



Hidrodinamikai  
Rendszerek  
Tanszék



# Megújuló energiaforrások *Vízerő hasznosítás*

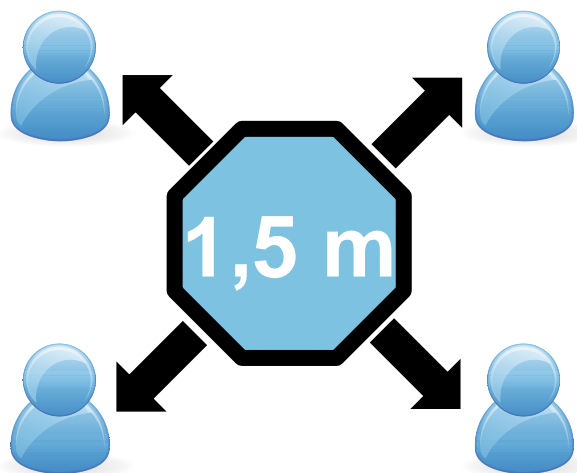
Tematikát kidolgozta:  
Dr. Kullmann László

2020. ŐSZ

Előadó:  
Dr. Csizmadia Péter – [pcsizmadia@hds.bme.hu](mailto:pcsizmadia@hds.bme.hu)  
[www.hds.bme.hu](http://www.hds.bme.hu)



**FIGYELEM!**



**TARTSON  
TÁVOLSÁGOT!**

**FIGYELEM!**



**VISELJEN  
MASZKOT!**



# Áttekintés

- Bevezetés
- Folyók leírása: nyílt felszínű áramlás
- Vízerőművek (példák)
- Turbina típusok
- Magyarország vízerőhelyzete
- Gyakorlati problémák, szabályzás
- Törpe vízerőművek, szivattyú energia tározó (SZET), további megoldások
- Környezeti hatások, szempontok



# 1. előadás



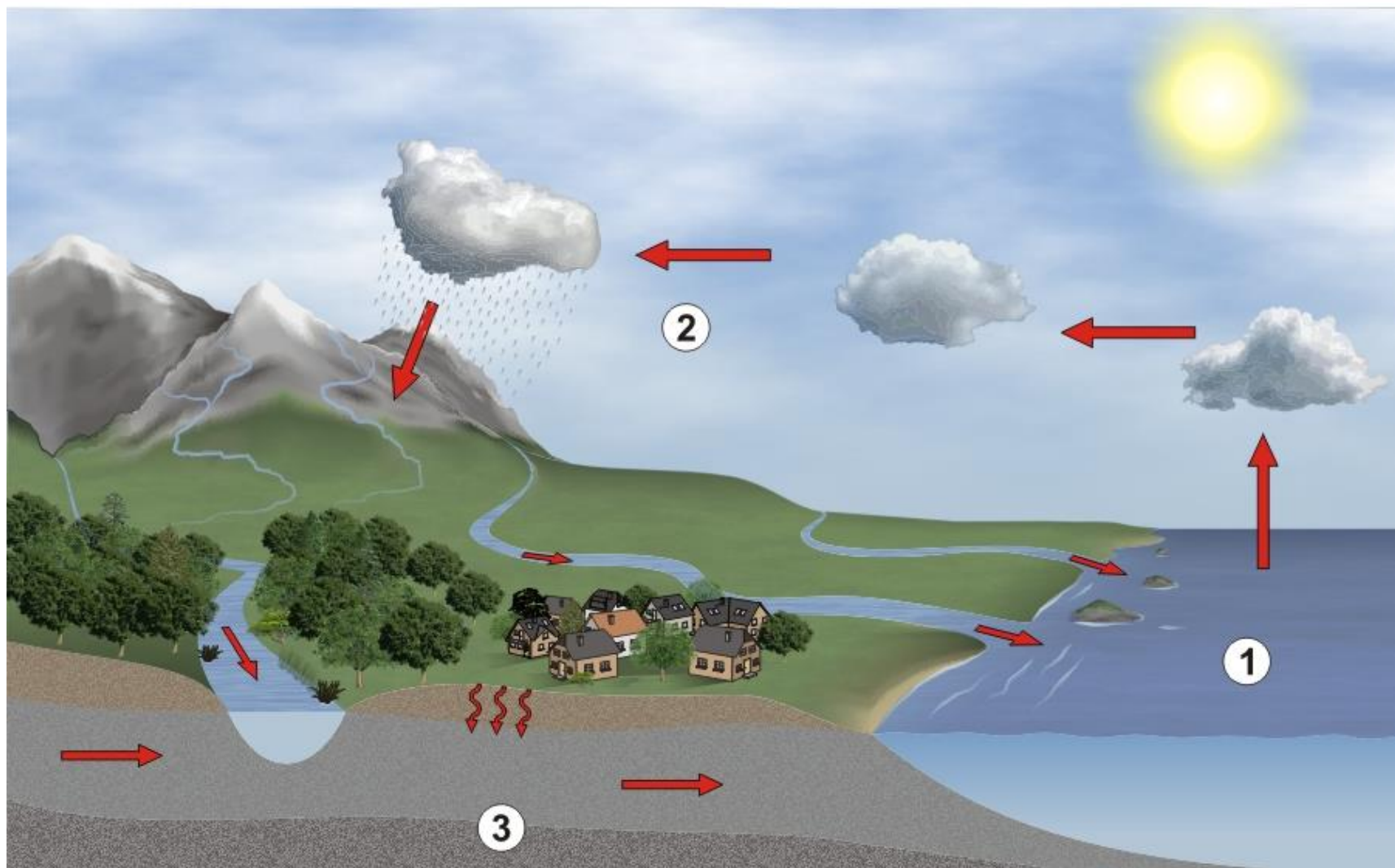


## Vízerő hasznosítás

- A vízben rejlő potenciális (helyzeti) energia hasznosítása
- A víz potenciális energiáját a nap adja
- A vizet felhasználja, de nem használja el, illetve a minőségét nem rontja
- Vízerőművek: a víz potenciális energiáját villamos energiává alakítják át

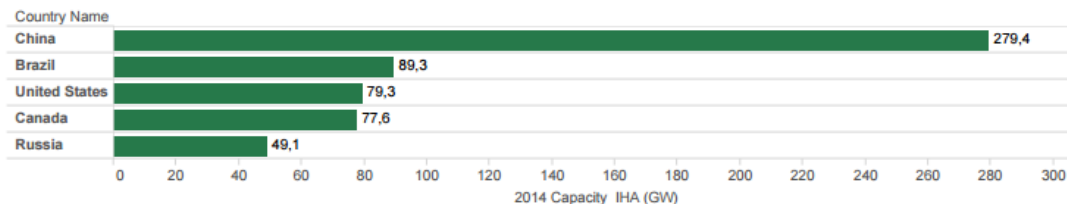
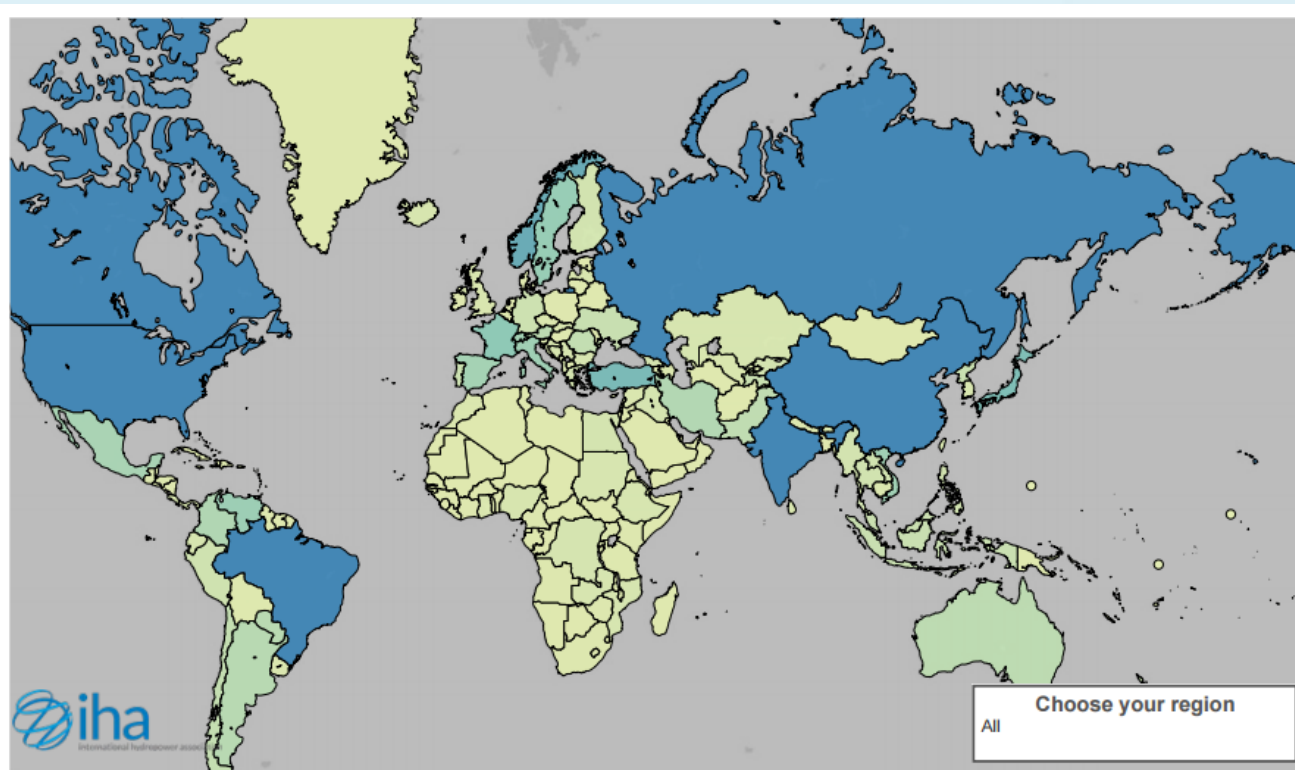


# Bevezetés





# Bevezetés



**1 036 GW**  
Total Installed Capacity\*

**142,1 GW**  
Pumped Storage Capacity

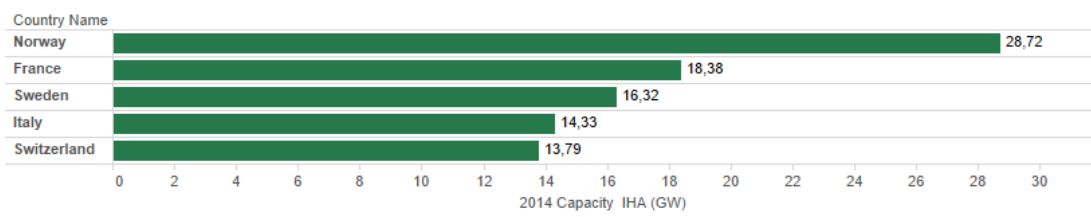
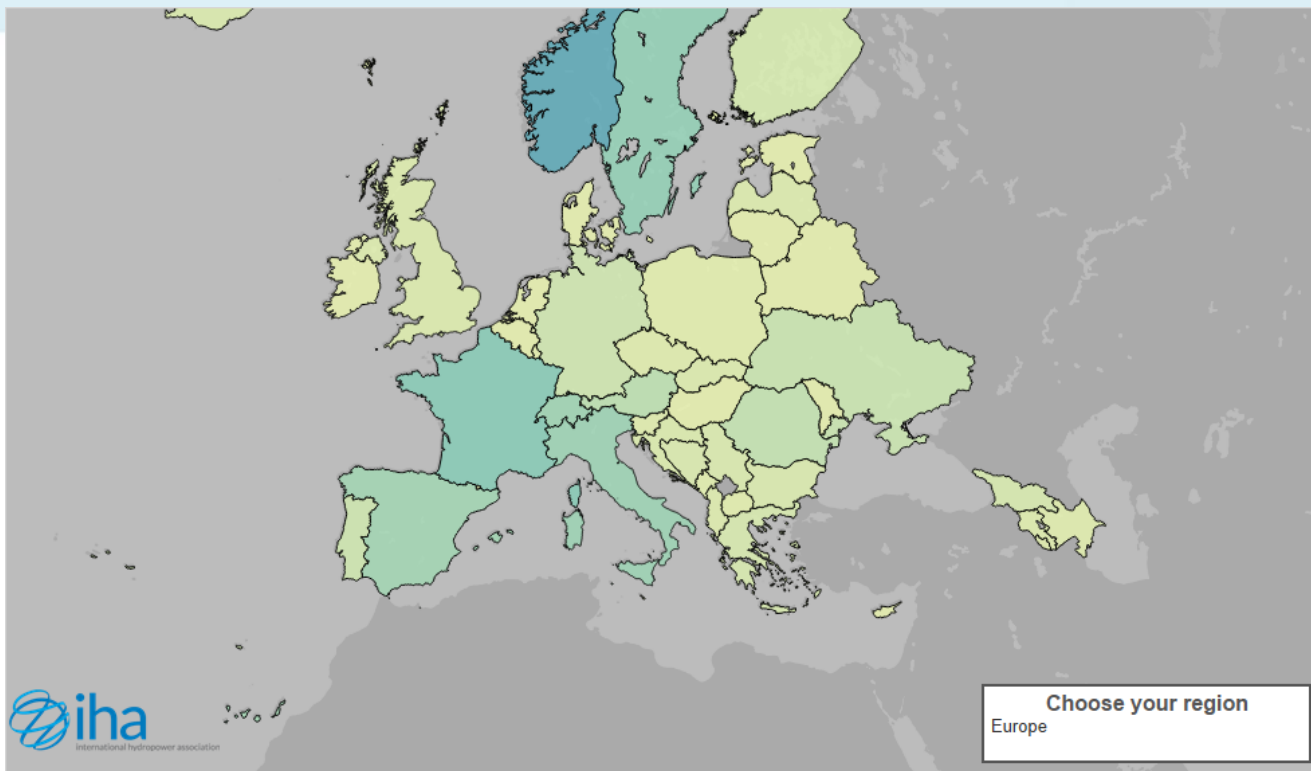
Installed hydropower capacity in gigawatts (GW) in 2014. For more information please visit [www.hydropower.org](http://www.hydropower.org)

\*not including pumped storage

Forrás: [hydropower.org](http://hydropower.org)



# Bevezetés



**166,2 GW**  
Total Installed Capacity\*

**50,9 GW**  
Pumped Storage Capacity

Installed hydropower capacity in gigawatts (GW) in 2014. For more information please visit [www.hydropower.org](http://www.hydropower.org)

\* not including pumped storage

Forrás: [hydropower.org](http://hydropower.org)



# Bevezetés

FIGURE 7: EU POWER MIX 2000 (MW)

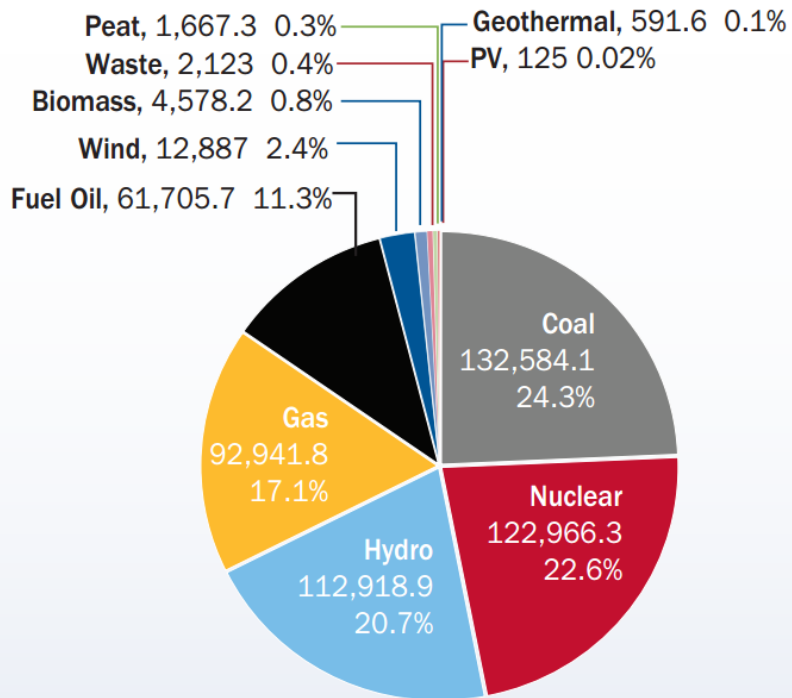
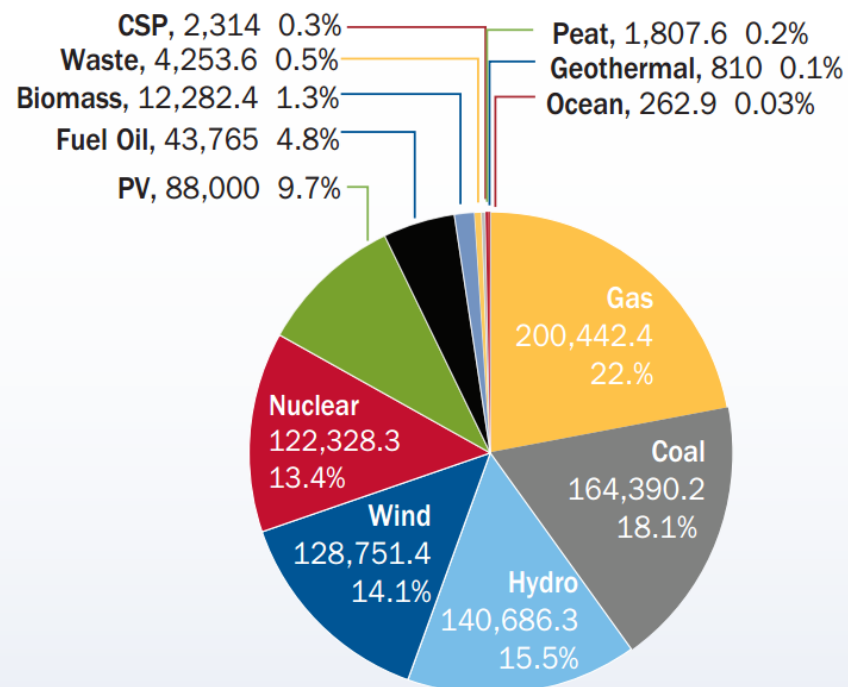


FIGURE 8: EU POWER MIX 2014 (MW)

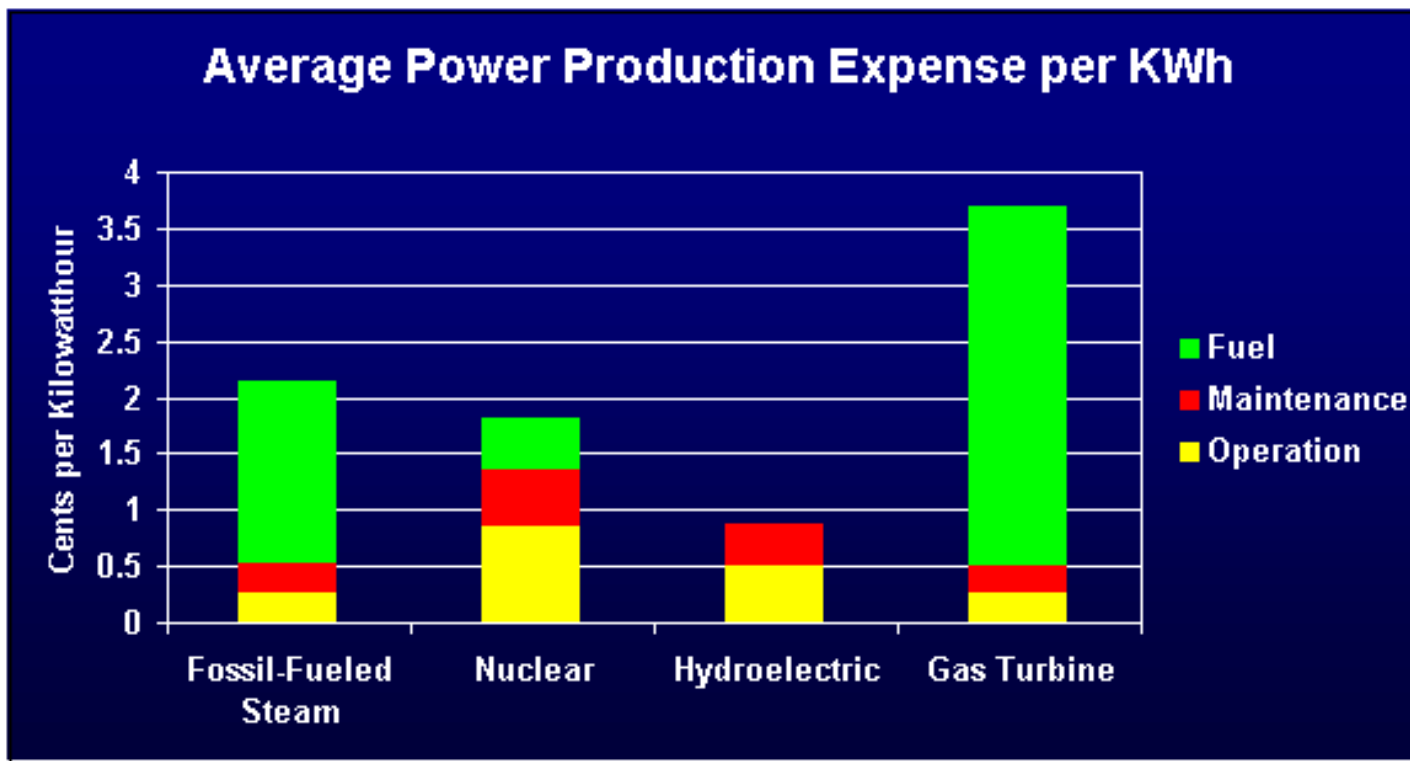


Forrás: Wind in power 2014 European statistics



# Bevezetés

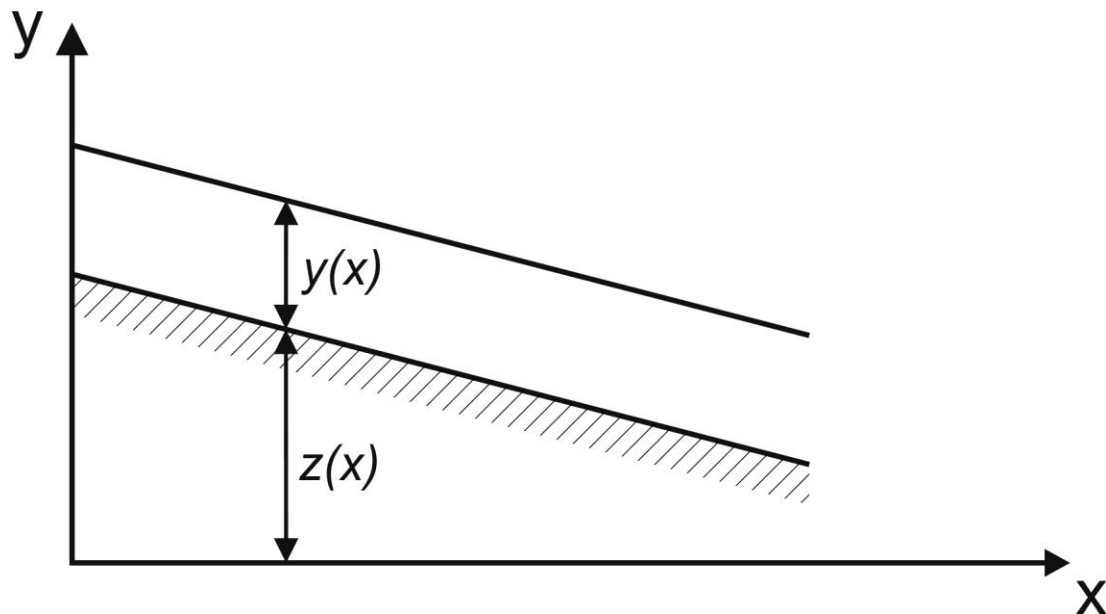
## Energiaátalakítási költségek



*Forrás: WVIC*



# A folyó jellemzése: nyíltfelszínű csatorna



$y(\mathbf{x})$ : vízmélység

$z(\mathbf{x})$ : folyómeder  
geodetikus magassága

$x$ : folyó hosszmenti  
koordinátája

**Folyómeder esése:**

$$i = -\frac{dz}{dx} = \left| \frac{dz}{dx} \right|$$

$y(x)$ , a vízfelszín egyenlete

*Fontos:* a vízfelszín nem  
feltétlenül párhuzamos a mederrel!



