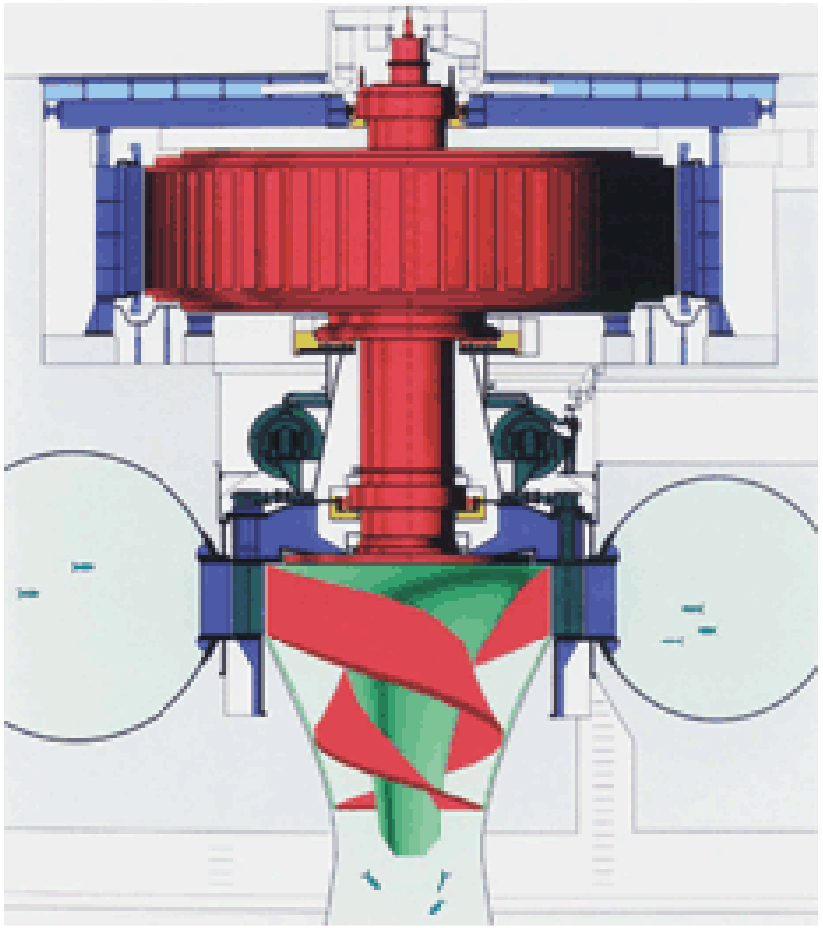
Boyle, *Renewable Energy,* 2nd edition, Oxford University Press, 2003

Turbine Design Recommendations

	Head Pressure		
	High	**Medium**	**Low**
Impulse	Pelton Turgo Multi-jet Pelton	Crossflow Turgo Multi-jet Pelton	Crossflow
Reaction		Francis Pump-as-Turbine	Propeller Kaplan

Boyle, *Renewable Energy,* 2nd edition, Oxford University Press, 2003

Fish Friendly Turbine Design



www.eere.energy.gov/windandhydro/hydro_rd.html