# Leíró egyenletek

**Bernoulli egyenlet:** 
$$y + z + \frac{v^2}{2g} + h' = const.$$

Egyszerűsítések: 
$$\frac{d}{dx} \left( y + z + \frac{v^2}{2g} + h' \right) = 0$$

$$\frac{dz}{dx} = -i$$

$$\frac{dh'}{dx} = \frac{v^2}{C^2 R_h} = \frac{Q^2}{A^2 C^2 R_h}$$

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{v^2}{2g} \right) = - \frac{Q^2 B}{g \cdot A^3} \frac{dy}{dx}$$

ahol:  $C = \frac{R_h^{1/6}}{n}$  Chézy-képlet

$$R_h = \frac{A}{K}$$
 Hidraulikai sugár

**Q:** vízhozam (azaz térfogatáram)

**A:** keresztmetszet

**B:** csatorna szélessége

**K:** nedvesített kerület

**n:** Manning:állandó [s/m<sup>1/3</sup>]

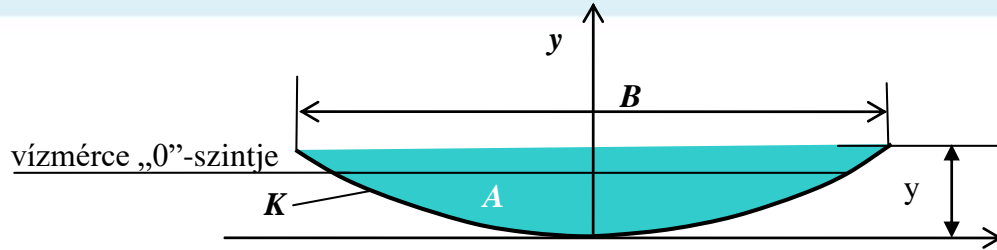
$n \approx 0,015$  beton esetén

$n \approx 0,04$  agyagpados, hordalékos meder esetén





# Leíró egyenletek



$$R_h = \frac{A}{K}$$

(jegesedés problémája!)

Kapott egyenlet:

$$\frac{dy}{dx} - i - \frac{Q^2 B}{g \cdot A^3} \frac{dy}{dx} + \frac{Q^2}{A^2 C^2 R_h} = 0$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{i - \frac{Q^2}{A^2 C^2 R_h}}{1 - \frac{Q^2 B}{g \cdot A^3}} = \frac{i - J(Q, y, n)}{1 - Fr^2}$$

**J:** mederellenállás

**Fr:** Froude-szám

Folyók esetén  $Fr < 1$

Vízmélység állandó, ha:

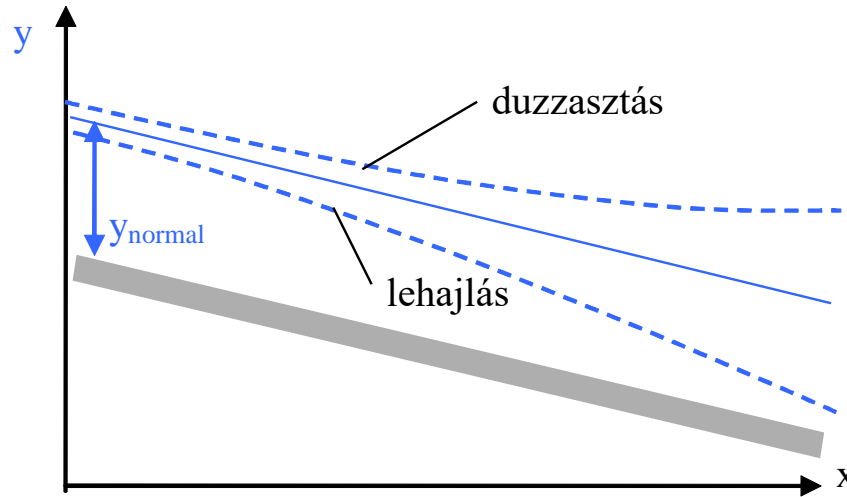
$$\frac{dy}{dx} = 0 \iff i = J$$

**Normál vízmélység**

$$Fr = \frac{v}{a} = \frac{v}{\sqrt{g \cdot y}}$$



# Vízfelszín profilok



Vízerő szempontjából hasznos:

$$\frac{dy}{dx} > 0 \quad \Leftrightarrow \quad i > J$$

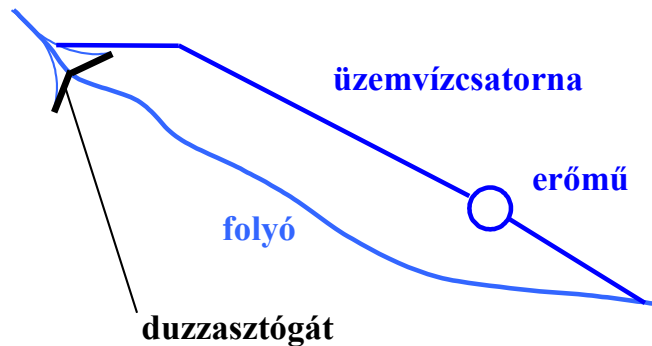
Ebben az esetben nőni fog a magasságkülönbség, azaz az **esés**.



# Az esés növelése

Cél: a mederellenállás ( $J$ ) csökkentése  $\rightarrow$  hasznosítható energia kialakítása

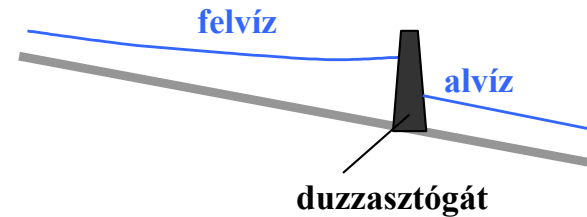
## Üzemvízcsatorna



*Példa: Bős-Gabčíkovi erőmű*

- A meder minőségének javításával csökkentjük az érdességet, az ellenállást

## Duzzasztás



*Példa: Tiszalöki erőmű*

- A nagyobb mélység kisebb sebességet eredményez, így kisebb az ellenállás, kisebb a veszteség



# Vízenergia potenciál

## Csapadék potenciál (helyzeti energia, éves szinten):

- Amikor a víz eléri a felszínt

$$E_{Cs,i} = \rho \cdot g \cdot A_i \cdot Cs_i \cdot z_i \quad [\text{energia/idő}]$$

ahol:

$A_i$ : felület

$Cs_i$ : éves csapadékmennyiség

$z_i$ : geodetikus magasság

## Lefolyási potenciál:

- A párolgás miatt kisebb az előzőnél

$$E_{Q,i} = \alpha \cdot E_{Cs,i}$$

ahol:

$\alpha$ : lefolyási tényező ( $\sim 0,2$ )

( $0,01 \leq \alpha \leq 0,5$ )

## Hasznosítható teljesítmény:

$$P_{be,h} [kW] = (\rho \cdot Q \cdot g \cdot H =) 9,81 \cdot Q \left[ \frac{m^3}{s} \right] \cdot H [m]$$

## Megtermelhető teljesítmény:

- Turbina, generátor hatásfoka

$$P_{hasznos,vill} [kW] \cong 8 \cdot Q \left[ \frac{m^3}{s} \right] \cdot H [m]$$

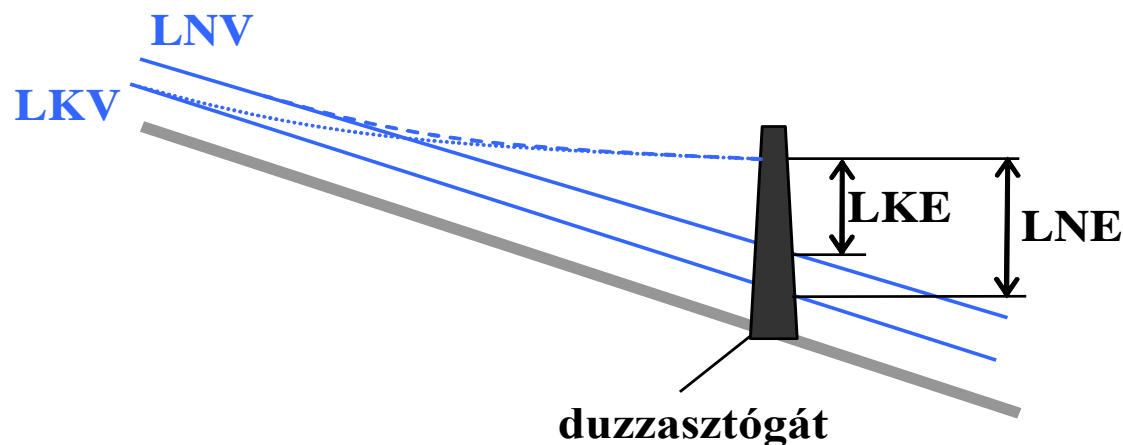
ahol:

$Q [m^3/s]$ : vízhozam

$H [m]$ : esés



# Vízhozamok, esések



**LNE:** legnagyobb esés

**LKE:** legkisebb esés

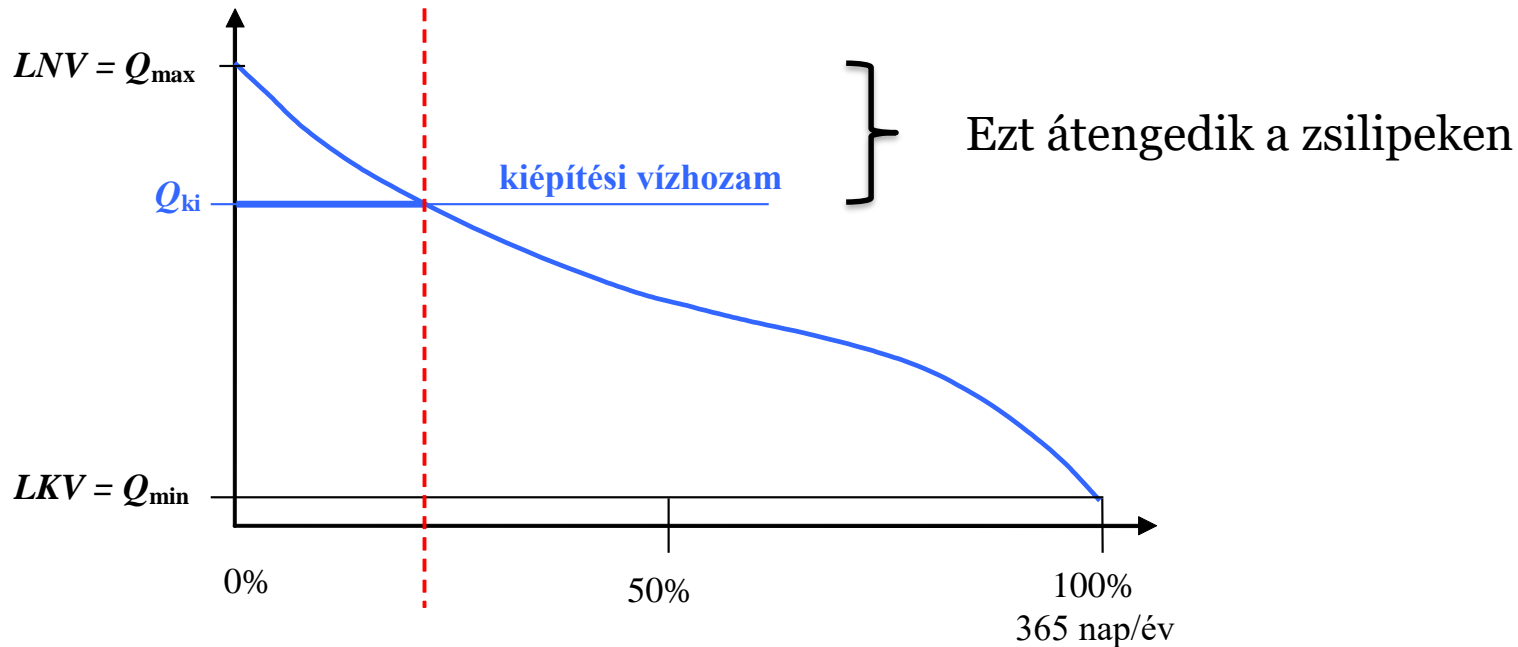
**LNV:** legnagyobb vízhozam

**LKV:** legkisebb vízhozam

- A legkisebb vízhozam (LKV) esetén kapjuk a legnagyobb esést (LNE)
- A legnagyobb vízhozamhoz (LNV) adódik a legkisebb esés (LKE)



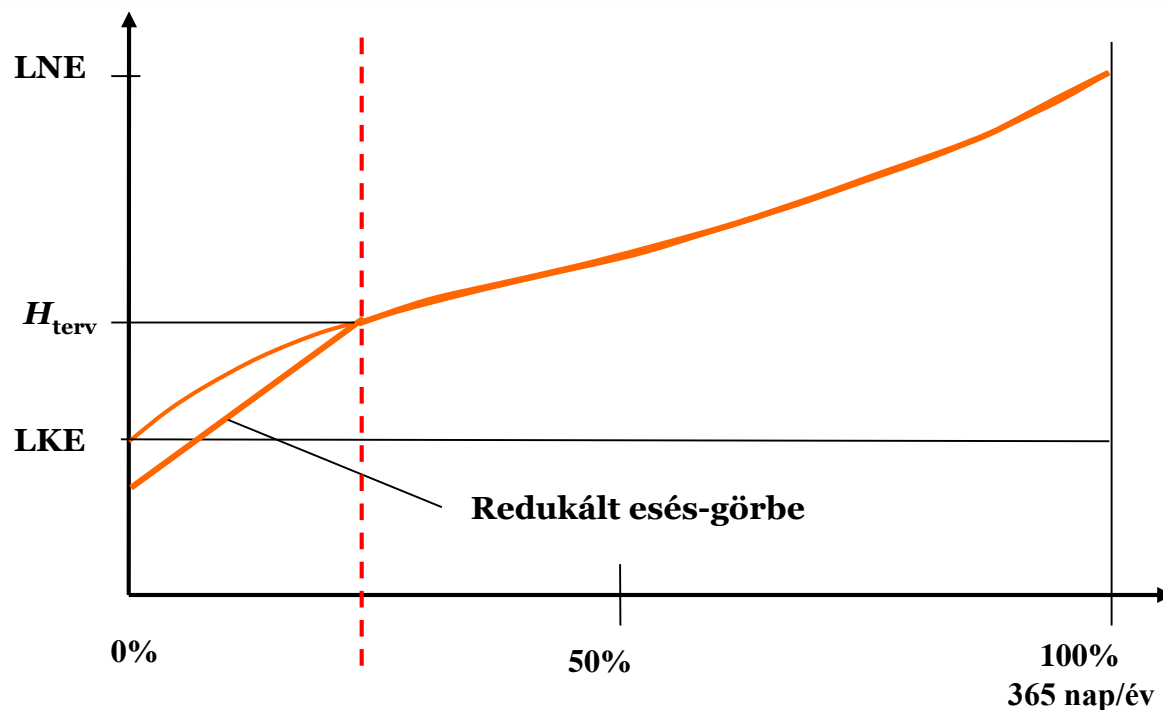
# Vízhozam tartóssági görbe (Q)



- Megadja, hogy az év hány százalékban áll rendelkezésre az adott vízhozam (*mennyire tartós az adott vízhozam*)
- Természeti adottság, a folyót jellemzi.



# Eséstartóssági görbe (H)

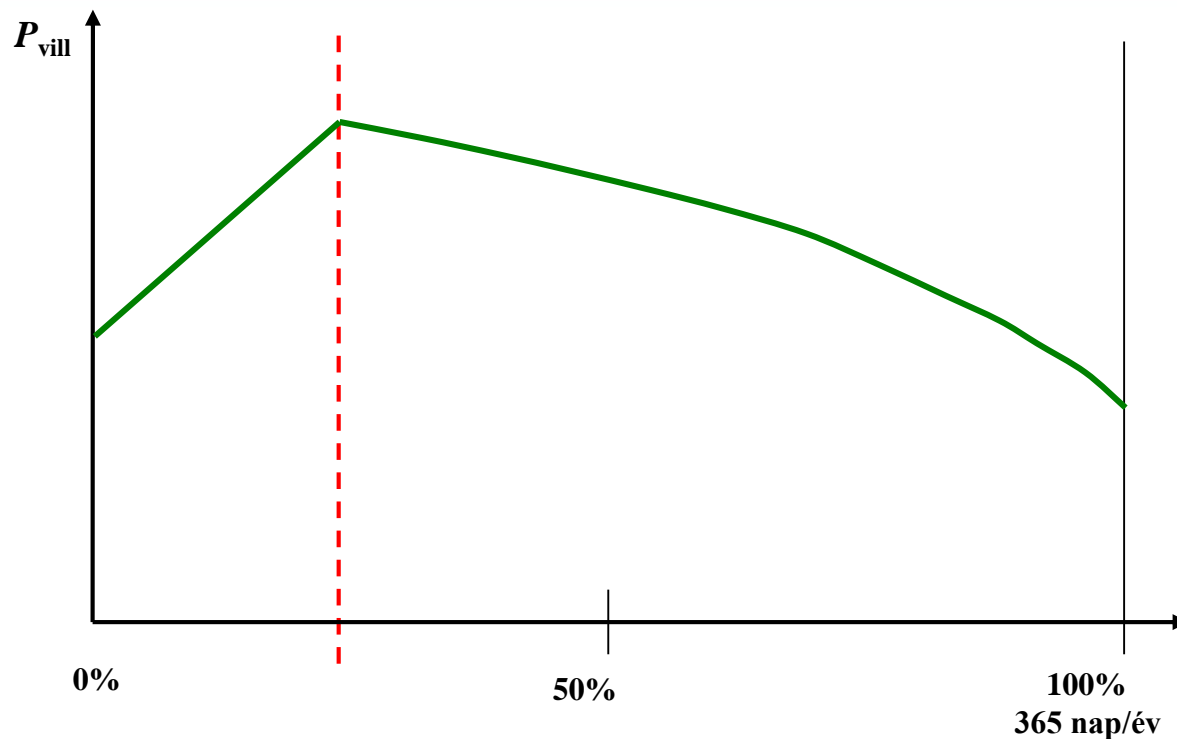


- A kiépítési vízhozamhoz ( $Q_{ki}$ ) tartozik a tervezési esés ( $H_{terv}$ )
- A tervezési esés alatt a turbinák nem dolgoznak optimális üzemállapotban (így a hidraulikai veszteségük nő).

$$\text{redukált esés-görbe: } H_t = 1,5 H - 0,5 H_{terv}$$



# Teljesítménytartóssági görbe

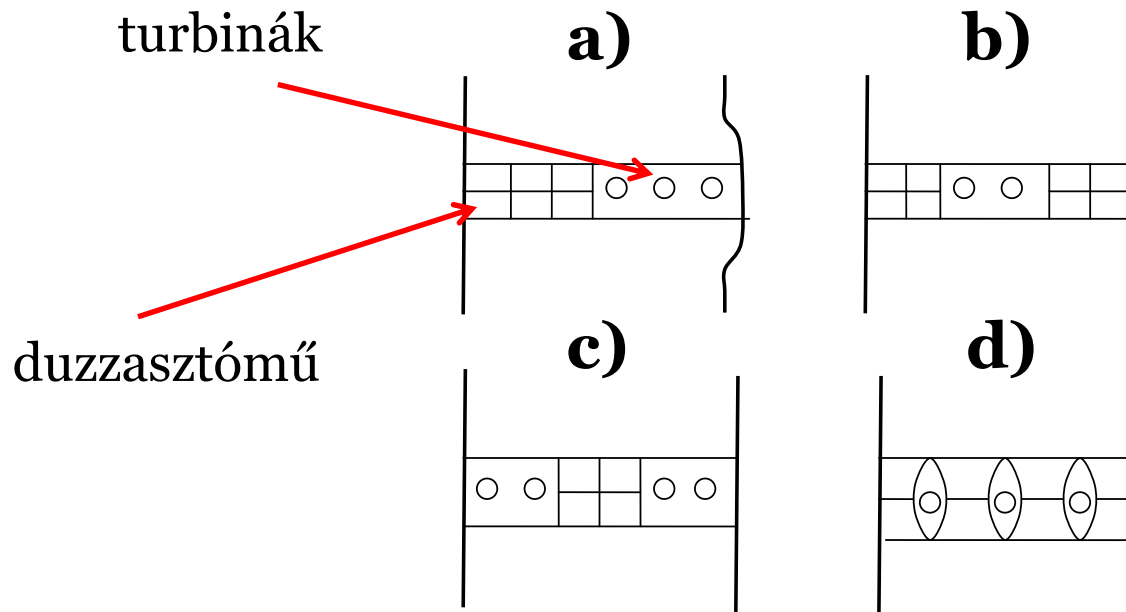


- A vízhozam- és az eséstartóssági görbék szorzata
- Integrálja a teljes évre megtermelhető villamos energiát adja
- Függ a duzzasztási szinttől és a kiépítési vízhozamtól (*optimum keresés*)





# Vízerőművek főbb típusai



- a) öblözetbe épített
- b) szigetszerű
- c) megosztott
- d) pillérbe épített



# Turbinák csoportosítása

## Reakciós turbinák

- Nyomáskereső a turbinalapátokon
- A járókerék teljes egészében vízbe merül
- Felhajtó erő kihasználása
- Kaplan, Francis turbinák

## Akciós turbinák

- A belépő vízszög impulzusát használják fel, megváltozik az áramlási irány
- Nincs nyomáskereső a járókeréken
- Pelton turbina, (Bánki turbina)



# Turbina típusok

Pelton turbina

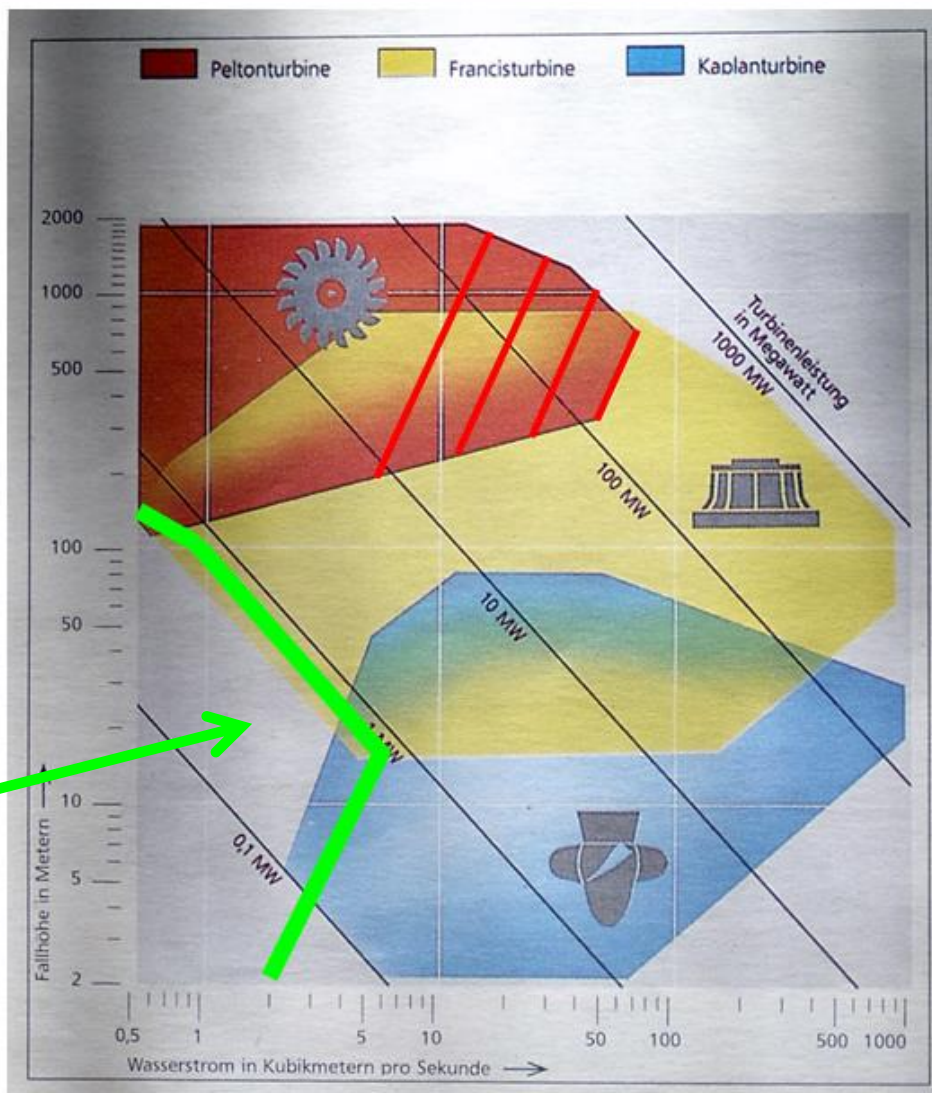
Francis turbina

Kaplan turbina





# Turbina típusok

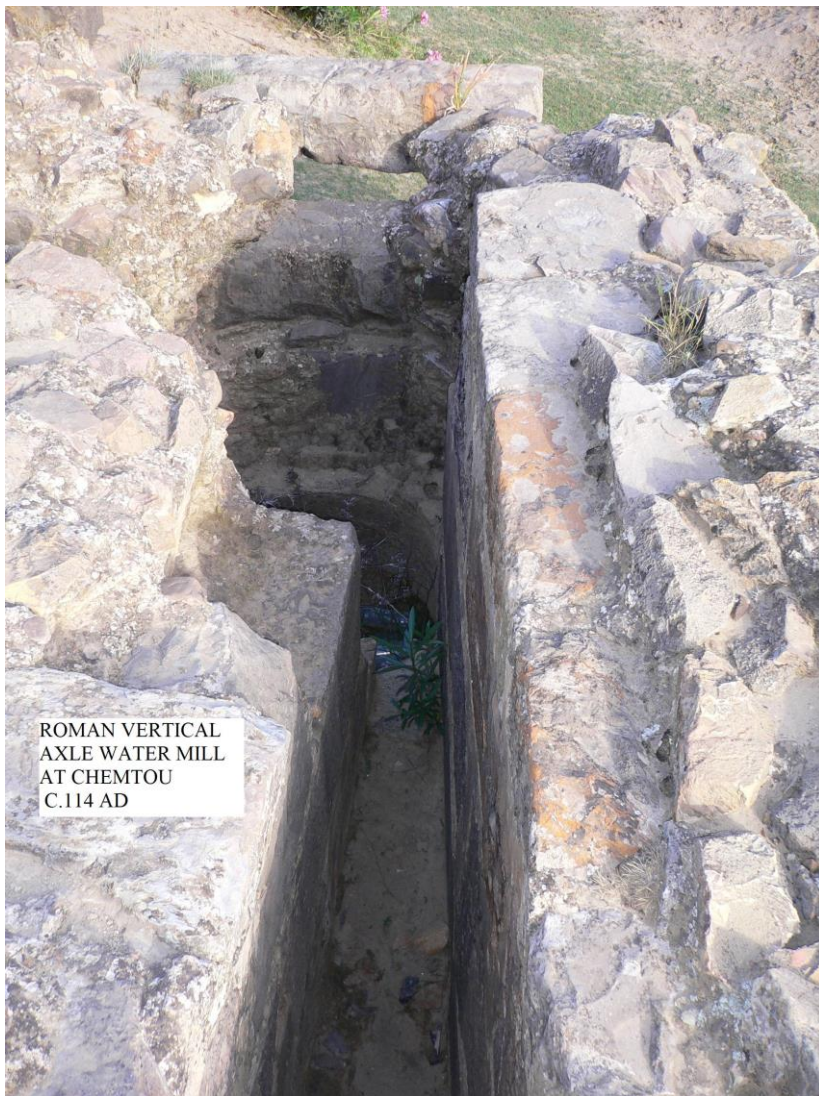


Bánki  
turbina





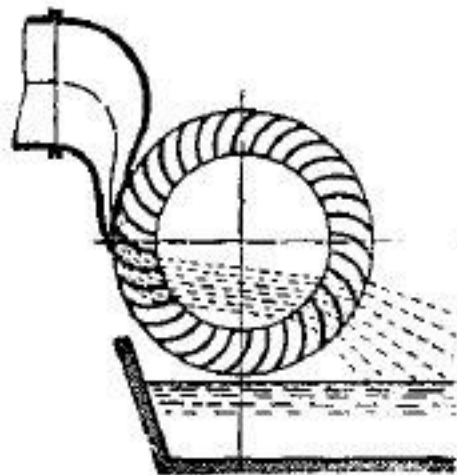
# Történelem



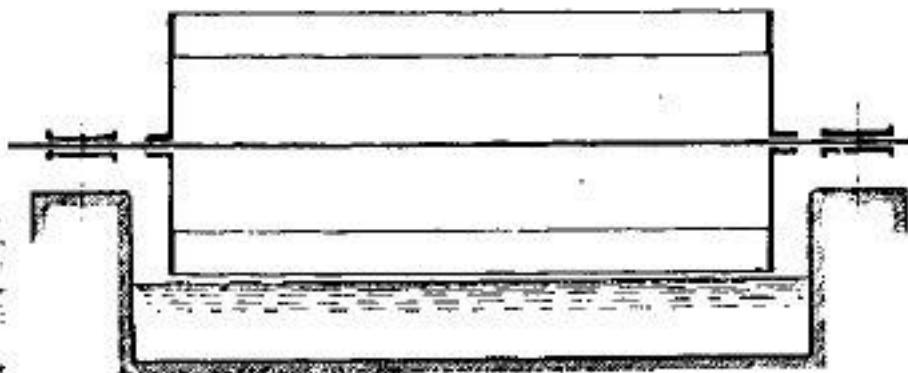
Római kori függőleges tengelyű vízkerék  
(*Kr. u. 114*)



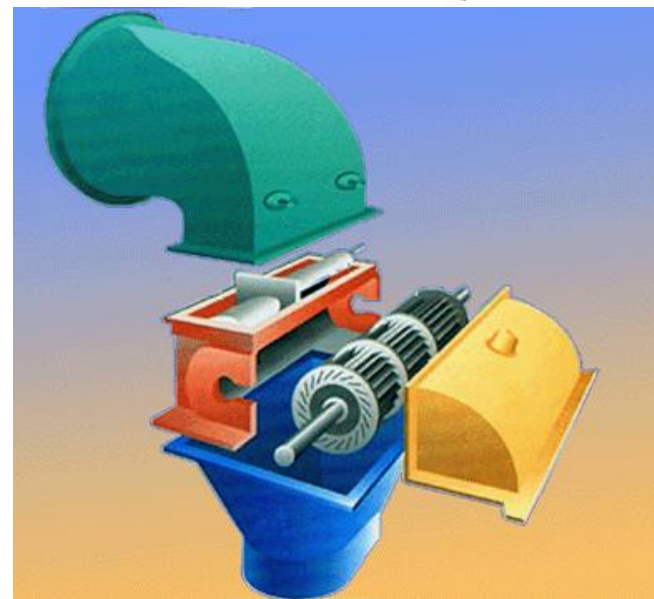
# Bánki turbina



1a ábra. A turbina keresztmetszete

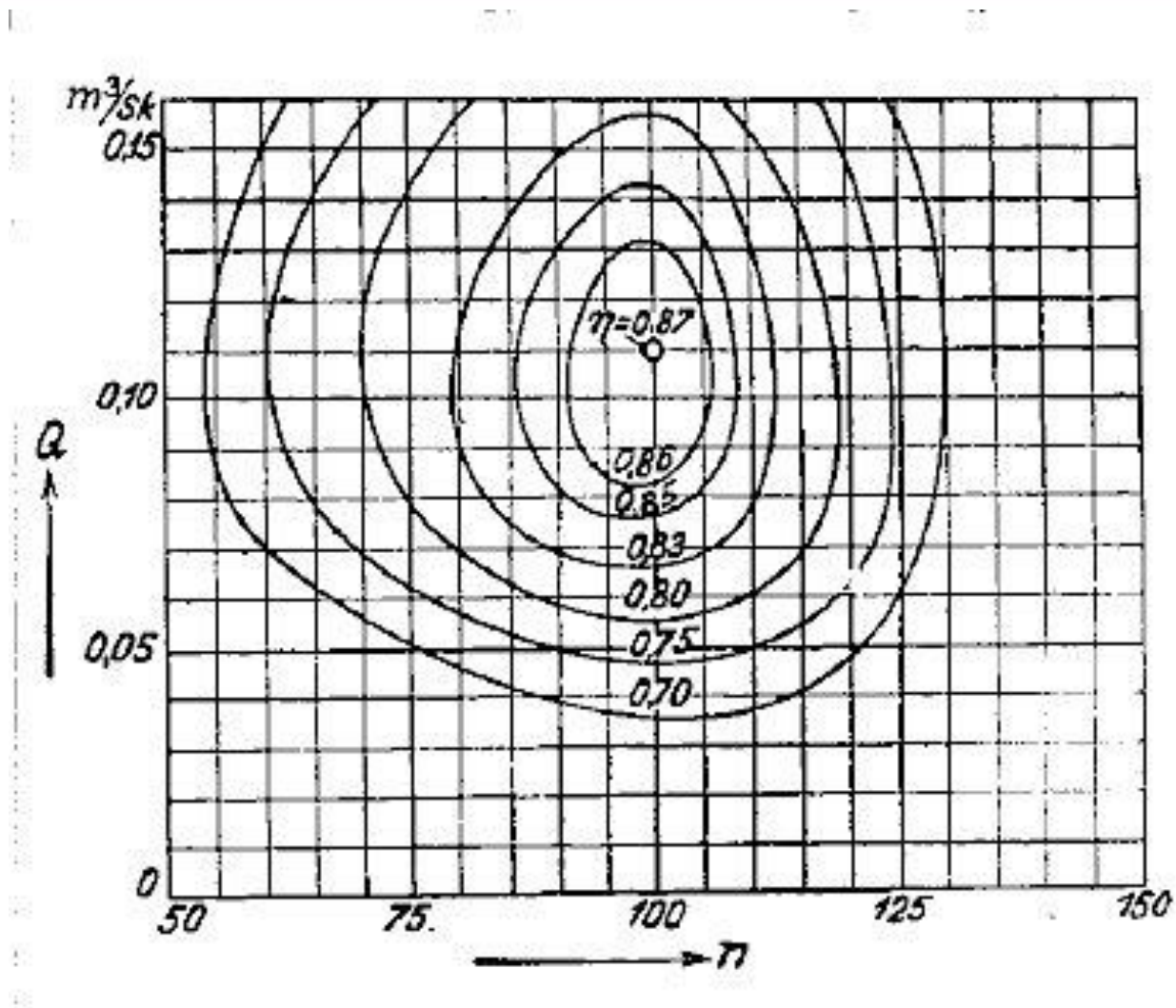


1b ábra. A turbina meridiánmetszete.





# Bánki turbina

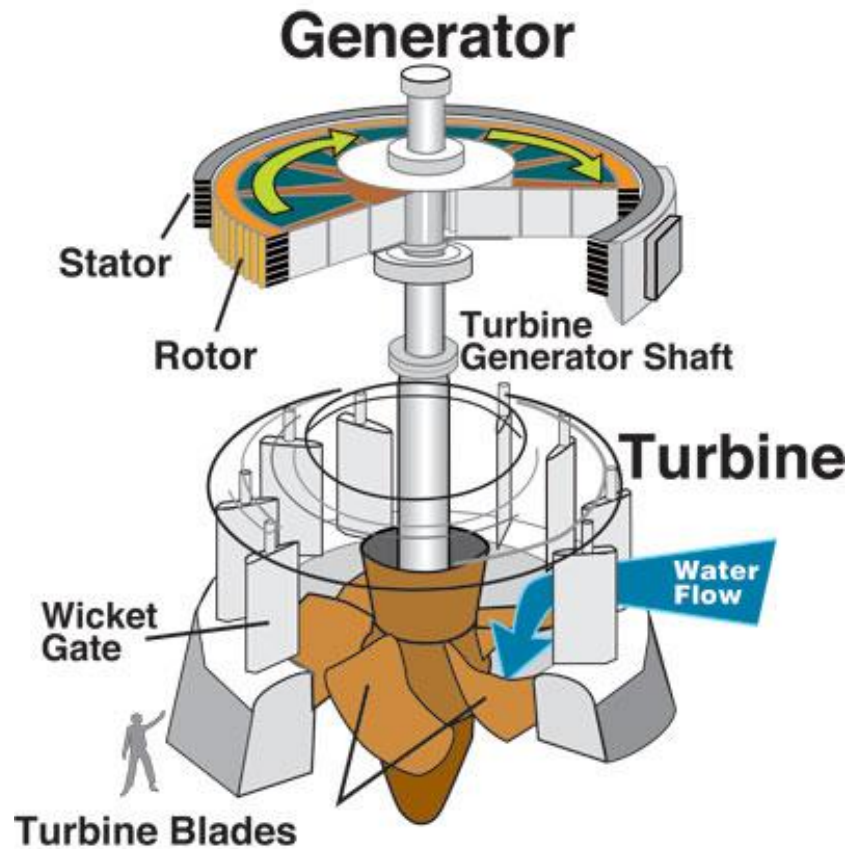






# Kaplan turbina

## Működési elv

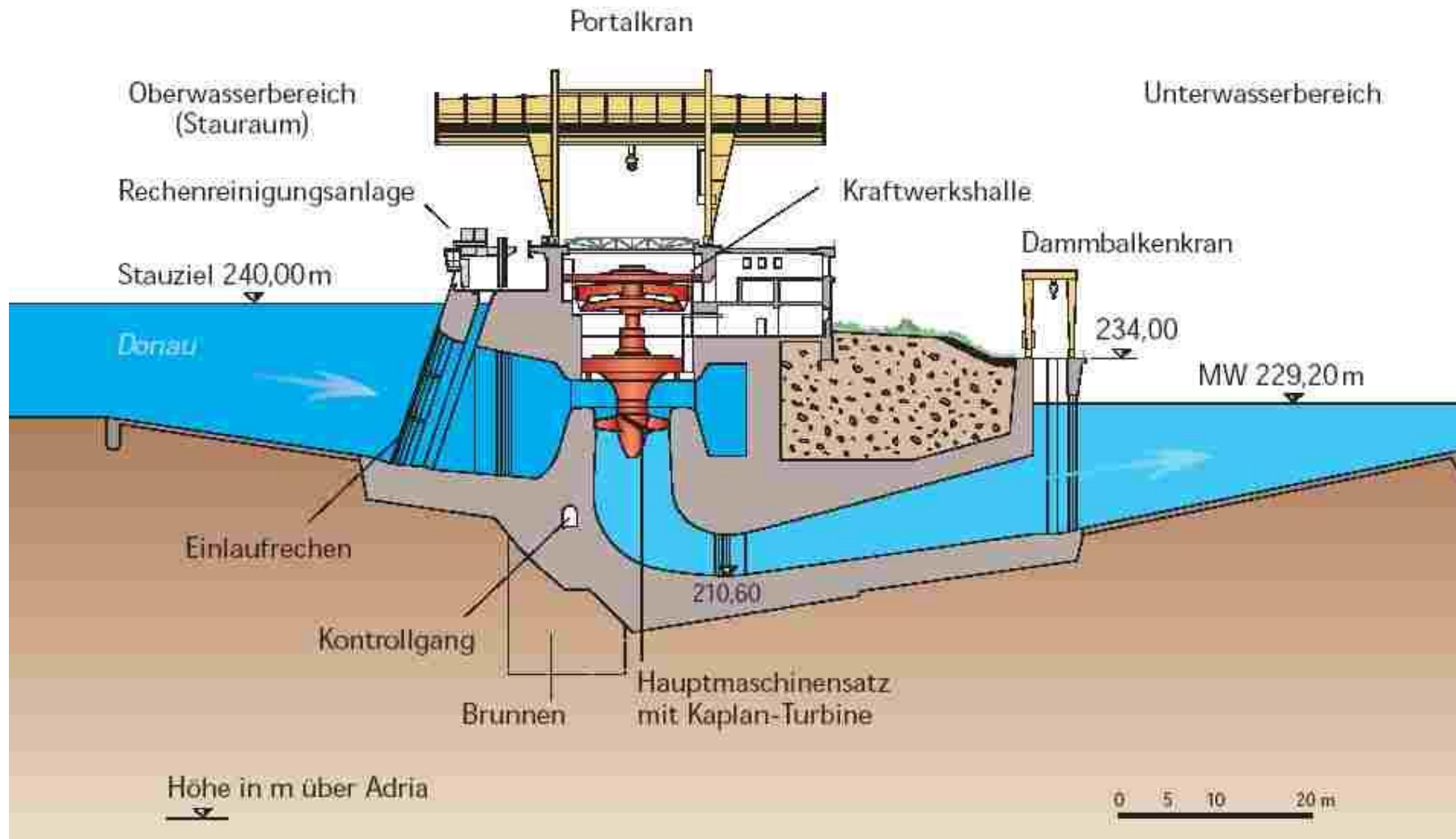


*Forrás: Wikipedia*



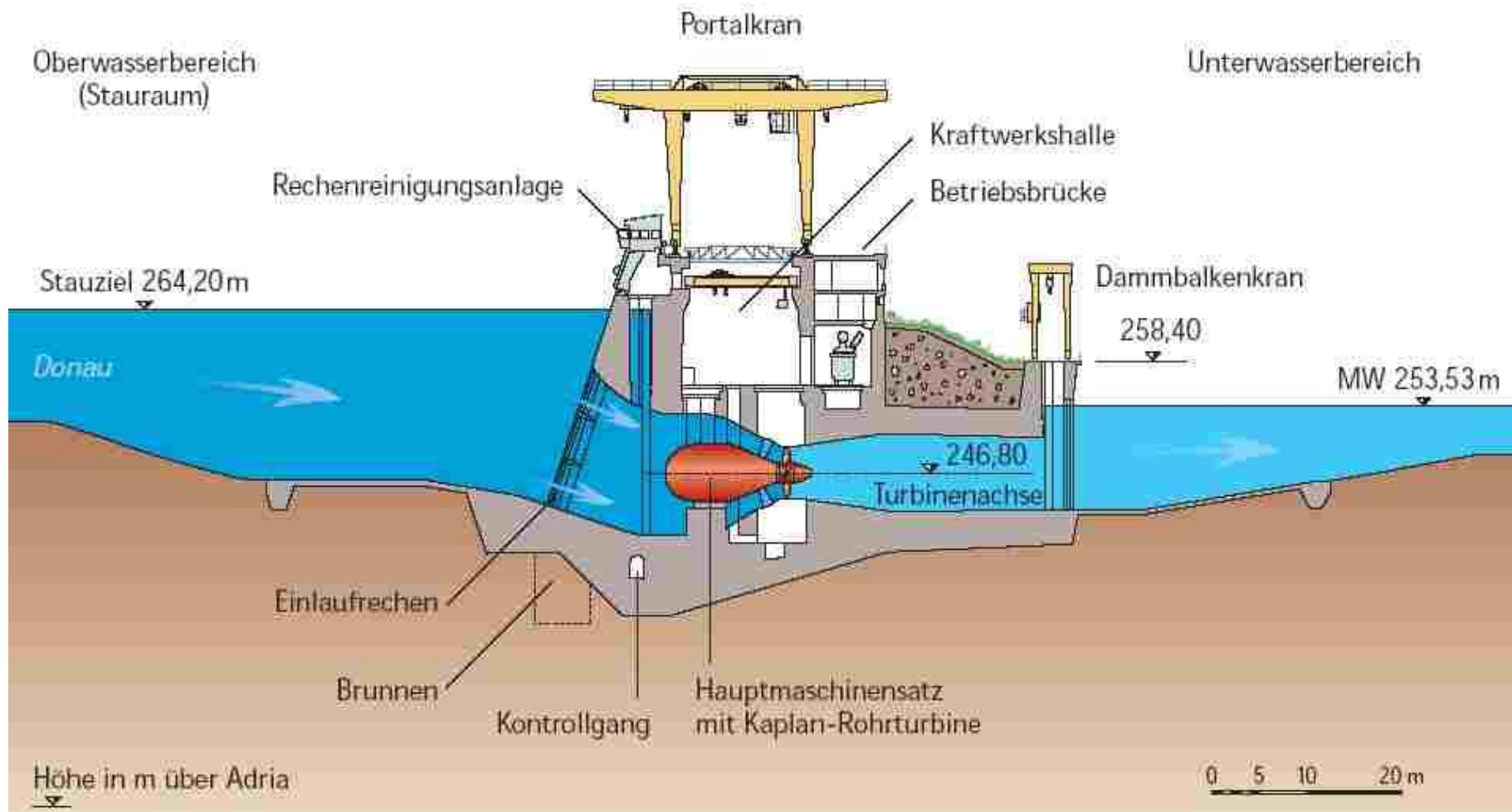


# Kaplan turbina (függőleges)





# Kaplan turbina (csőturbina)





# Kaplan turbina

- Reakciós turbina, max. teljesítmény:  $\sim 150 \text{ MW}$
- Fordulatszám:  $n = 80 - 430 \text{ 1/min}$
- Függőleges beépítésnél nagy helyigény,  $90^\circ$  -os iránytörés
- Vízszintes beépítés: csőturbina (jobb hatásfok, de nehezebb szerelhetőség)
- Állítható járókerék- és vezetőlapátok (Kaplan)
  - Propeller turbina: csak a vezetőlapátok állíthatók
  - Thomann-turbina: csak a járókerék lapátok állíthatók



# Kaplan turbina





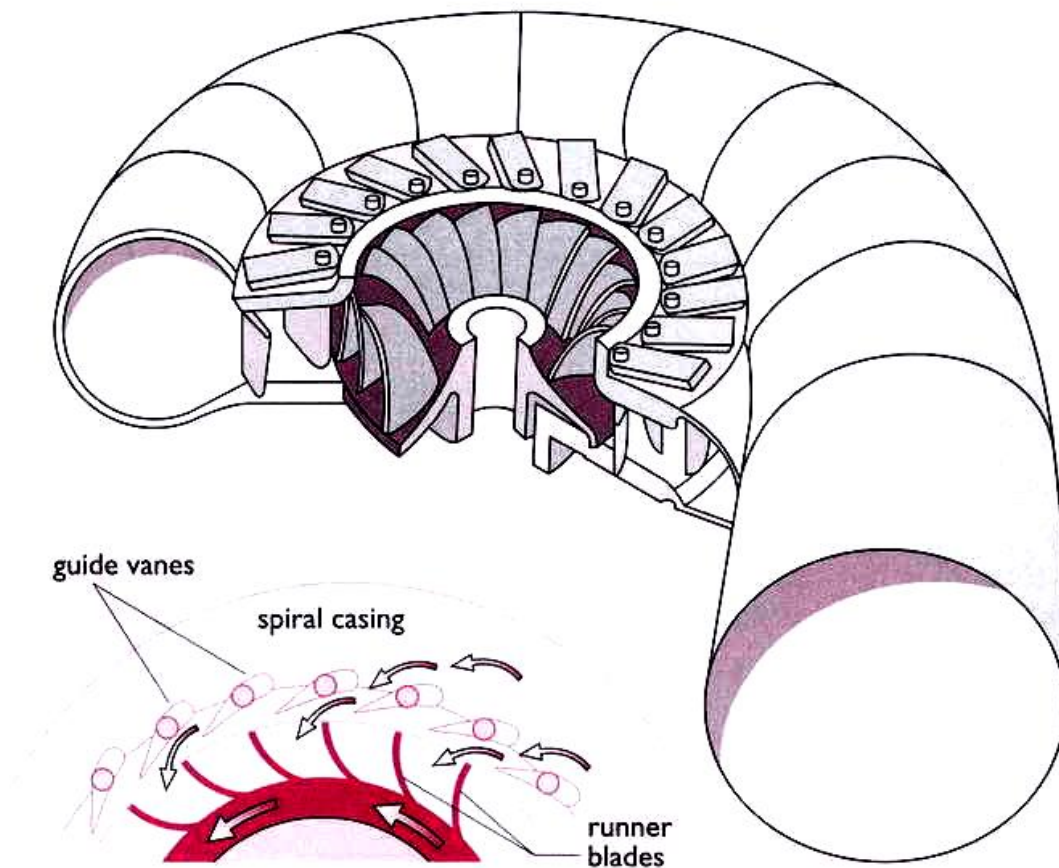


# Kaplan turbina





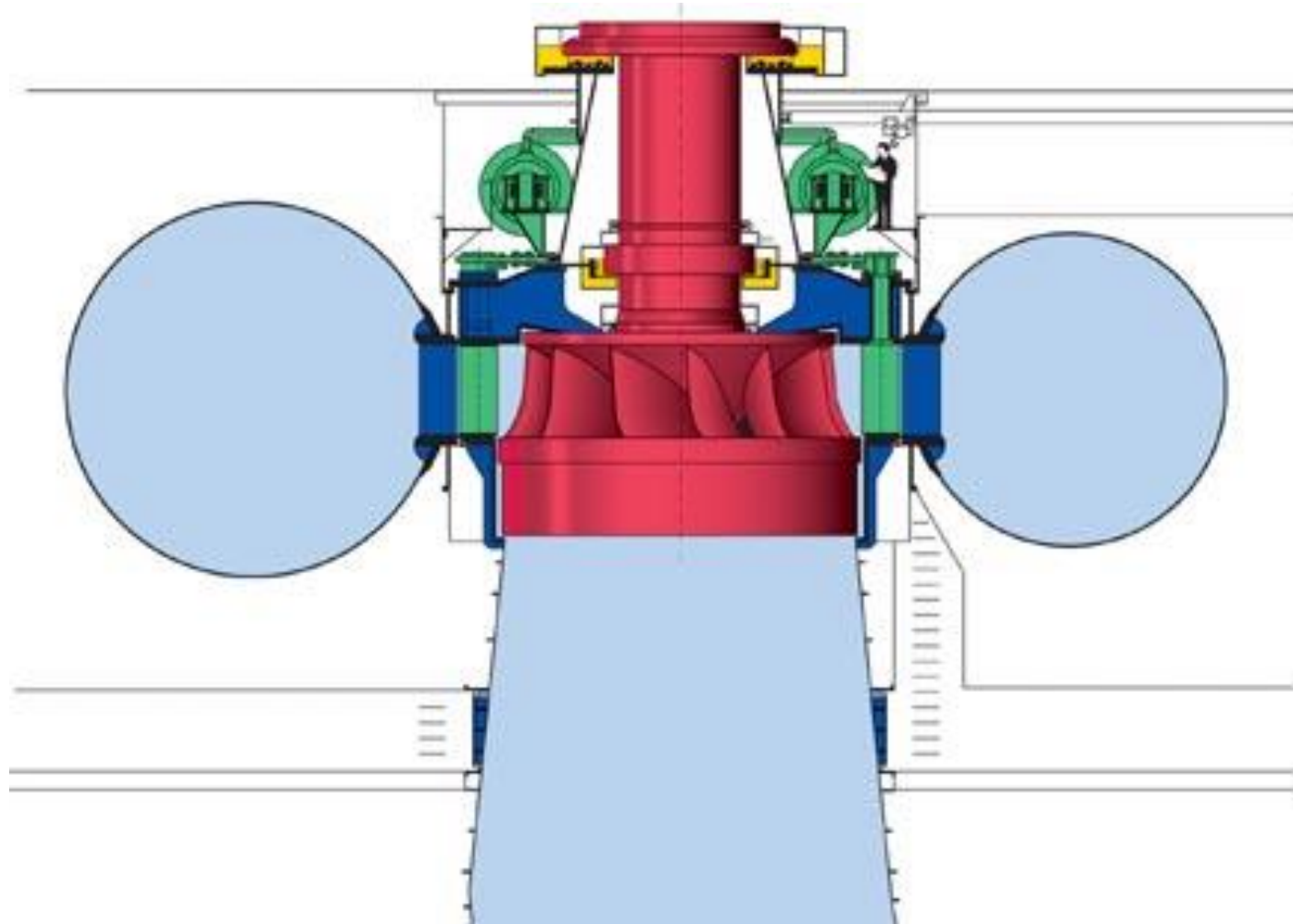
# Francis turbina



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



# Francis turbina





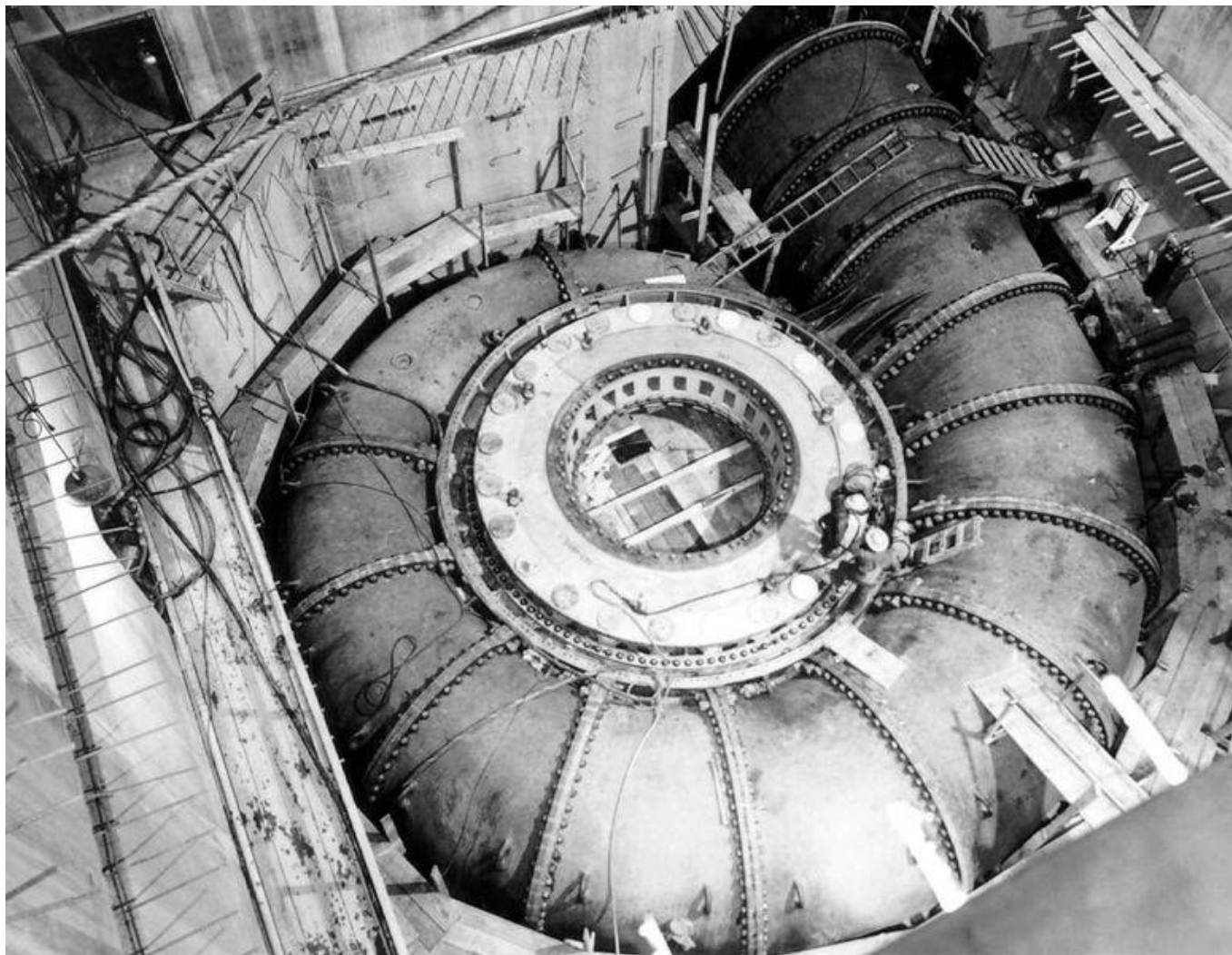
# Francis turbina

- Reakciós turbina, teljesítmény:  $50-750 \text{ MW}$
- Fordulatszám:  $n = 60 - 450 \text{ 1/min}$ 
  - *Lassú járású:*  $60 - 125 \text{ 1/min}$
  - *Normál járású:*  $125 - 225 \text{ 1/min}$
  - *Gyors járású:*  $225 - 450 \text{ 1/min}$
- Általában vezetőlapátokat alkalmaznak
- Közepes esés, közepes vízhozam





# Francis turbina





# Francis turbina







# Francis turbina



Maximális térfogatáram ( $Q_{\max}$ )



Minimális térfogatáram ( $Q_{\min}$ )

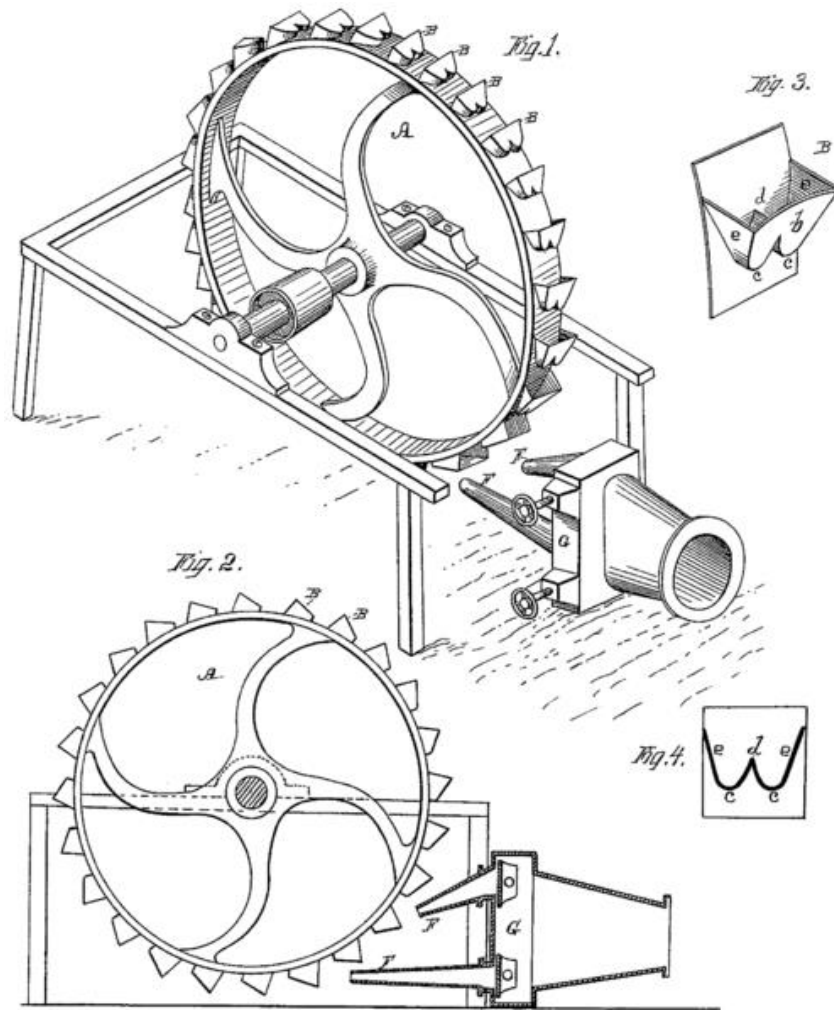


# Francis turbina



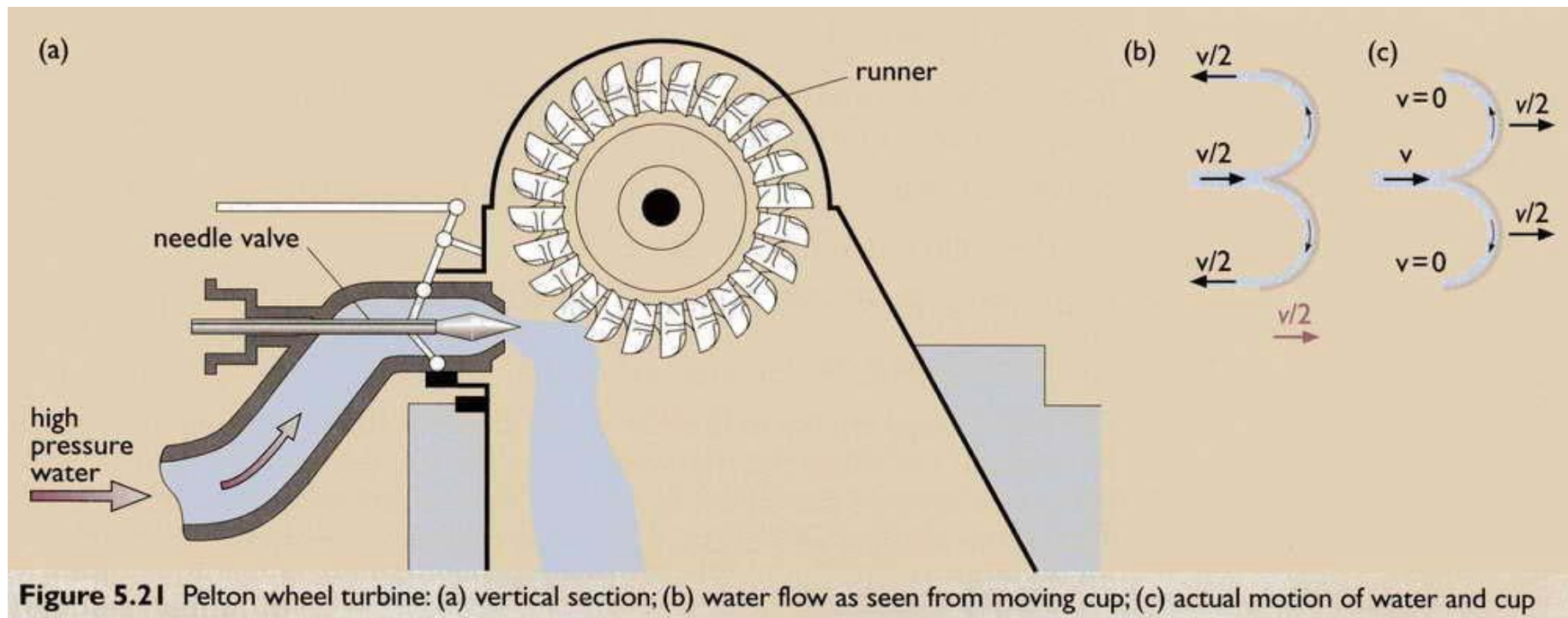


# Pelton turbina



Pelton eredeti szabadalma  
(1880)

## Működési elv

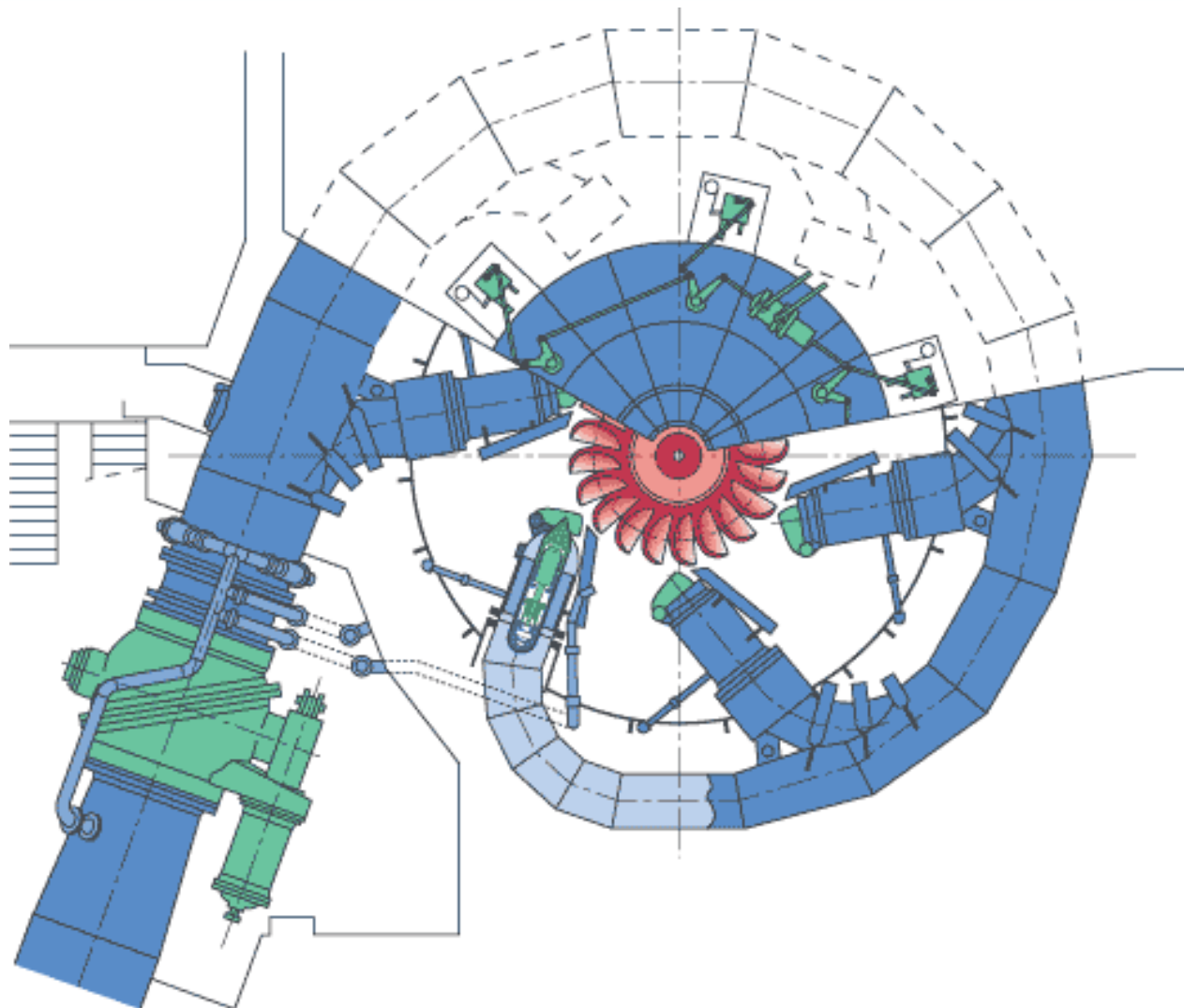


**Figure 5.21** Pelton wheel turbine: (a) vertical section; (b) water flow as seen from moving cup; (c) actual motion of water and cup

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



# Pelton turbina





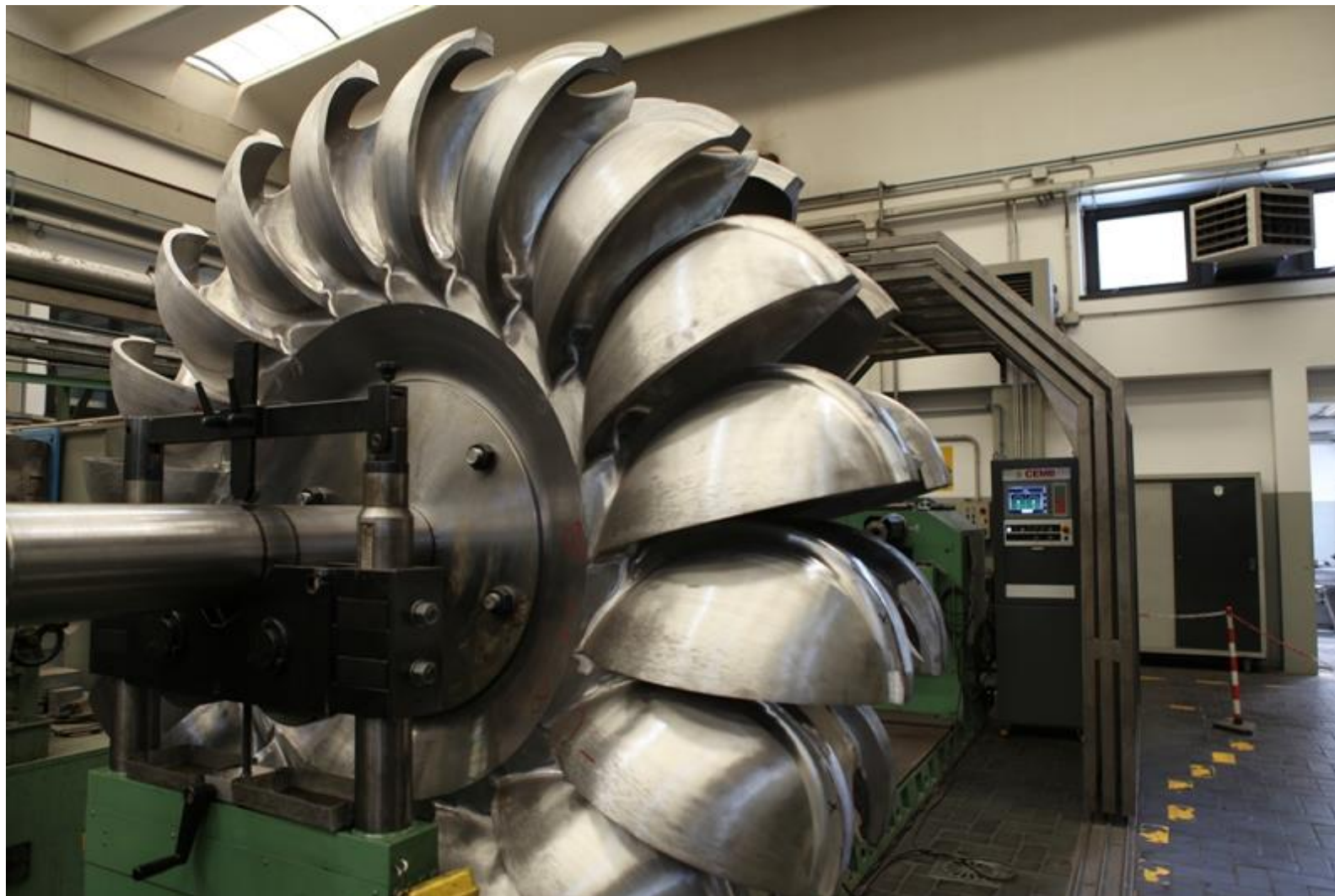
# Pelton turbina

- Akciós turbina, max. teljesítmény:  $\sim 200 \text{ MW}$
- Egy vagy több sugárcsővel rendelkezik
- Nagy vízszög sebességek (*akár 500 km/h*)
- Kis jellemző fordulatszám
- Nagy esés ( $15 - 1800 \text{ m}$ ), kis vízhozam ( $20 - 8000 \text{ liter/sec}$ )
- Hatásfok  $85 - 90\%$  körül





# Pelton turbina





# Pelton turbina





# Pelton turbina







# Fenékküszöb

Elegendő víz biztosítása a mellékágaknak.



Kőrösnagyhartyáni fenékküszöb



# Fenekkuszó





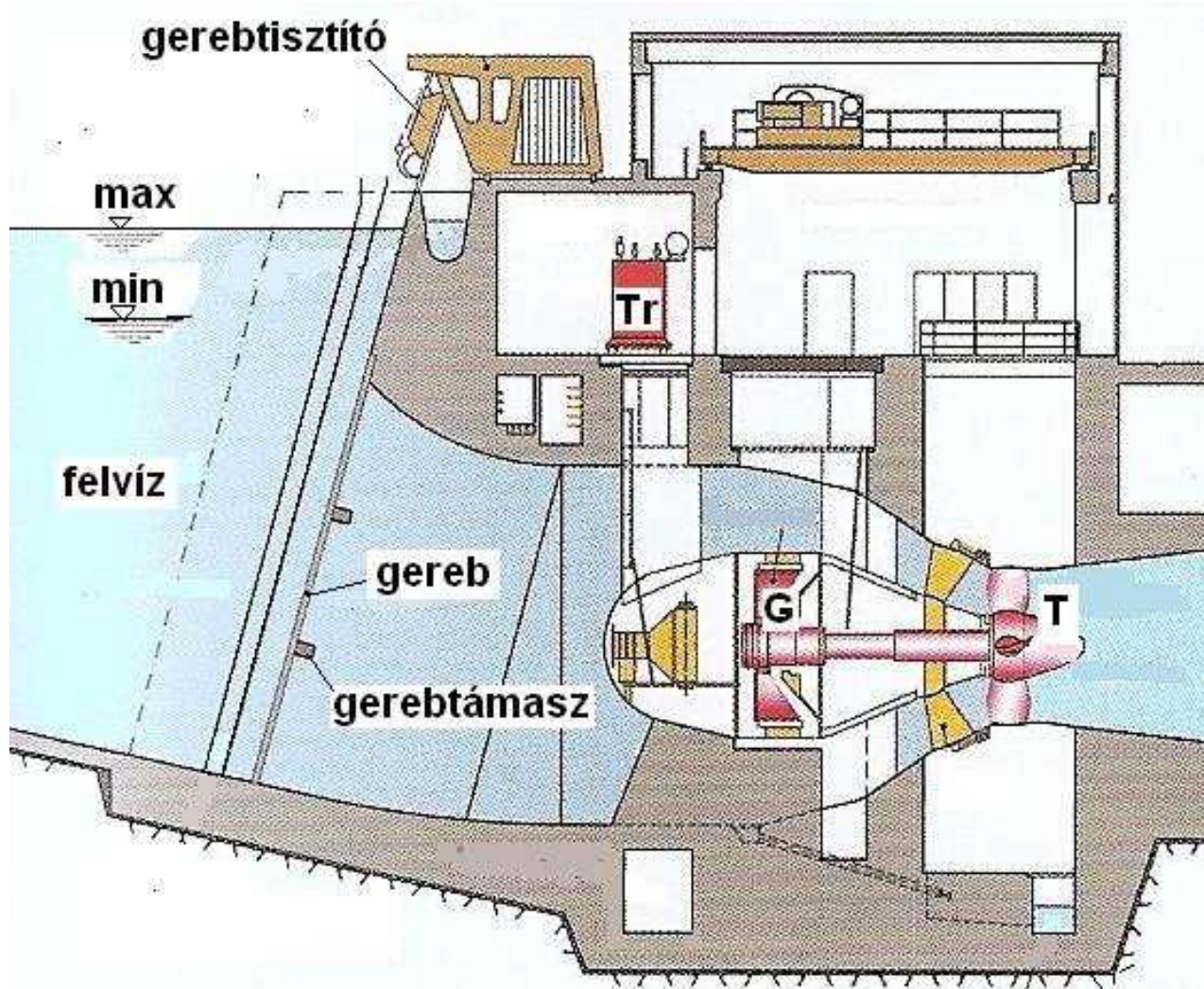


# Gereb – szűrőrács





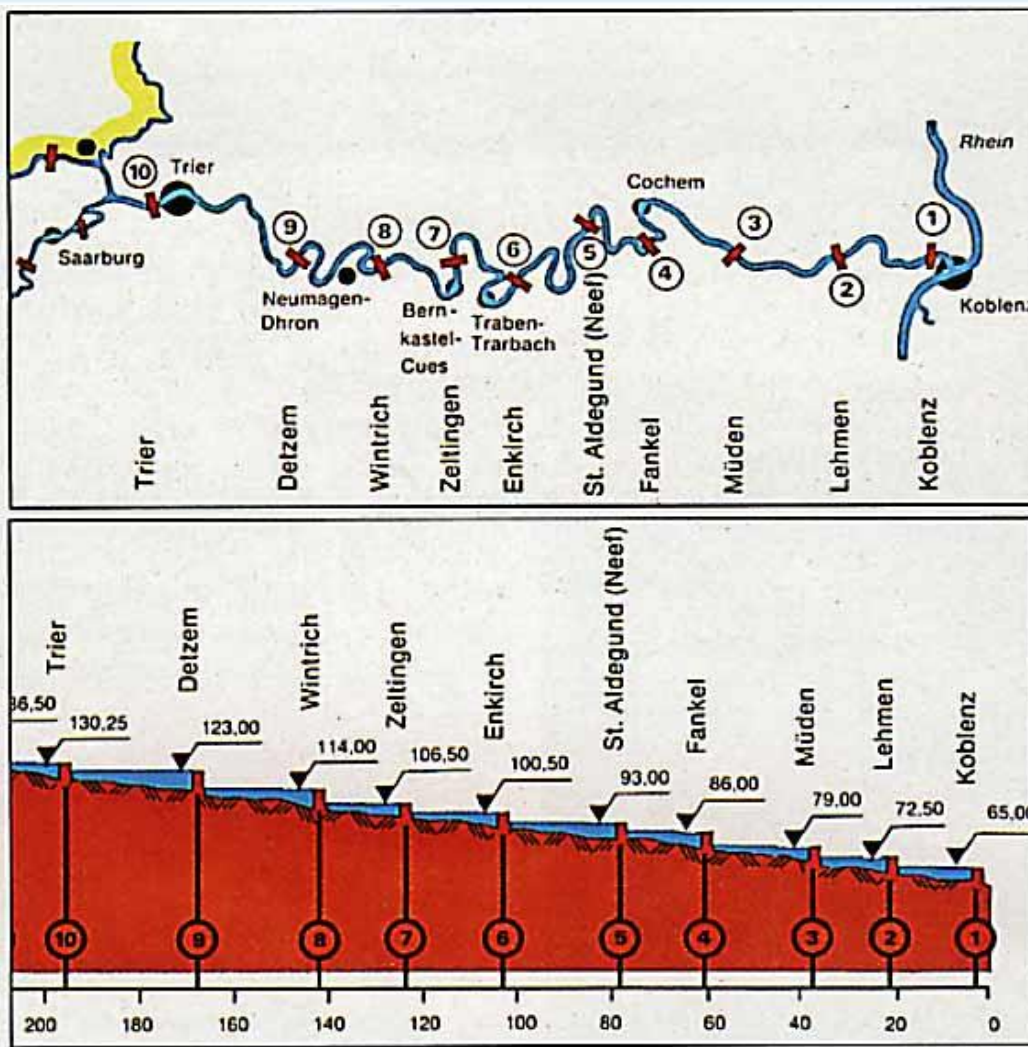
# Csőturbínás erőmű







# Vízlépcsők: Mosel folyó



Forrás: <http://www.udo-leuschner.de/basiswissen/SB107-05.htm>



# Példa: Oului erőmű

- 1939-ben tervezték
- 1959-ben épült
- 39 MW üzemi teljesítmény (14%-a a 200 ezres lakosú városnak)
- 11 méteres esés
- 3 Kaplan turbina
- Lazaclépcső
- Árvíz esetén a fölösleg átengedhető (mint minden más erőmű esetén is)



# Oului erőmű, gát







# Oului erőmű, zsilipek







# Oului erőmű, zsilipek







# Oului erőmű, árvíz





# Oului erómuú







# Oului erőmű, elektromos bekötés







# Oului erőmű, lazaclépcső







# Oului erőmű, Kaplan turbina





# Oului erőmű, Kaplan turbina



Merikoske-i erőmű turbinakereke. Ez a turbinakerék és az általa meghajtott generátor az erőmű első gépeit képezték, melyek felhasználásával az energiatermelés 1948. 5. 24-én kezdődött. A turbinakerék folyamatos használatban volt 2007 nyaráig, amikor le lett cserélve egy újra. Az **59 éves működése** alatt a turbina mintegy 3,7 milliárd kWh energiát termelt. A turbina termelése évente 35 000 háztartás villamosenergia-ellátására elegendő. A turbina változtatható szárnyú (lapátszögű) Kaplan-típusú vízturbina, amit a tamperei vászon és vasipari üzem gépműhelyében építettek, Tamperében, 1947-48-ban.



# 2. Előadás





# Magyarország vízerőkészlete

- Az ország területének  $\sim 2/3$ -a 150 méter alatt,  $\sim 1/3$  rész 150-400 méter között, csupán 3% hegyvidék
- Vízhozamok (Q):
  - Duna:  $\sim 600 - 10\,000\ m^3/s$
  - Tisza:  $\sim 90 - 4\,500\ m^3/s$
- Átlagos esések (H):
  - Duna:  $\sim 10\ cm/km$
  - Tisza:  $\sim 3-4\ cm/km$
- Vízkészlet:
  - meghatározás egyik módja:  $m^3$  befolyó víz adott idő alatt  
( $\sim 118\ km^3$  vízkészlet – éves érték)
  - meghatározás másik módja:  $m^3/s$ -ban adott készlet, ez a pillanatnyi igények kielégíthetőségét határozza meg.



# Magyarország vízerőkészlete

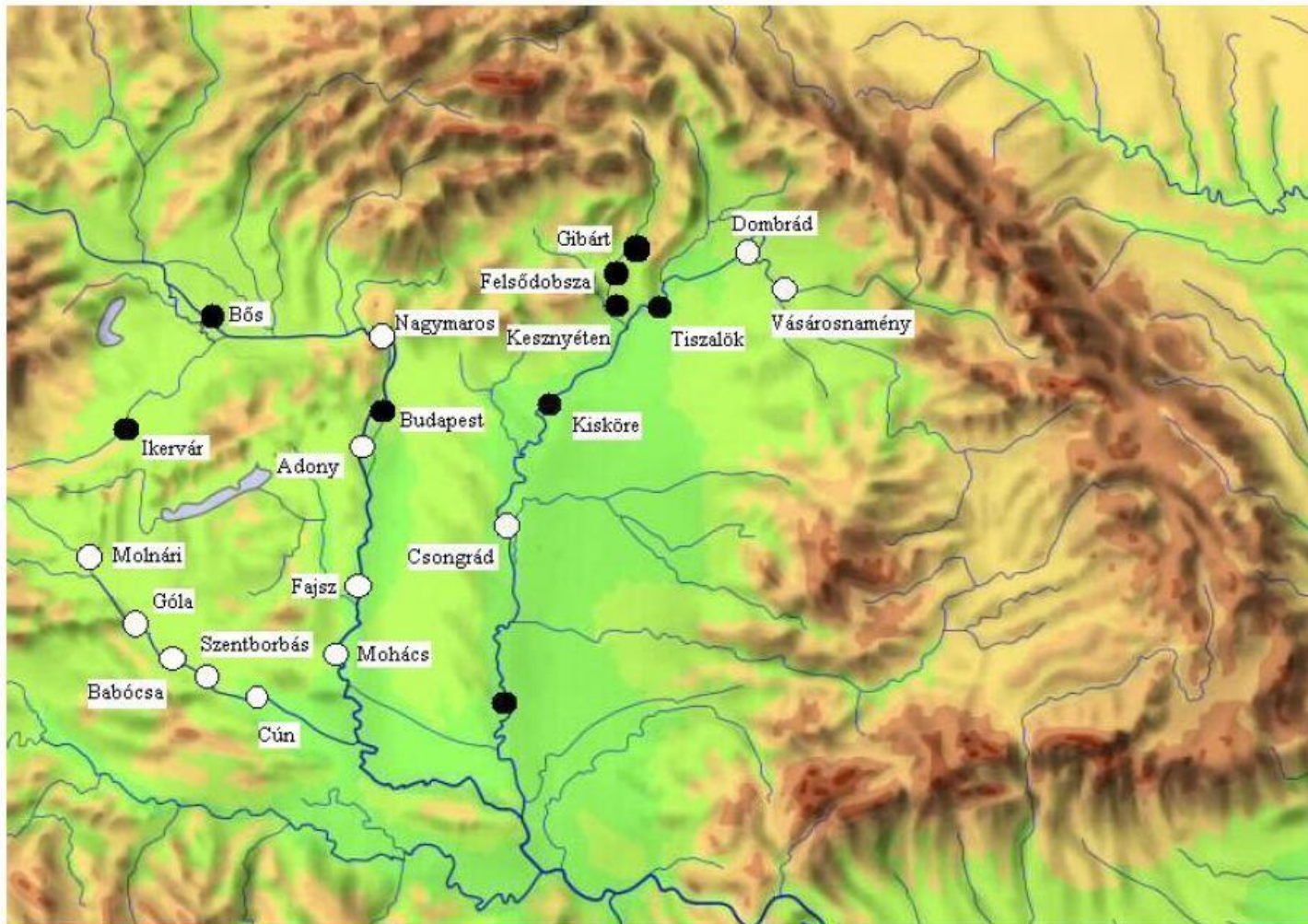
## Hazai folyók elméleti vízerőkészlete

Folyó(k) neve	Elméleti vízerőkészlet [GWh/év]
Duna	5348
Tisza	708
Dráva-Mura	756
Rába	187
Hernád	139
Többi	308
összesen	7446

*(forrás: Lakatos-Ötvös-Kullmann: A hazai vízenergia potenciál elméleti és reális értékeinek közelítő meghatározása, Energiagazdálkodás, 45(6), 2004)*



# Magyarország vízerőkészlete



8.1. ábra Magyarország területén és közelében működő ●, illetve megtervezett, de meg nem épített ○ vízerőművek



# Magyarország vízerőkészlete

- Kiépült 37 erőmű, ebből 24 Nyugat-Magyarországon
- A kiépült erőművek tervezési összteljesítménye ~55 MW  
(*egy paksi reaktor ~500 MW*)
- Éves szinten 210 GWh energiát termelnek (elméleti készlet: 7446 GWh, ez ennek a 2,8%-a)
- Magyarország villamos energiafogyasztása (2000):

***~36 000 GWh***

*Ennek 0,6%-át adják a vízerőművek*



# Bős-Gabčíkovo-i erőmű





# Bős-Gabčíkovo-i erőmű

## Adatok

- Vízhozam:  $\sim 4000 \text{ m}^3/\text{s}$
- Esés:  $12 - 24 \text{ m}$
- Nyolc függőleges Kaplan turbina, egyenként  $90 \text{ MW}$
- Összes teljesítmény:  $720 \text{ MW}$
- Évente  $2600 \text{ GWh}$  energia
- Szlovákia villamos energiafogyasztásának 8%-a





# Bős-Gabčíkovo-i erőmű

## Történet

- **1963**-ban megállapodás Magyarország és Csehszlovákia között:
  - Bős-Nagymarosi vízlépcső rendszer kidolgozása (energiatermelés, hajózhatóság, árvízvédelem, területfejlesztés)
  - Dunakilitinél gát és tározó épül (Duna vízének 98%-a üzemvízcsatornába)
  - Bős-nél csúcserőmű telepítése (napi 2-szeri működéssel)
  - Nagymarosnál duzzasztás, második erőmű kis teljesítménnyel (4-5 méteres árhullám csillapítása)
  - A két ország energiaigényének 2-3%-át fedezi
- **1977**-ben a felek aláírták a szerződést
- Az eredeti üzembe helyezés ideje (1986 és 1990 között) gazdasági nehézségek miatt folyamatosan csúszott
- A magyar fél részéről **1983**-tól aggályok merültek fel (környezeti hatások)
- **1988-89**-ben sorozatos tüntetések a vízlépcső megépítése ellen
- **1989 május**: az építkezés felfüggesztése magyar oldalról, hosszas viták Csehszlovákiával



# Bős-Gabčíkovo-i erőmű

- **1991:** A csehszlovák kormány úgy dönt, megépíti a „C” változatot (egyoldali üzembe helyezés)
- **1992 június:** a magyar fél felbontja az államközi szerződést.
- **1992 október 25:** a csehszlovák fél önkényesen elterelte a Dunát a szlovák oldalra. Magyarország a hágai Nemzetközi Bírósághoz fordul.
- **1995:** megállapodás a vízmegosztásról Szlovákiával (!), akik 400 m<sup>3</sup>/s vízhozamot biztosítanak a közös mederszakaszba. Magyar fél Dunakilitinél fenékküszöböt létesít.
- **1997 szeptember 25:** a Nemzetközi Bíróság elítélte mindkét felet különböző jogsértésekért. Részletes iránymutatás a továbbiakról.
- **1997-től napjainkig:** folyamatos egyeztetések a továbbiakról, nincs végleges megoldás



# Bős-Gabčíkovo-i erőmű







# Bős-Gabčíkovo erőmű



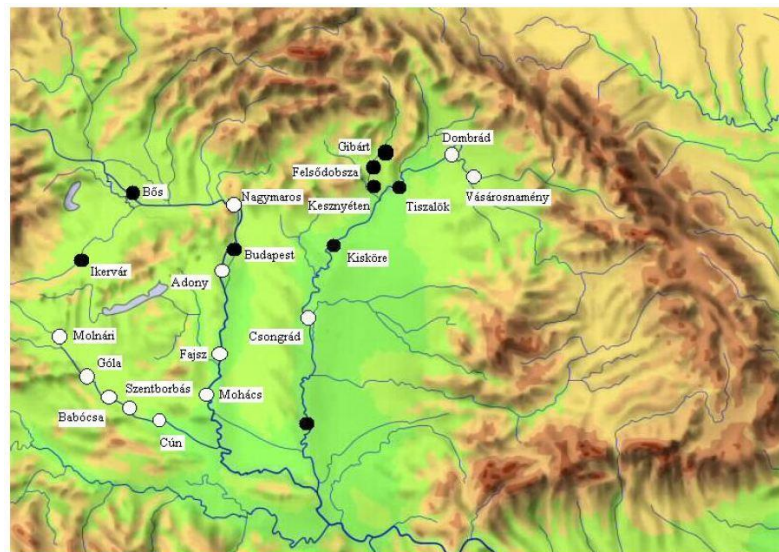




# Tiszalöki erőmű (Tisza I.)

## Adatok

- Vízhozam:  $\sim 300 \text{ m}^3/\text{s}$
- Esés:  $\sim 5 \text{ m}$
- Három függőleges Kaplan turbina (fordulatszám:  $75 \text{ 1/min}$ )
- Beépített teljesítmény:  $12,9 \text{ MW}$
- Három duzzasztó zsilip, egy hajózsilip



8.1. ábra Magyarország területén és közelében működő ●, illetve megtervezett, de meg nem épített ○ vízerőművek



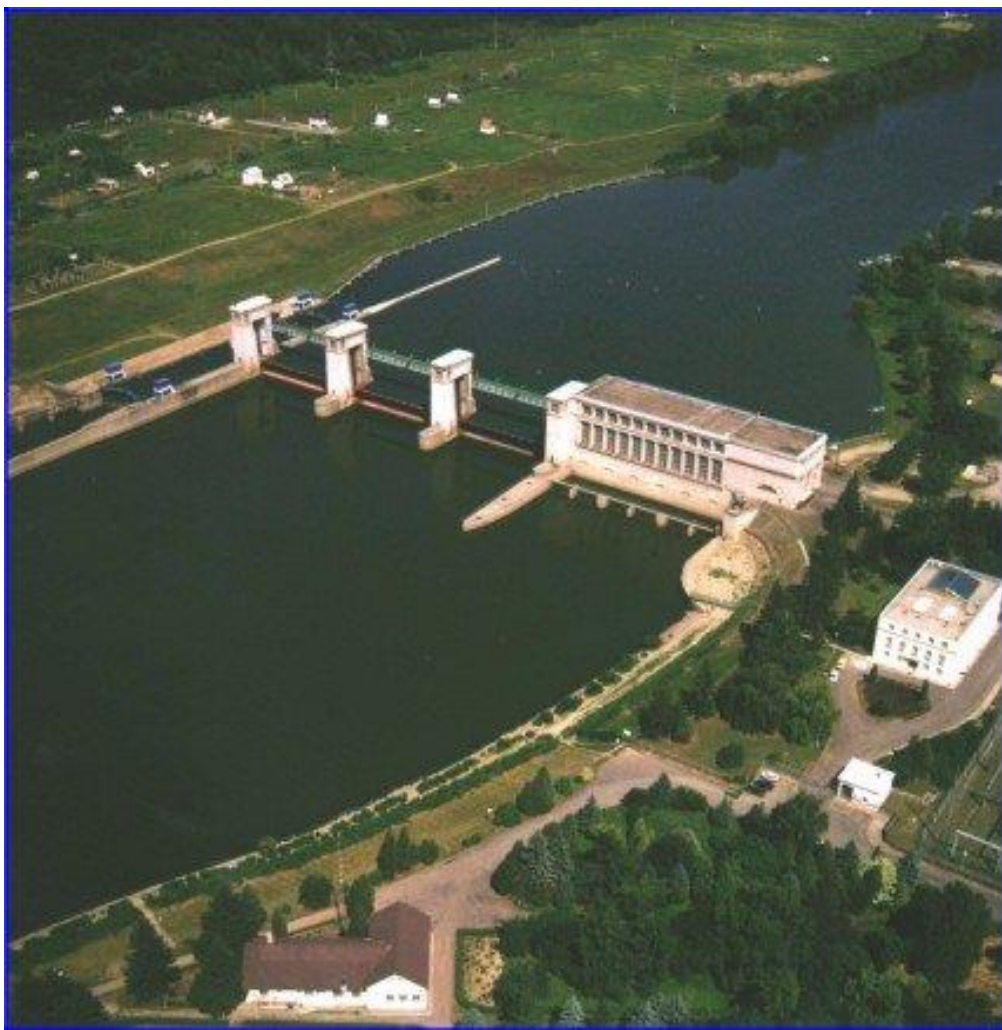
# Tiszalöki erőmű (Tisza I.)





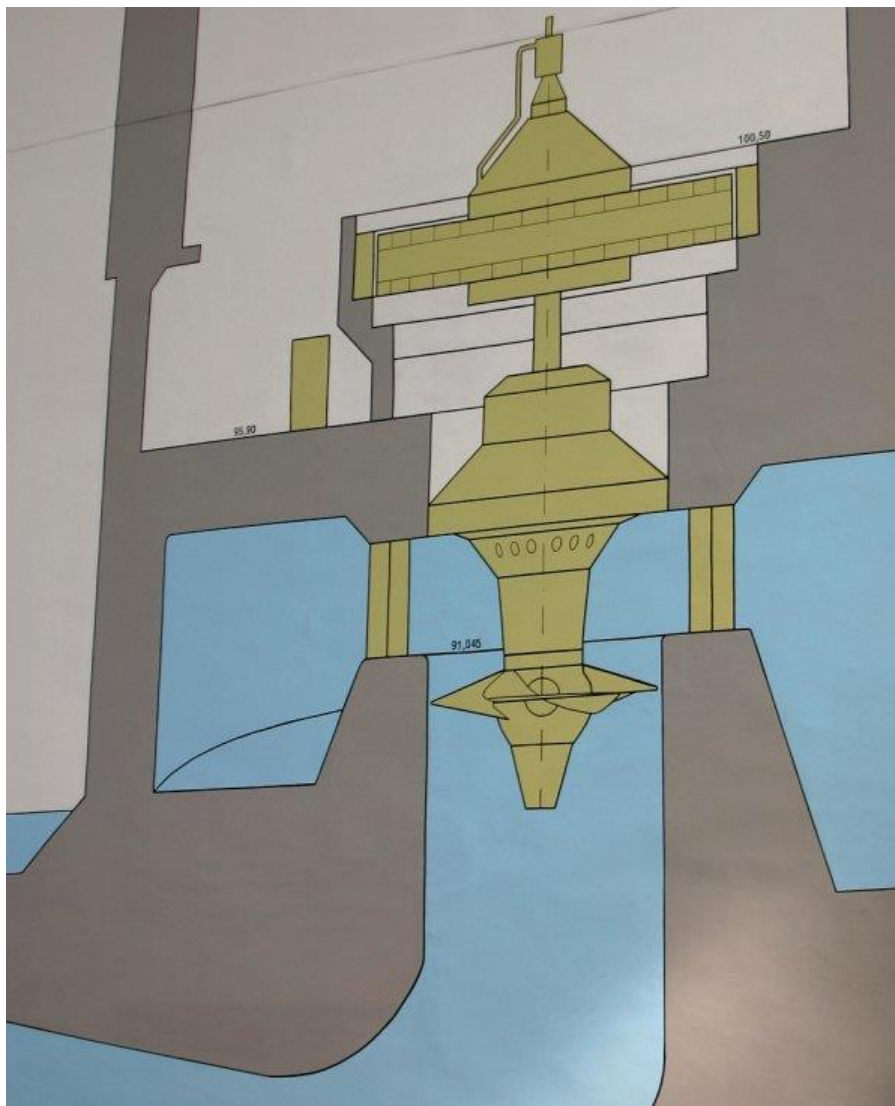


# Tiszalöki erőmű (Tisza I.)





# Tiszalöki erőmű (Tisza I.)







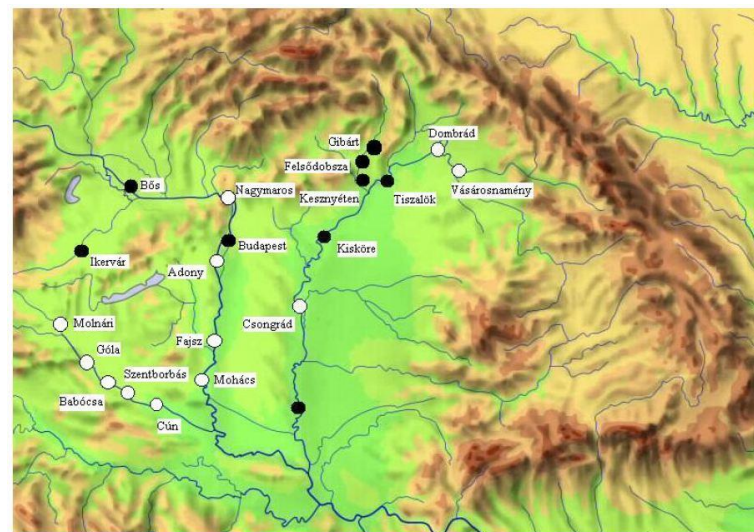
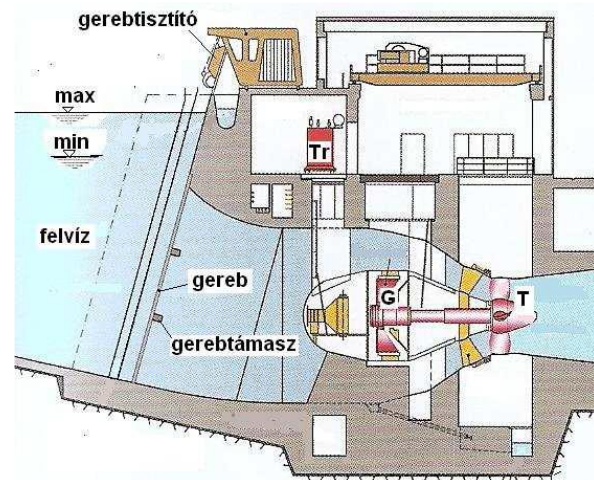
# Tiszalöki erőmű (Tisza I.)



# Kiskörei erőmű (Tisza II.)

## Adatok

- Vízhozam:  $\sim 560 \text{ m}^3/\text{s}$
- Esés:  $\sim 6,27 \text{ m}$
- Négy csőturbina (fordulatszám:  $107 \text{ 1/min}$ ),  
egyenként 7 MW
- Beépített teljesítmény:  $28 \text{ MW}$
- Öt duzzasztó zsilip, egy hajózsilip
- Halzsilip
- Tisza-tó („Alföld öntözése” (főcsatornák,  
mellékcsatornák), mezőgazdaság, üdülés,  
hajózhatóság, sport,..., párolgás)



8.1. ábra Magyarország területén és közelében működő ●, illetve megtervezett, de meg nem épített ○ vízerőművek





# Kiskörei erőmű (Tisza II.)





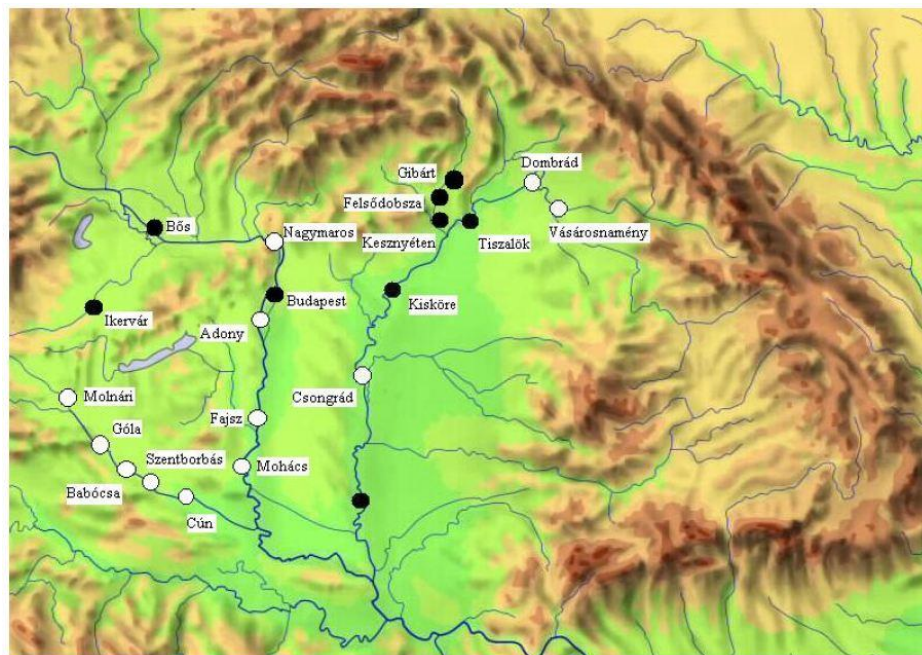
# Kiskörei erőmű (Tisza II.)





## Adatok

- Hernád-Sajó üzemvízcsatorna
- Vízhozam:  $\sim 40 \text{ m}^3/\text{s}$
- Esés:  $\sim 13,5 \text{ m}$
- Két függőleges Kaplan turbina
- Beépített teljesítmény:  $4,4 \text{ MW}$
- Évente 23,5 GWh energia



8.1. ábra Magyarország területén és közelében működő ●, illetve megtervezett, de meg nem épített ○ vízerőművek



# Kesznyéteni erőmű





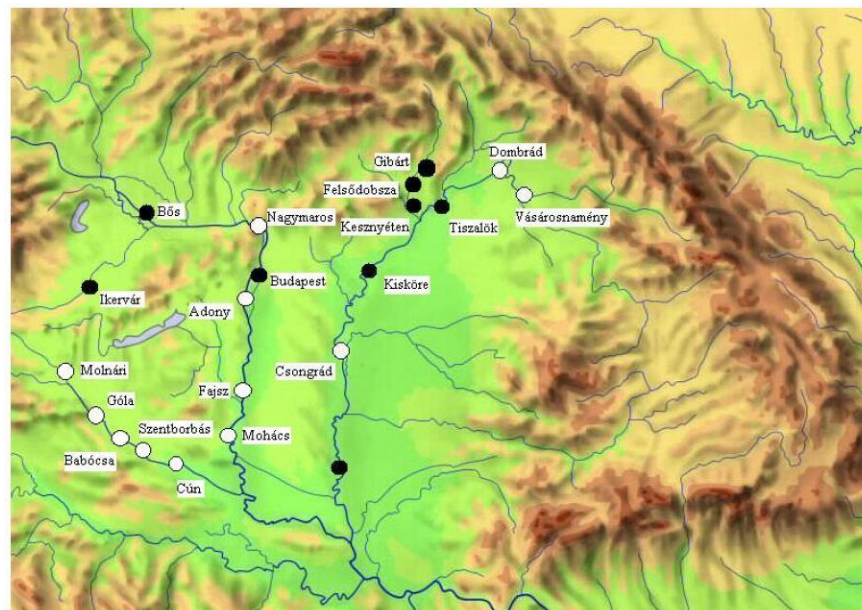


# Kesznyéteni erőmű



## Adatok

- Magyarország első vízerőműve, 1895-96-ban épült a Rába folyón
- Vízhozam:  $\sim 28 \text{ m}^3/\text{s}$
- Esés:  $\sim 8,4 \text{ m}$
- 1995 óta négy Kaplan turbina
- Beépített teljesítmény:  $2,3 \text{ MW}$
- Évente 14,5 GWh energia



8.1. ábra Magyarország területén és közelében működő ●, illetve megtervezett, de meg nem épített ○ vízerőművek





# Ikervári erómű





# Ikervári erőmű





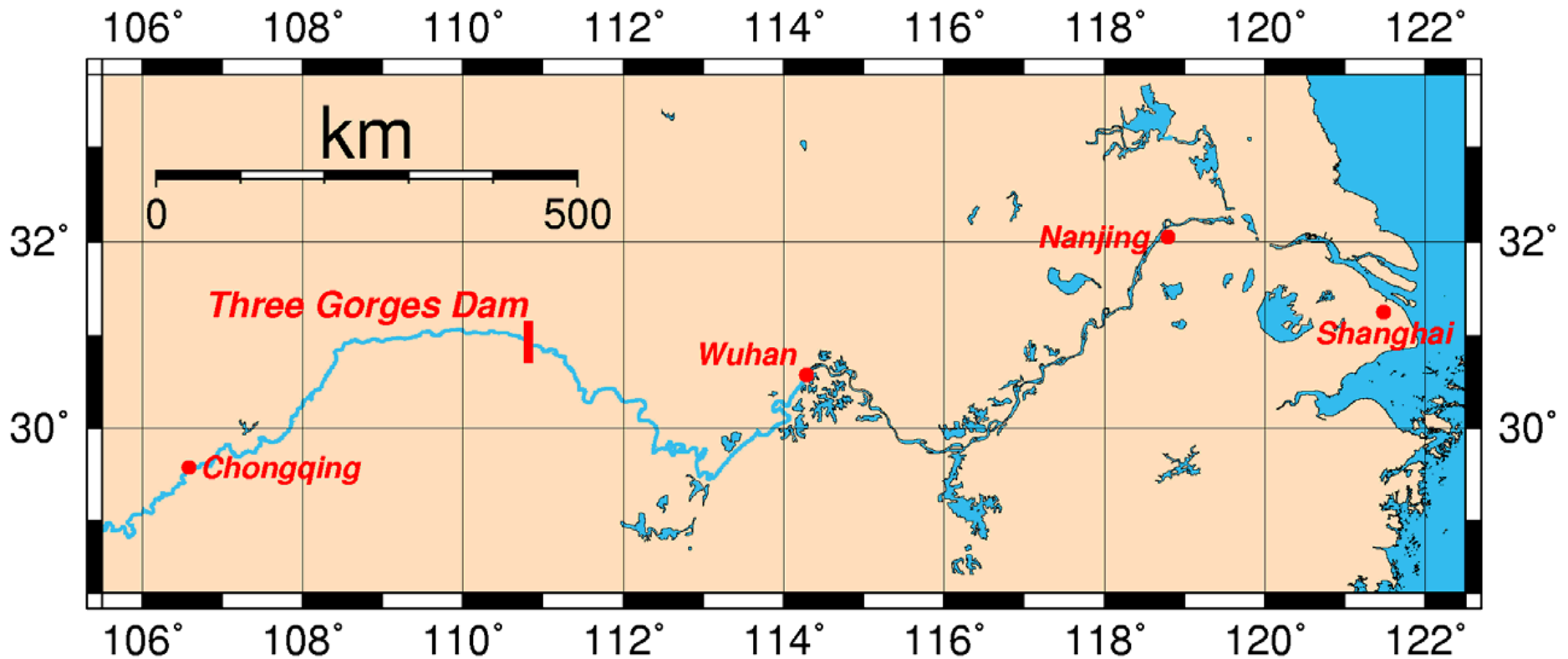
# Ikervári erőmű







# Three Gorges vízérómú (Kína, Jangce)





# Three Gorges vízerőmű (Kína)

## Adatok

- A világ legnagyobb vízerőműve, kilenc év alatt épült fel teljesen
- Vízhozam:  $\sim 116\,000\text{ m}^3/\text{s}$
- Esés:  $\sim 80,6\text{ m}$
- *32+2 db Francis turbina (32 db 700 MW; 2 db 50 MW (saját ellátásra))*
- Beépített teljesítmény:  $22,5\text{ GW}$
- Évente  $98,1\text{ TWh}$  villamos energia  
(*Magyarország szükséglete  $\sim 36\text{ TWh}$ )*)
- $2335\text{ m}$  hosszú,  $181\text{ m}$  magas gát
- Jangce folyó



# Three Gorges vízzerőmű (Kína)







# Three Gorges vízérőmű (Kína)





# Three Gorges vízzerőmű (Kína)







# Zsiguli vízerőmű (Togliatti, Oroszország)

## Adatok



- 1950-57-ig épült, részben munkaszolgálatban
- Vízhozam:  $\sim 40\,000\text{ m}^3/\text{s}$
- Esés:  $\sim 80,6\text{ m}$
- 20 db Kaplan turbina  
(16 db 115 MW; 4 db 120 MW)
- Beépített teljesítmény: 2,32 GW
- Évente 10,9 TWh energia
- 2800 m széles gát
- Volga folyó





# Zsiguli vízerőmű (Oroszország)





# Zsiguli vízerőmű (Oroszország)





# Jellemző fordulatszám

tudjuk:

$$n_q [\dots] = \frac{n \left[ \frac{1}{\text{min}} \right] \cdot Q_{opt}^{1/2} \left[ \frac{m^3}{s} \right]}{H_{opt}^{3/4} [m]} \quad Q \left[ \frac{m^3}{s} \right] = \frac{P_{h,villamos} [kW]}{8 \cdot H [m]}; \quad n \left[ \frac{1}{\text{min}} \right] = \frac{60 \cdot \omega \left[ \frac{1}{s} \right]}{2\pi}$$

Átírhatjuk:

$$n_q = \frac{60 \cdot \omega \left[ \frac{1}{s} \right] \sqrt{\frac{P_{h,villamos} [kW]}{8H [m]}}}{2\pi H_{opt}^{3/4} [m]} = \frac{15\omega \left[ \frac{1}{s} \right] \sqrt{P_{h,villamos} [kW]}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot H_{opt}^{5/4} [m]}$$

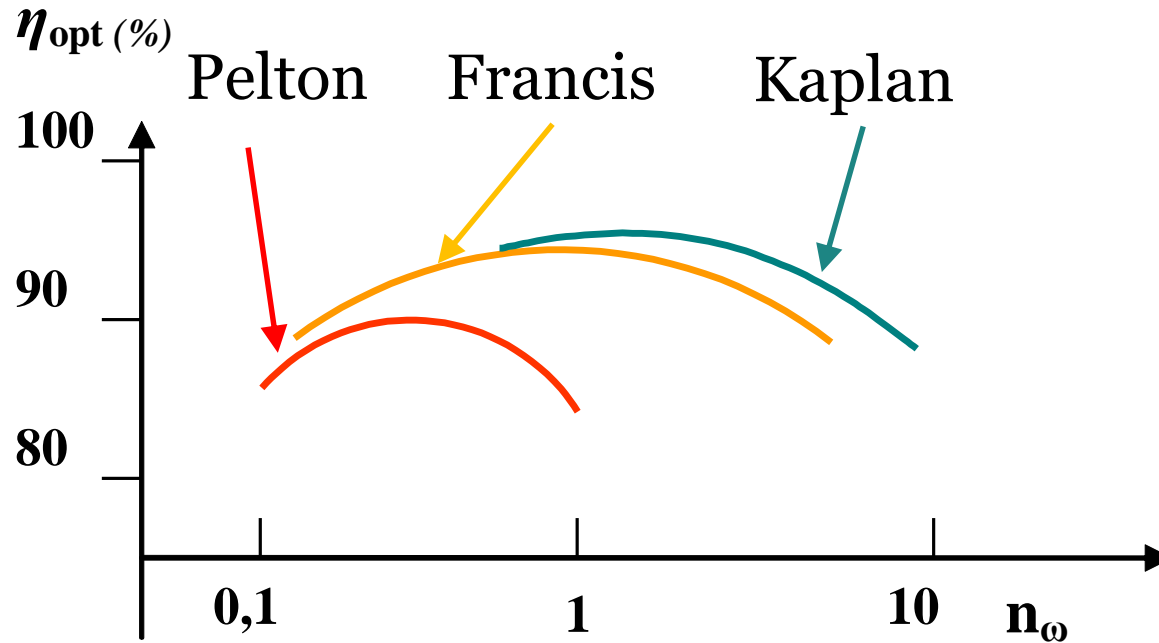
Az alábbiak is „forgalomban”  
vannak:

$$n_\omega = \frac{\omega \left[ \frac{1}{s} \right] \sqrt{P_{h,villamos} [kW]}}{H_{opt}^{5/4} [m]}; \quad n_s = \frac{n \left[ \frac{1}{\text{min}} \right] \sqrt{P_{bev,opt} [kW]}}{H_{opt}^{5/4} [m]}$$





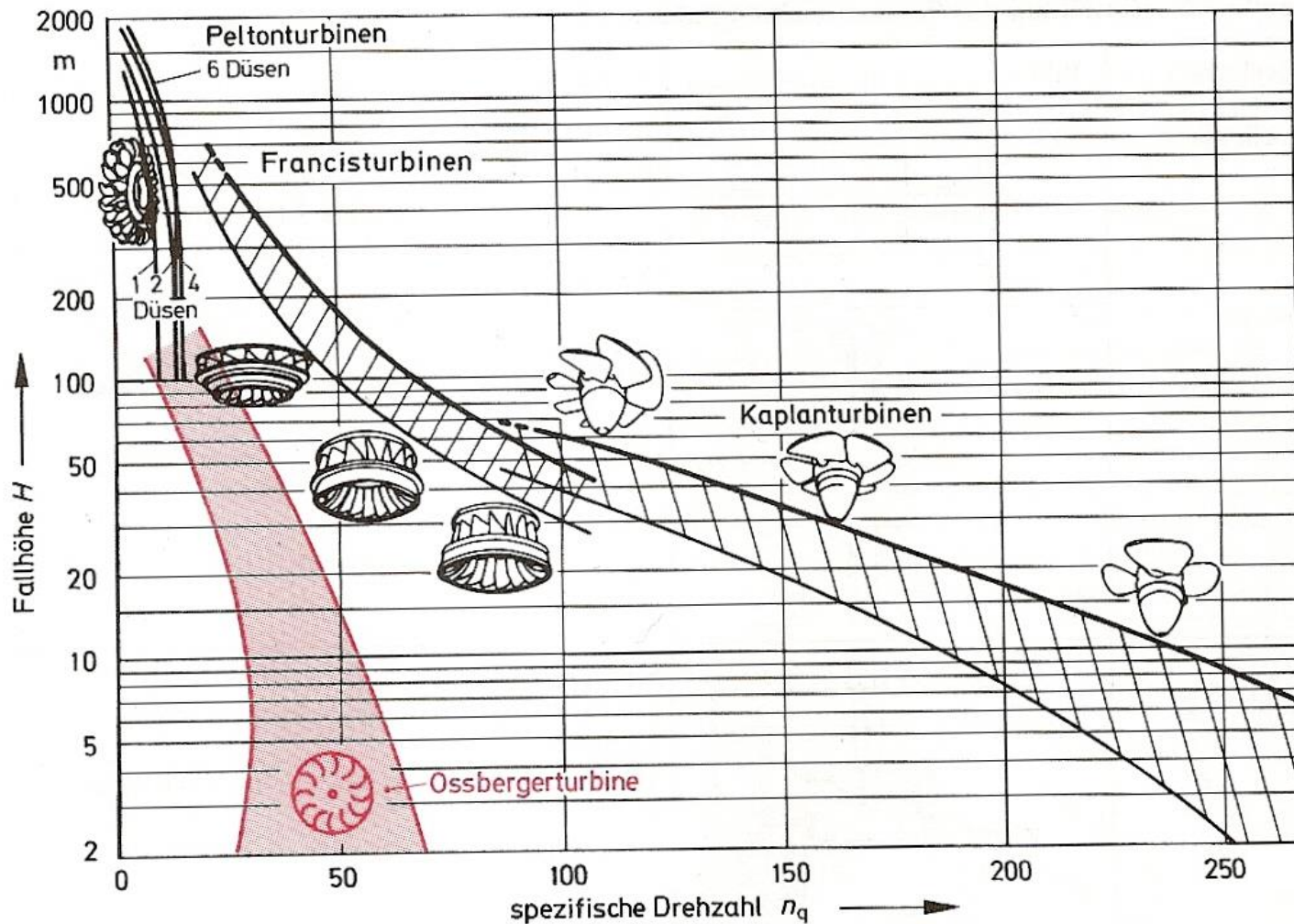
# Jellemző fordulatszám



$n_q n_{\omega} \rightarrow$

Pelton(p nagy, Q kicsi)  $\rightarrow$  Bánki  $\rightarrow$  Francis  $\rightarrow$  Kaplan (p kicsi, Q nagy)

# Turbina típusok



# Turbina típusok

$n_s = 10$

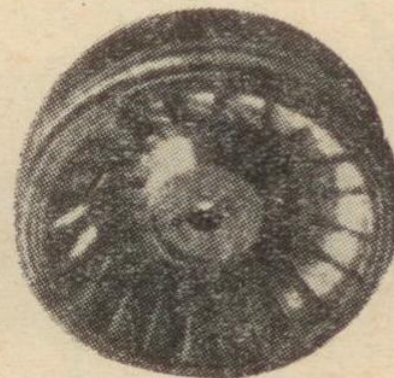


$n_s = 25$



$n_s = 75$

$n_s = 150$



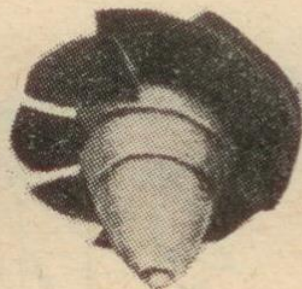
$n_s = 300$



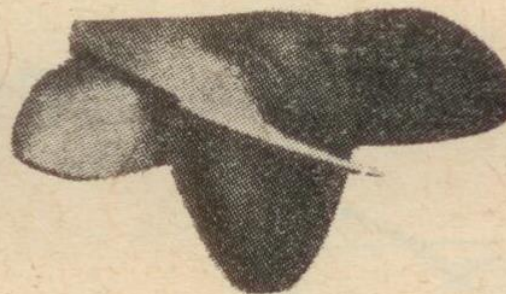
$n_s = 400$



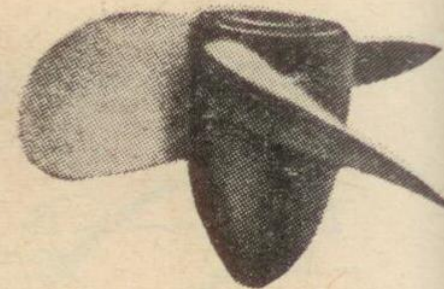
$n_s = 450$



$n_s = 600$



$n_s = 1000$







# Euler-féle turbinaegyenlet

## Turbina:

- örvényelven működő áramlástechnikai gép
- Euler-féle turbinaegyenlet alkalmazása:

$$H_e = \frac{c_{1u} u_1 - c_{2u} u_2}{g} > 0$$

ahol  $H_e$  az elméleti fajlagos munka  
(*súlyegységre vonatkoztatva*)

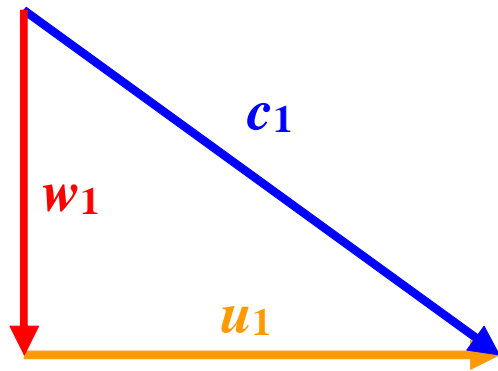
- Kilépő perdület ( $c_{2u}$ ) legyen zérus
- energiatermeléshez  $c_{1u} > 0$  szükséges
  - ezt a perdületet vezetőkerekekkel hozzák létre  
(*Kaplan és Francis turbinák*)



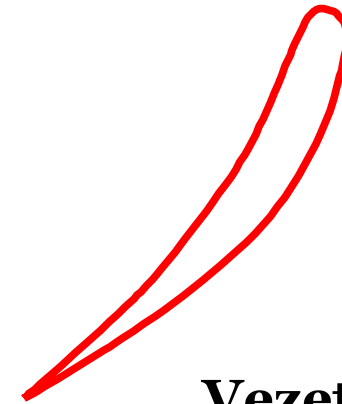
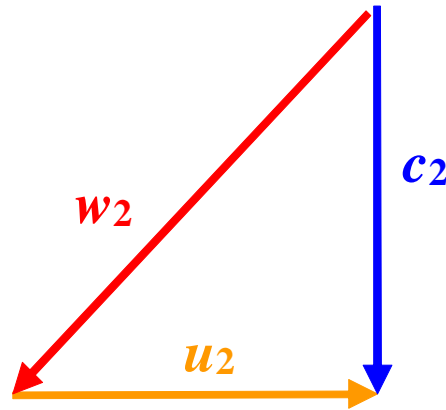
# Sebességi háromszögek

## Francis turbina

Belépés

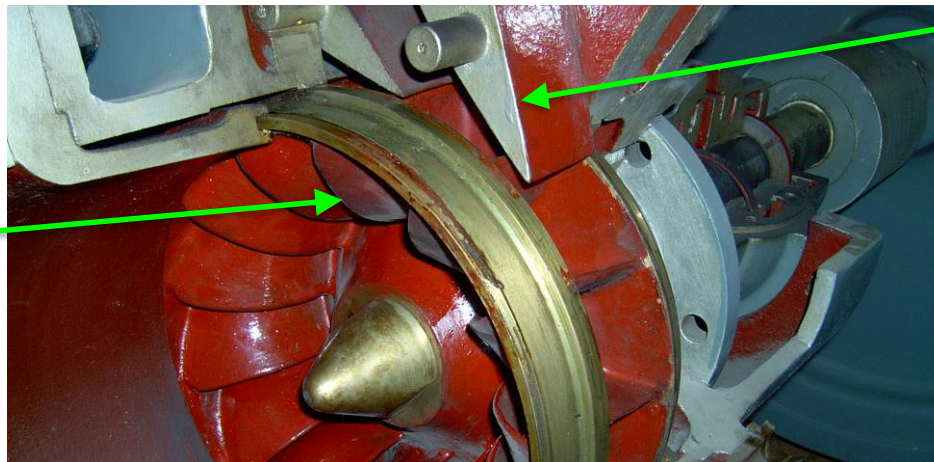


Kilépés



Vezetőlapátok

Járókerék

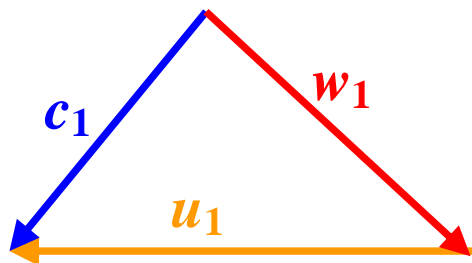




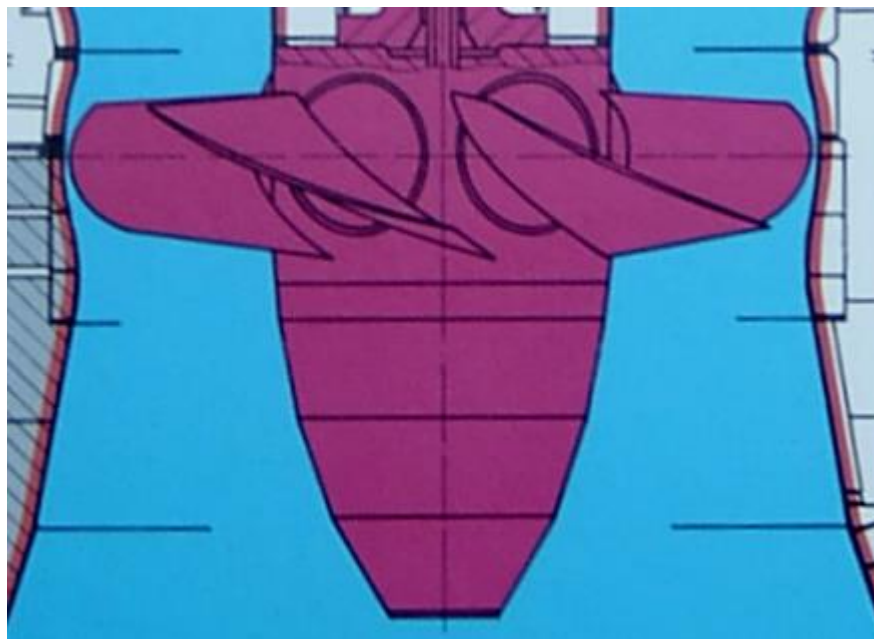
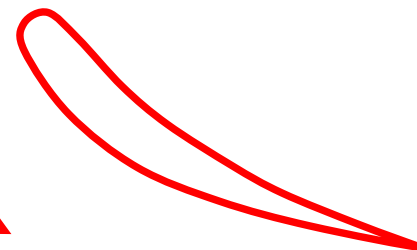
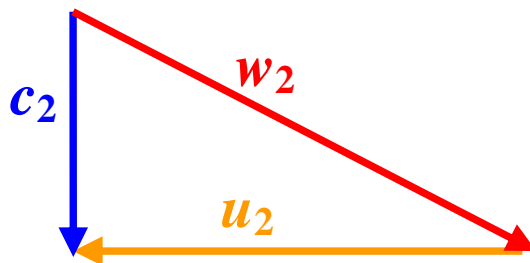
# Sebességi háromszögek

## Kaplan turbina

Belépés



Kilépés

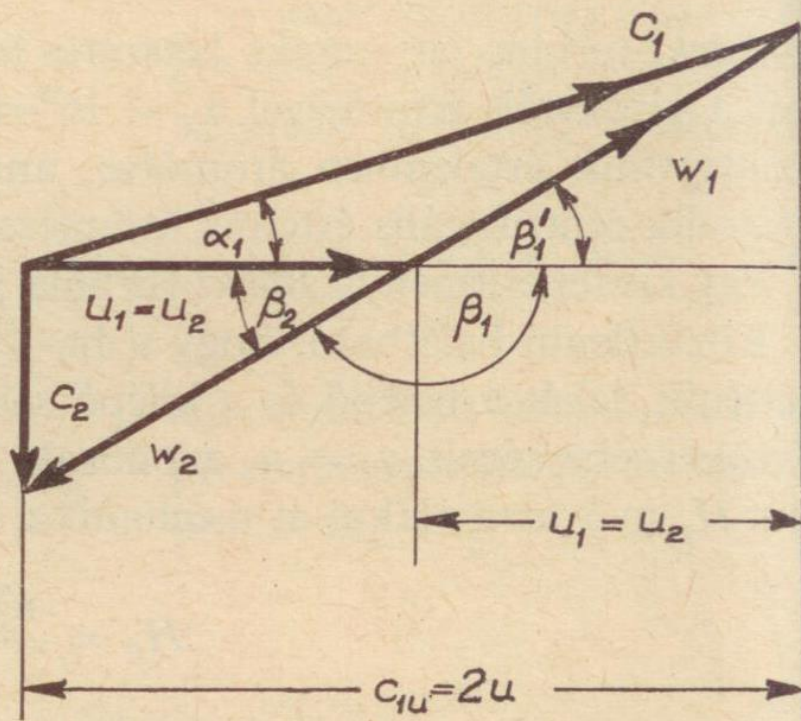
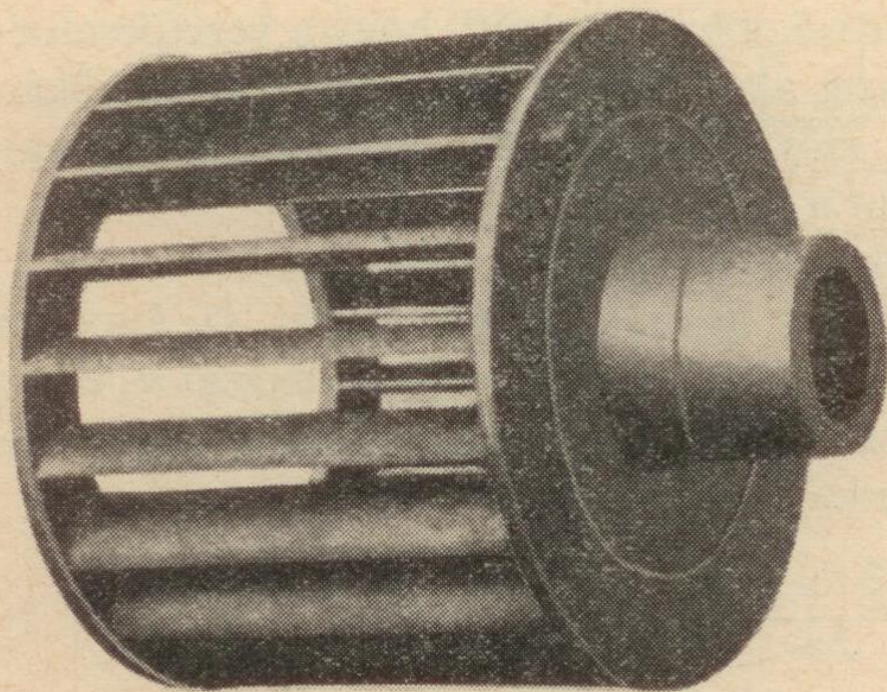






# Sebességi háromszögek

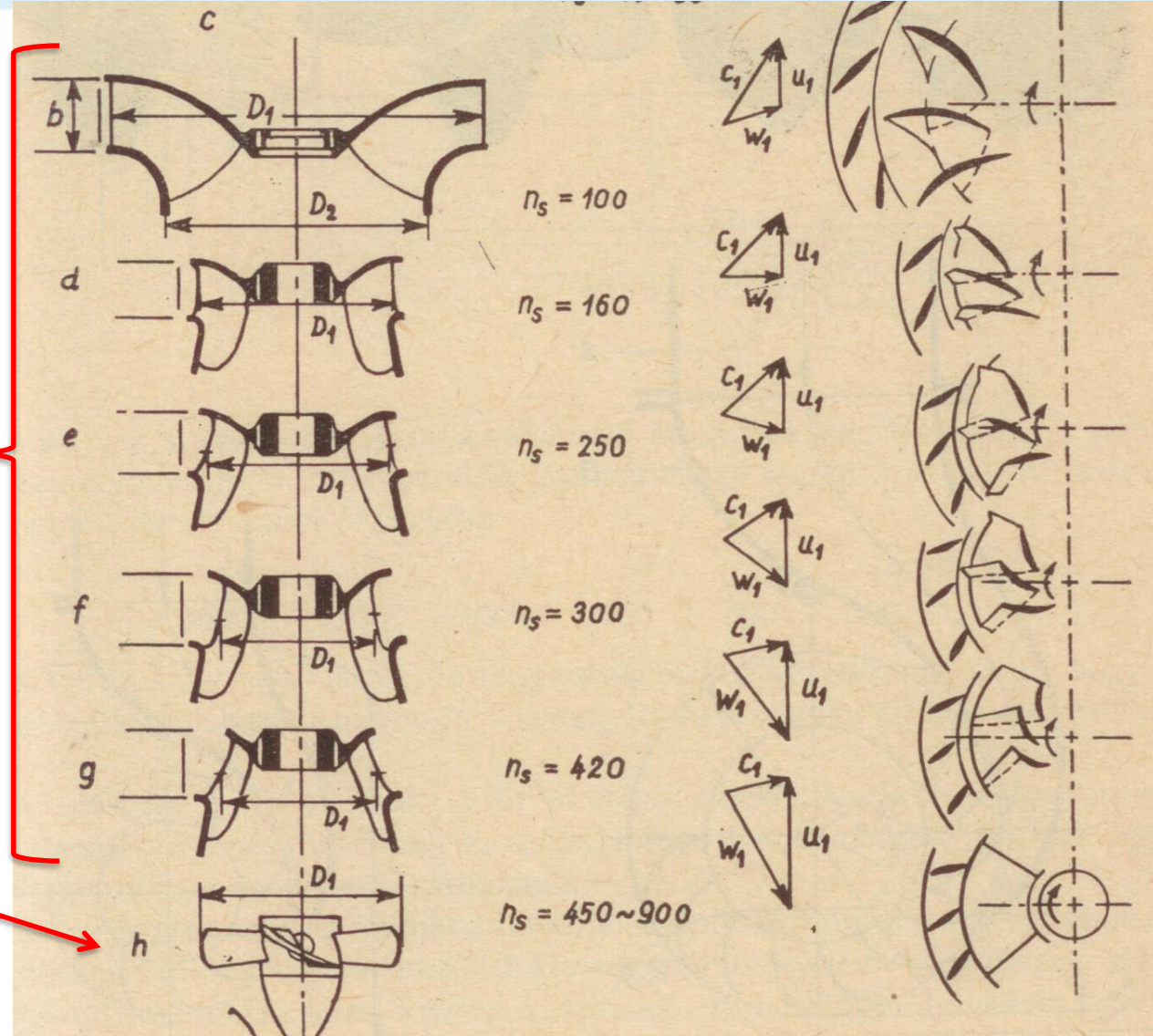
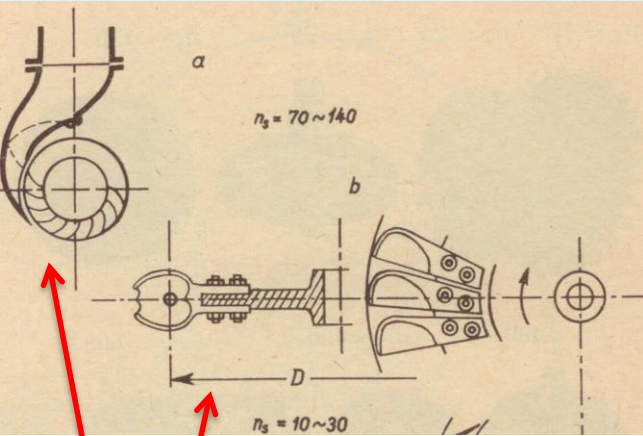
(Bánki turbina)







# Sebességi háromszögek - mind



- Bánki
- Pelton
- Francis
- Kaplan





# Üzemi jelleggörbék

## Turbina üzemi jelleggörbéi:

- Víznyelés-fordulatszám;  $Q(n)$
- Hajtónyomaték-fordulatszám;  $M(n)$
- Állandó esés ( $H$ ) és rögzített vezetőkerék állás ( $\varepsilon$  fajlagos nyitás (, pl:  $\varepsilon=1; 0,8; 0,6$ ) ) mellett vizsgáljuk.

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{névl.}}$$

- Célszerű fajlagos mennyiségekkel számolni

$$\left. \begin{array}{l} H = 1 \text{ m} \\ D = 1 \text{ m} \end{array} \right\} \text{ Ezt az } \square_{11} \text{ index jelöli}$$

- Kontinuitás és Bernoulli egyenletek



# Üzemi jelleggörbék

$$Q = \text{felület} \cdot \text{sebesség} \sim \frac{D^2 \pi}{4} \sqrt{2gH} \sim D^2 \sqrt{H},$$

$$\text{így } \frac{Q}{D^2 \sqrt{H}} = \text{const} = \frac{Q_{11}}{1^2 \sqrt{1}} = Q_{11}$$

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \sqrt{H}}$$

$$D \cdot \pi \cdot n = u \sim \text{sebesség} \sim \sqrt{2gH}$$

$$n \sim \frac{\sqrt{H}}{D}$$

$$n_{11} = \frac{nD}{\sqrt{H}}$$



# Üzemi jelleggörbék

$$P_{bev} = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot H}{\eta} \sim D^2 \sqrt{H} \cdot H$$

$$P_{11} = \frac{P_{bev}}{D^2 H^{3/2}}$$

$$M = \frac{P_{bev}}{\omega} \sim \frac{P_{bev}}{n} \sim \frac{D^2 H^{3/2}}{\sqrt{H}} = D^3 H$$

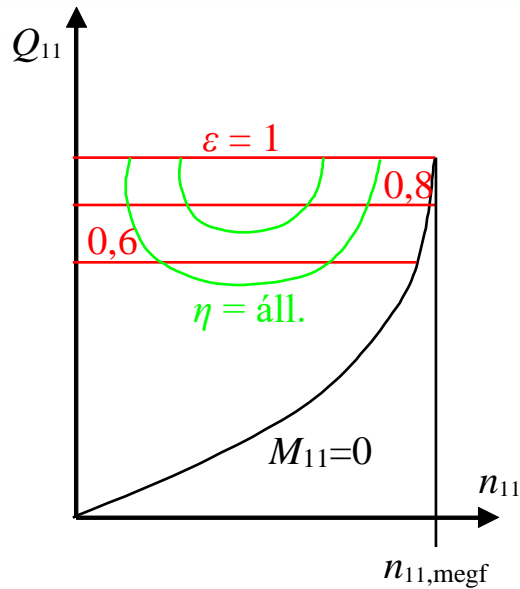
$$M_{11} = \frac{M}{D^3 H}$$

**Fontos:** ha a sűrűség nem állandó, akkor nem hagyhatjuk el!

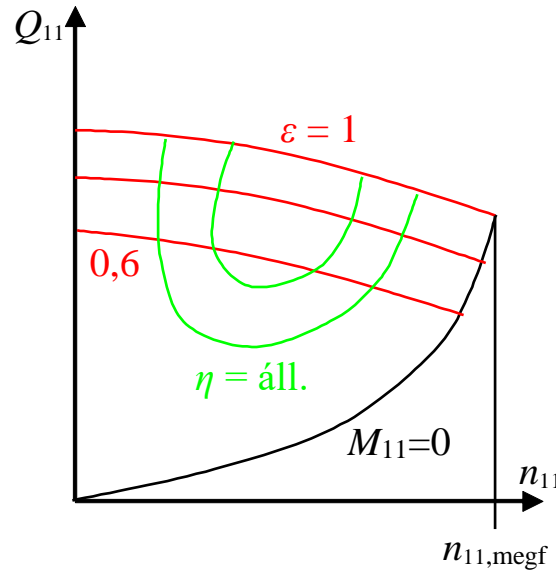




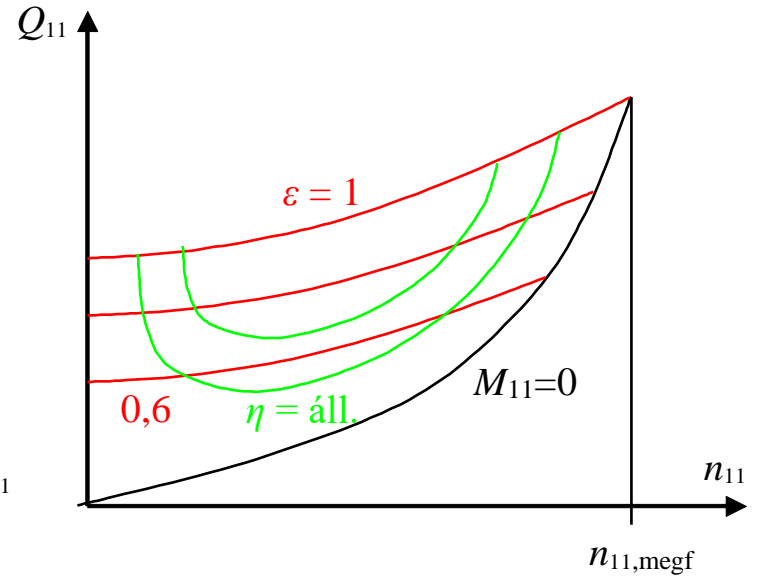
# Üzemi jelleggörbék



**Pelton turbina**



**Francis turbina**



**Kaplan turbina**

- A turbinákat megfutási fordulatszámra kell méretezni
- Üzemzavar esetén (megszűnő terhelés) a vezetőlapátokat/sugárcsöveket gyorsan el kell zárni
- A gyors zárás miatt nyomáshullámok alakulhatnak ki



# 3. Előadás



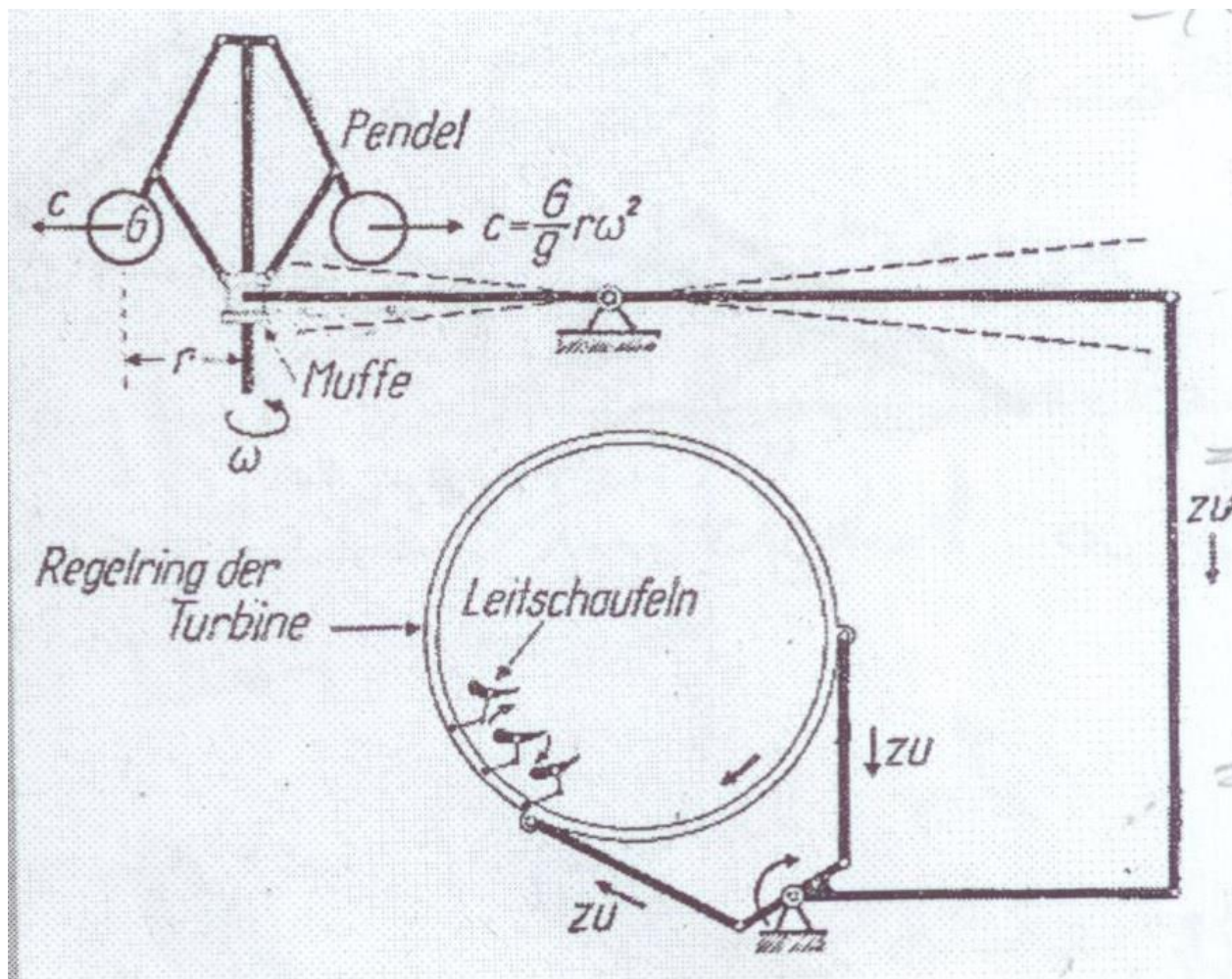
# Turbina szabályzások

- Aszinkron generátor, **állandó fordulatszám igény**, „hálózat segít”
- Víznyelés változtatása szabályozható
- Szabályozó részei:
  - Érzékelő: centrifugál inga
  - Rendelkező: csúszógyűrű elmozdulás
  - Jelképző: egész rudazat és a kényszerpályák
  - Erősítő: hidraulika
- Szabályozó: fordulatszám-eltéréssel arányos jelleg: integráló viselkedés, lengésre, instabilitásra hajlamos
- Szabályozó szervomotorok (tolattyúk): olaj vagy víznyomással működnek
- **Mechanikus + PLC szabályzás (biztonság)**



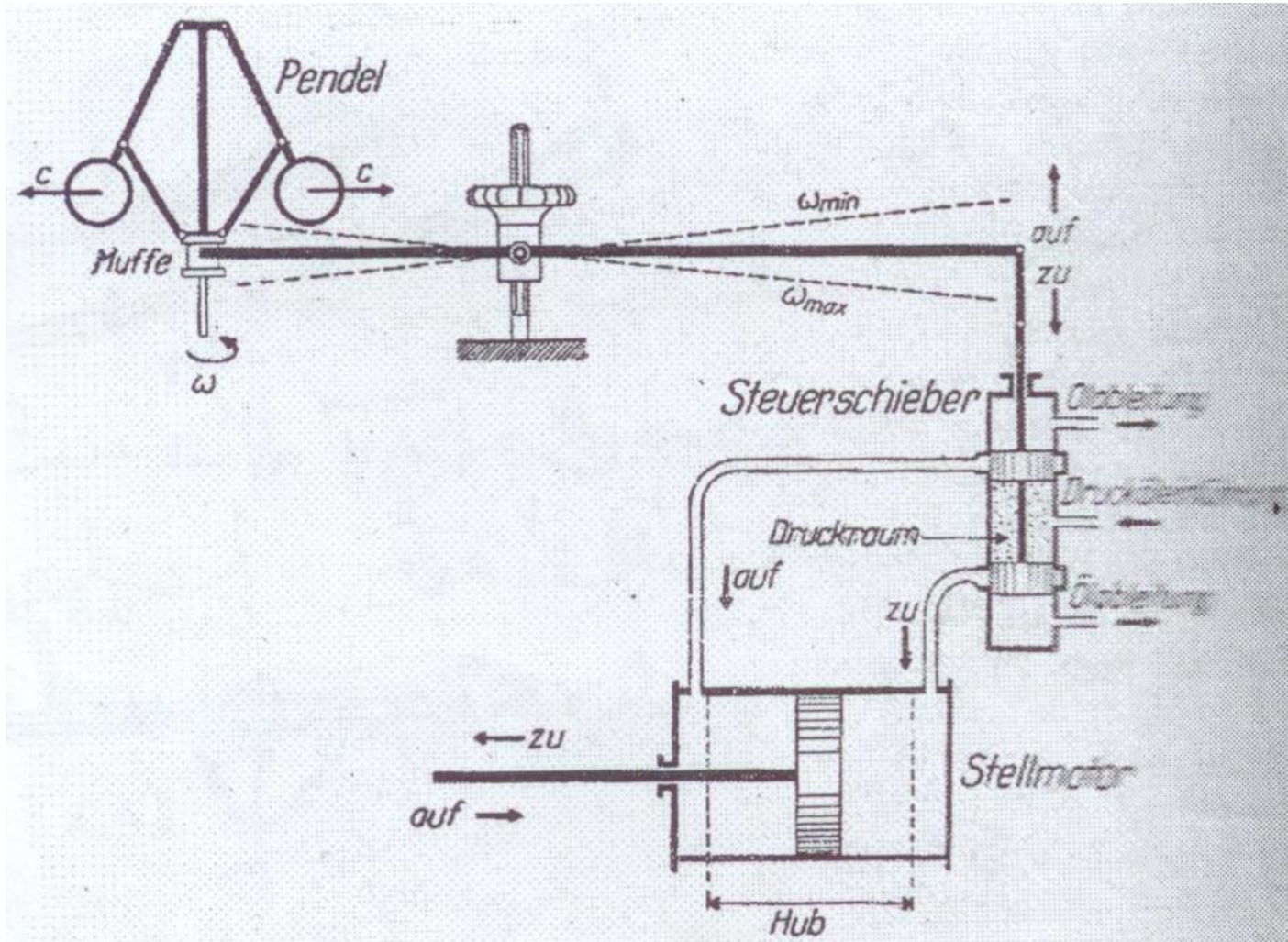
# Turbina szabályzások: Direkt vezérlés

Nem elég nagy a szabályozó erő.



# Turbina szabályzások

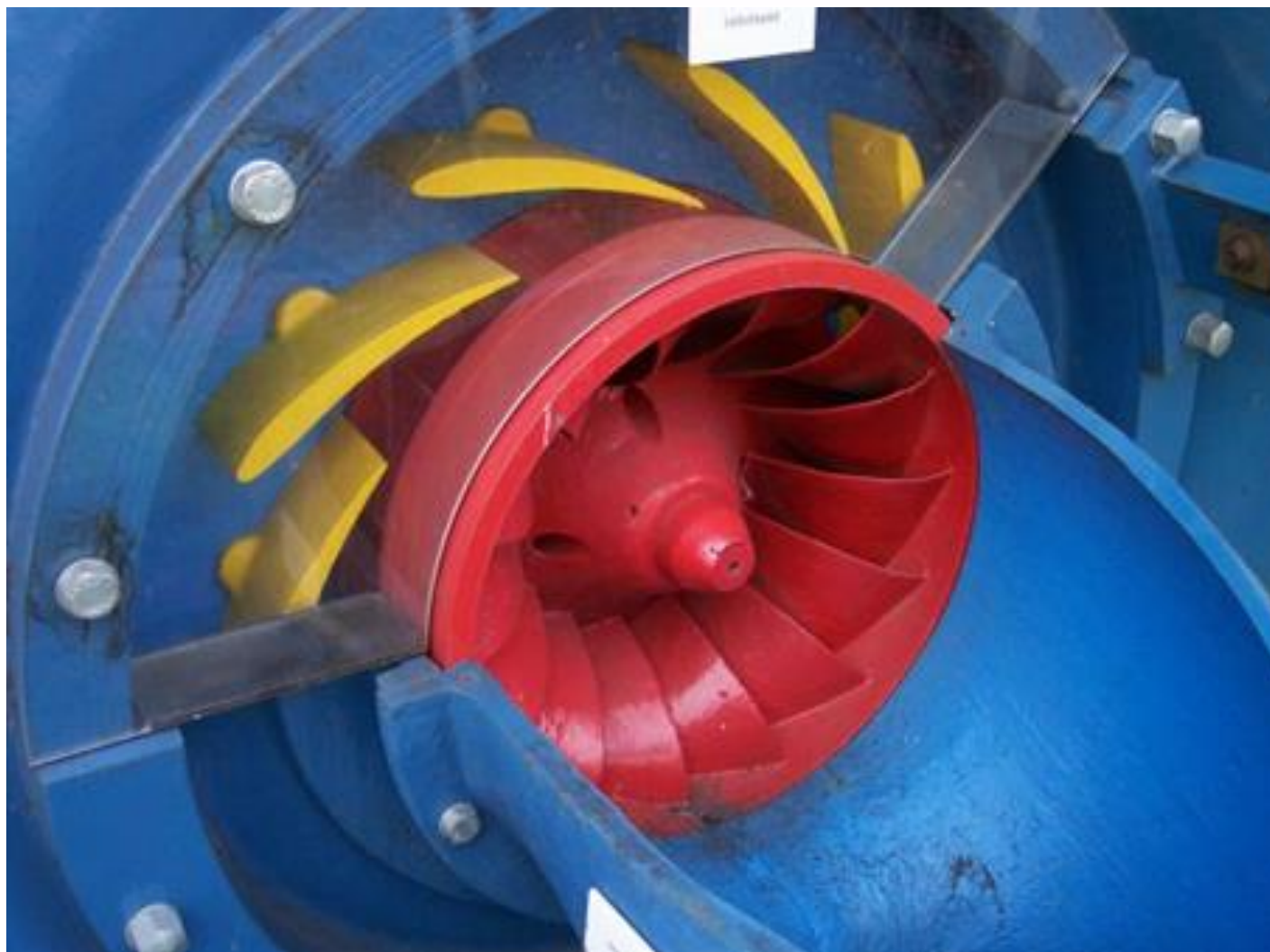
Lengésre hajlamos.







# Turbina szabályzások: Francis turbina

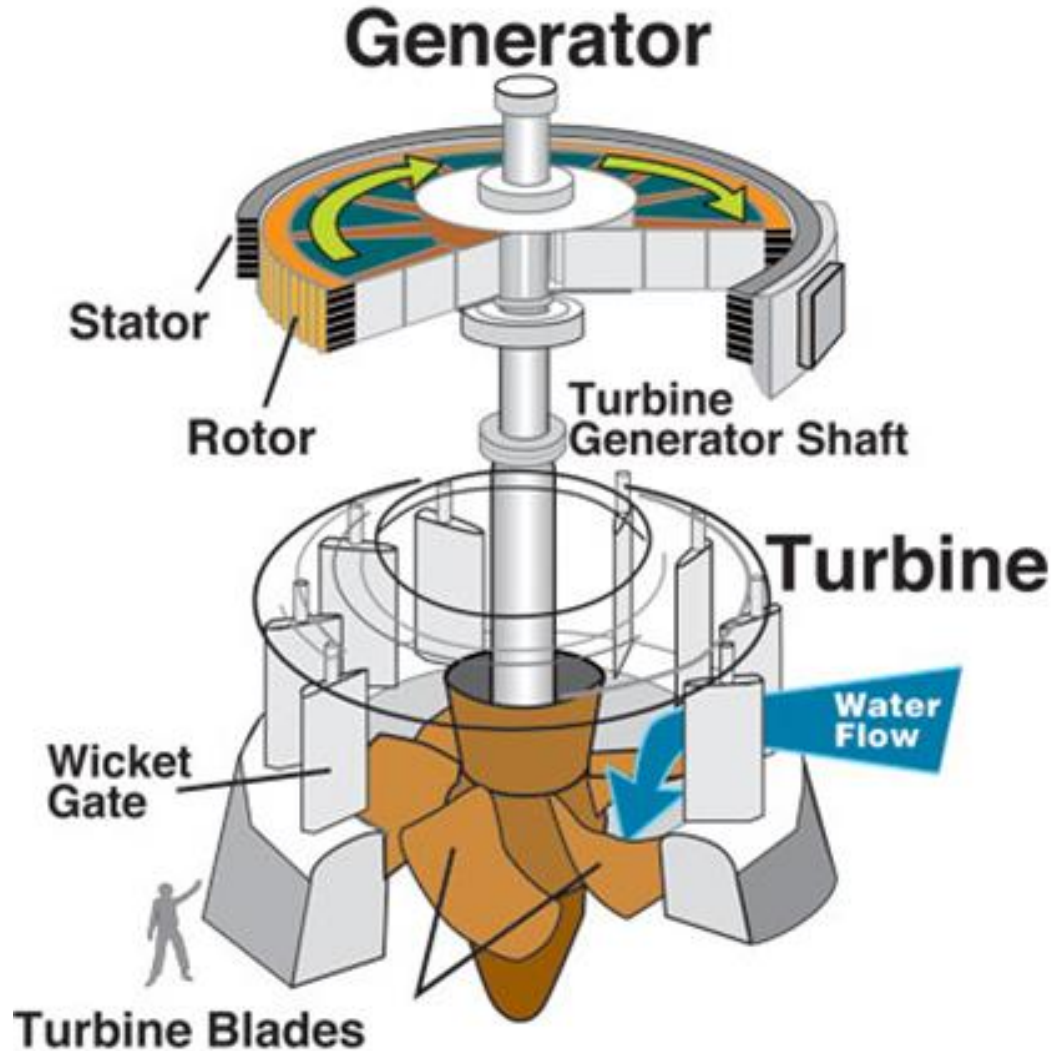






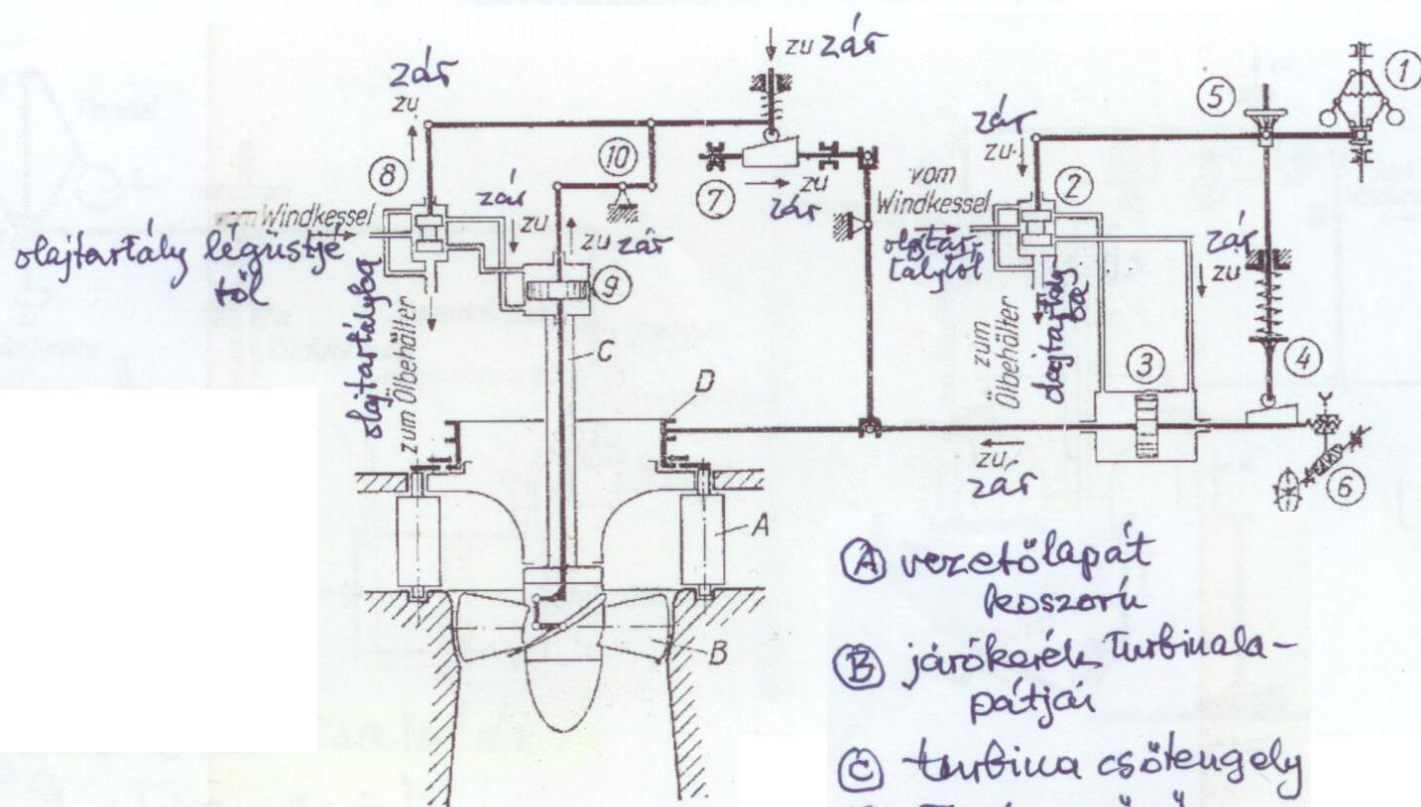


# Turbina szabályzások: Kaplan turbina



# Turbina szabályzások: Kaplan turbina

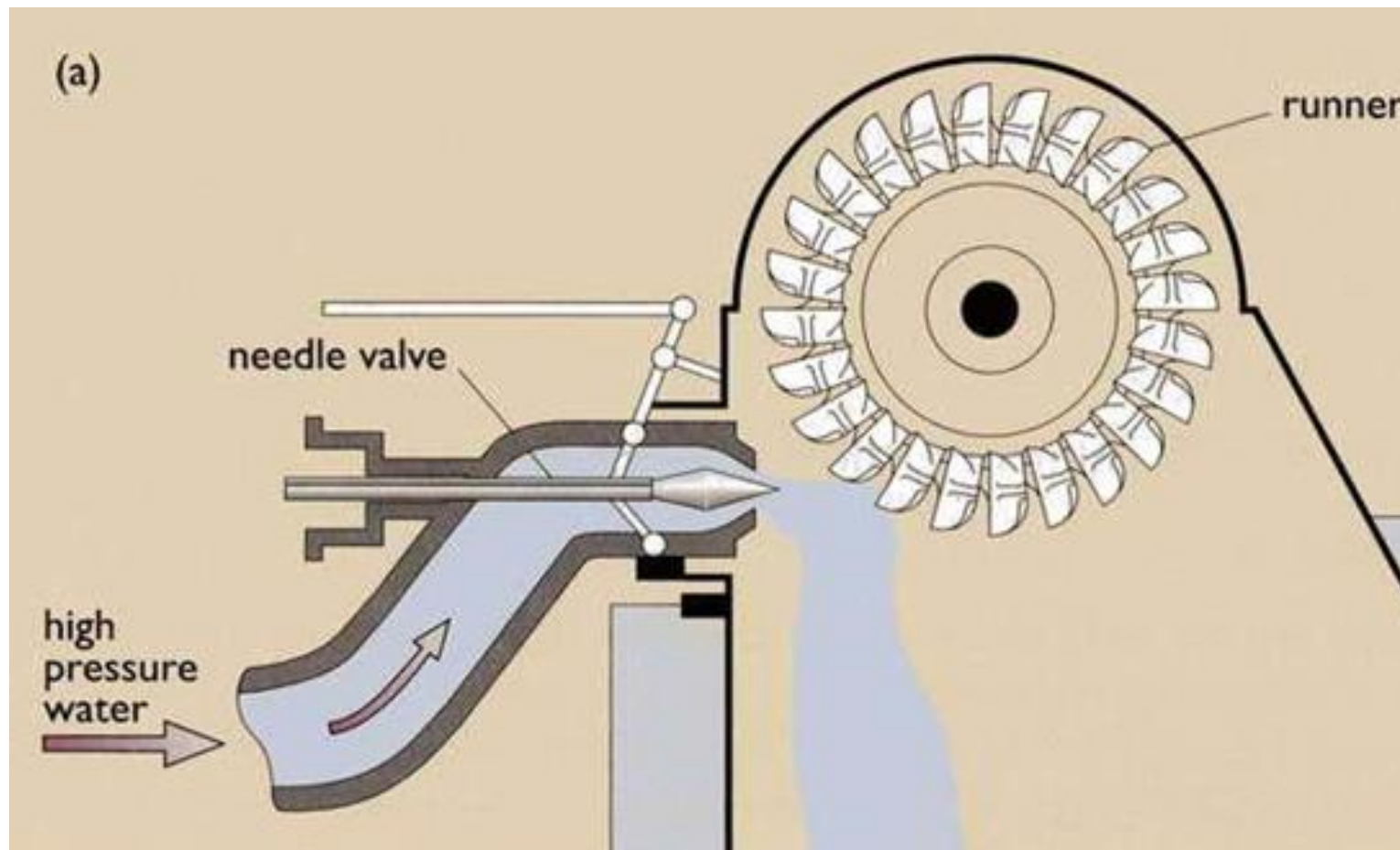
## Kaplan turbina



- Ⓐ vezetőlapát kioszorú
- Ⓑ járókerék Turbinalapátjai
- Ⓒ turbina csőkegely
- Ⓓ Finc-gyűrű

- ① centrifugálinga
- ② Finc-gyűrű vezérő tolattyúja
- ③ munkaheugere
- ④ visszacsatolás kómszerpályával állítási lehetőség
- ⑤ munkaheugere
- ⑥ visszacsatolás
- ⑦ Turbinalapátok vezérő tolattyúja
- ⑧ munkaheugere
- ⑩ fix csukló

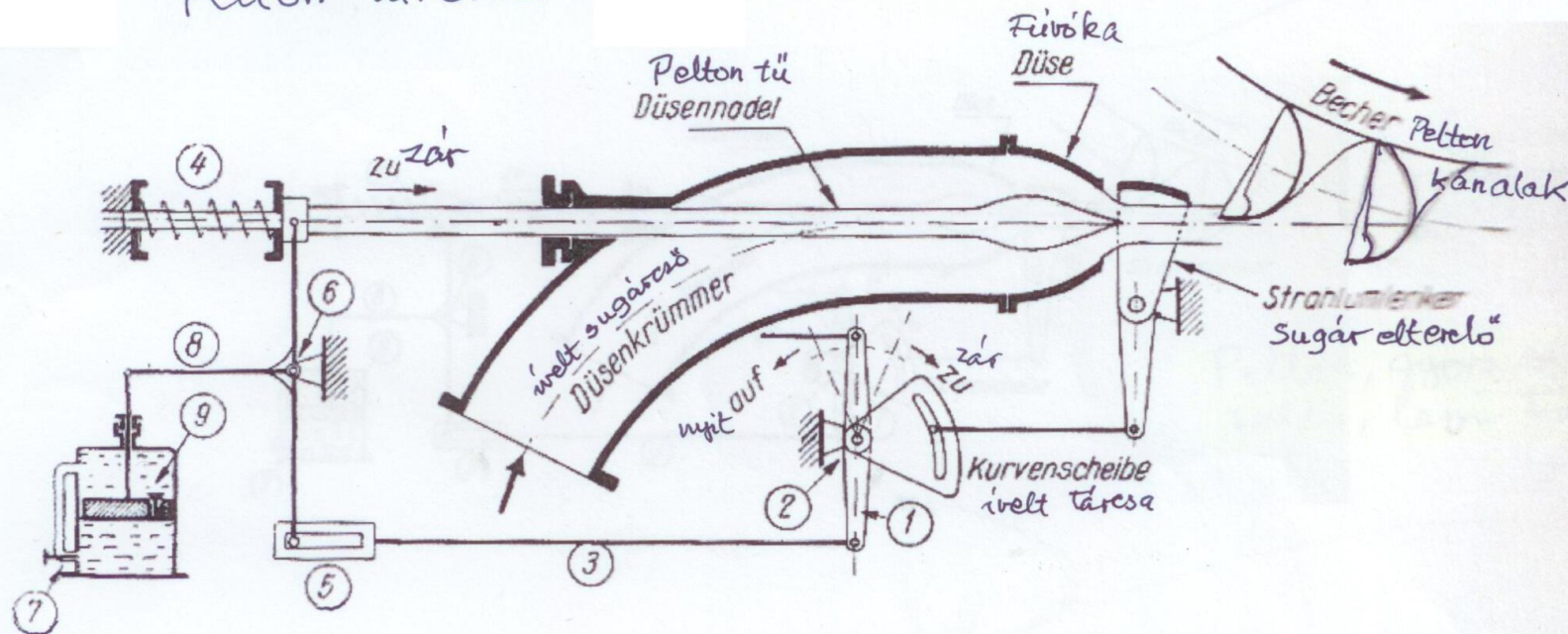
# Turbina szabályzások: Pelton turbina





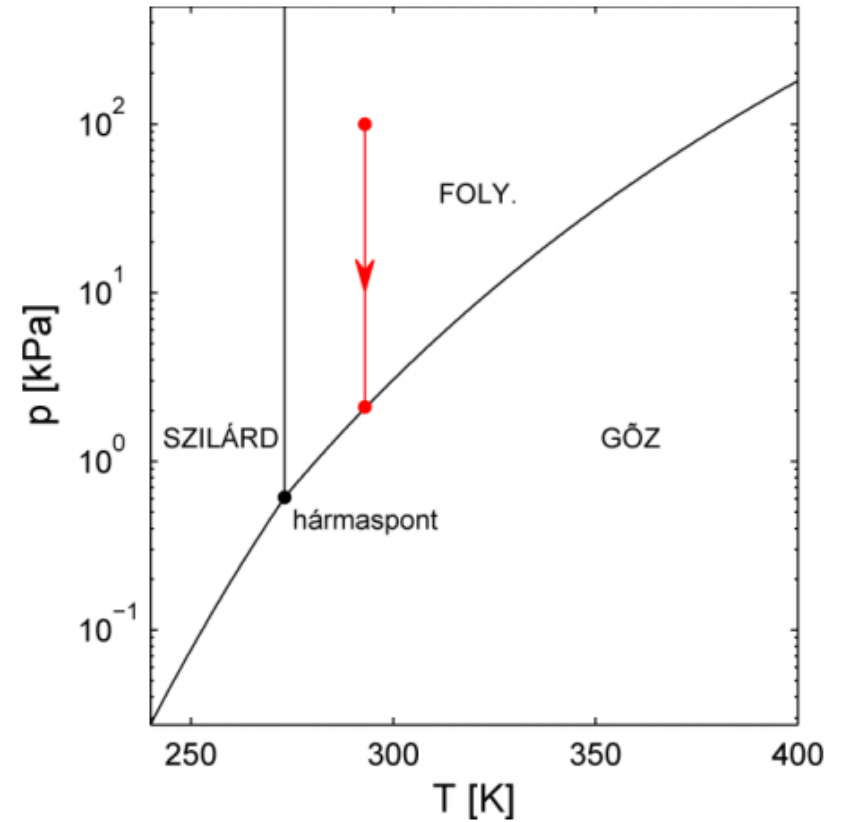
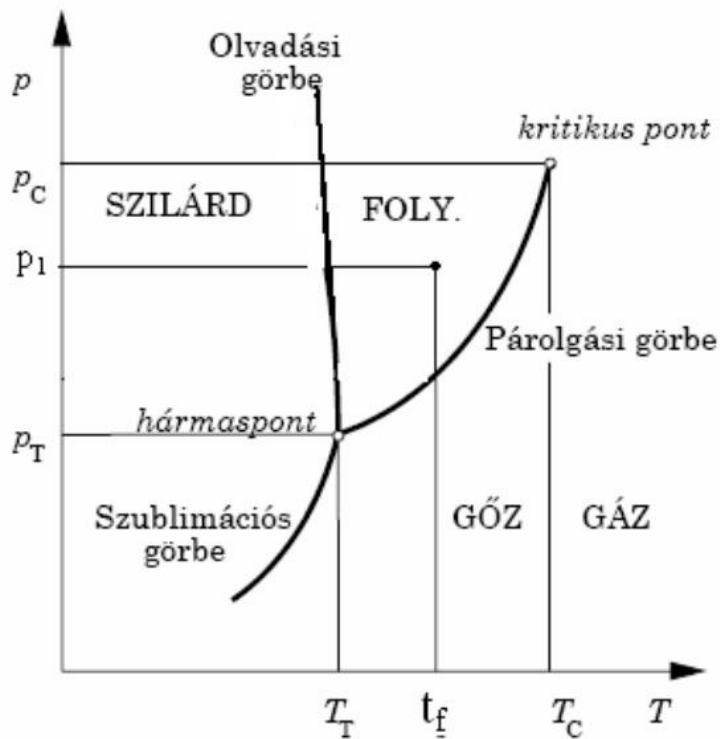
# Turbina szabályzások: Pelton turbina

Pelton turbina



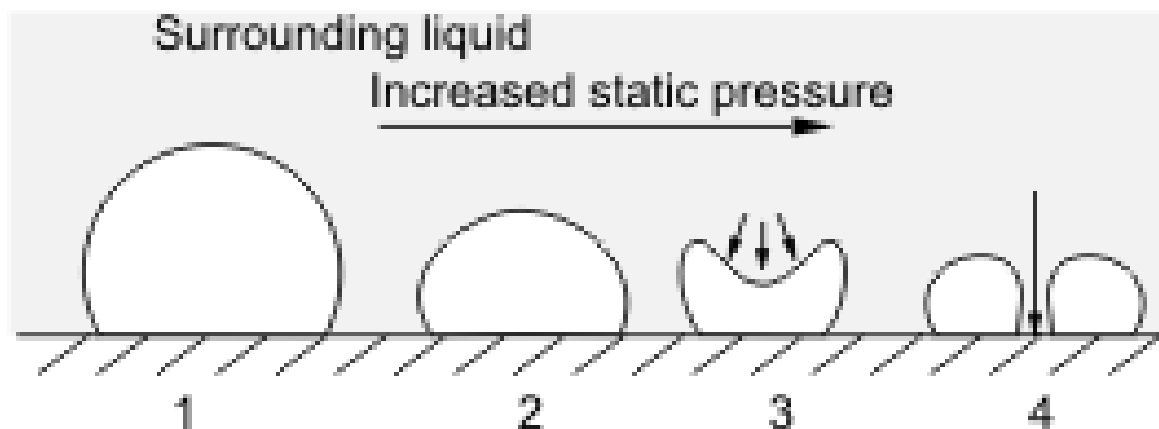
- ① működtető kar
- ② csukló
- ③ összekötő rud
- ④ Peltontűt zárási irányba toló rugó
- ⑤ Peltontű zárását fékező kar
- ⑥ csukló (fix pont)
- ⑦ olajfék szabályzó tüje
- ⑧ hármas menetes összecsisztott rudazat
- ⑨ olajfék, a dugattyú lefelé mozgását engedő szelep

## A víz fázisdiagramja





# Kavitáció, szívóképeség



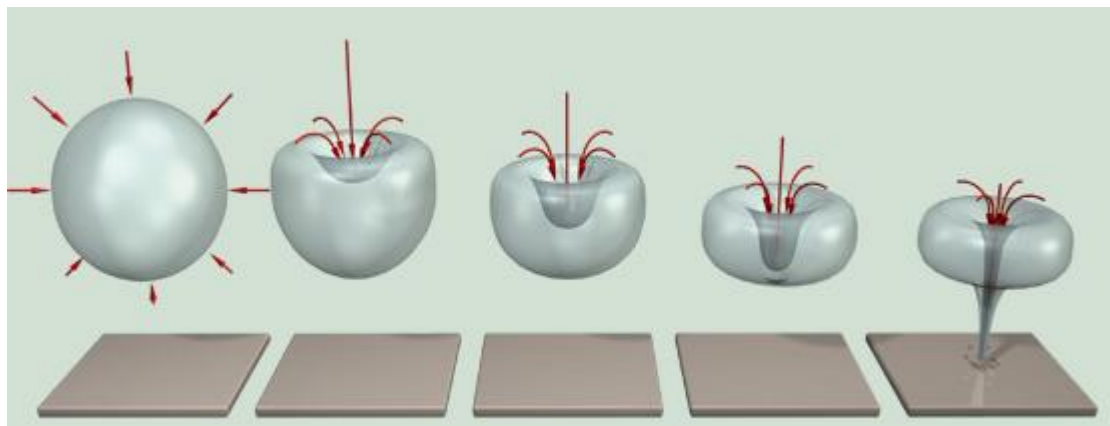
Cavitation bubble imploding close to a fixed surface generating a jet (4) of the surrounding liquid.





# Kavitáció, szívóképeség

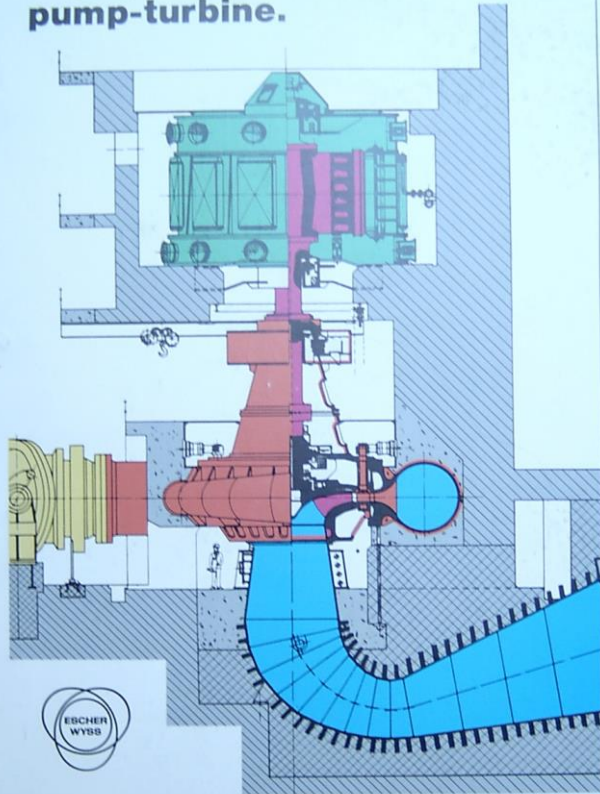
## Kavitációs buborékok – mikrojetek kialakulása



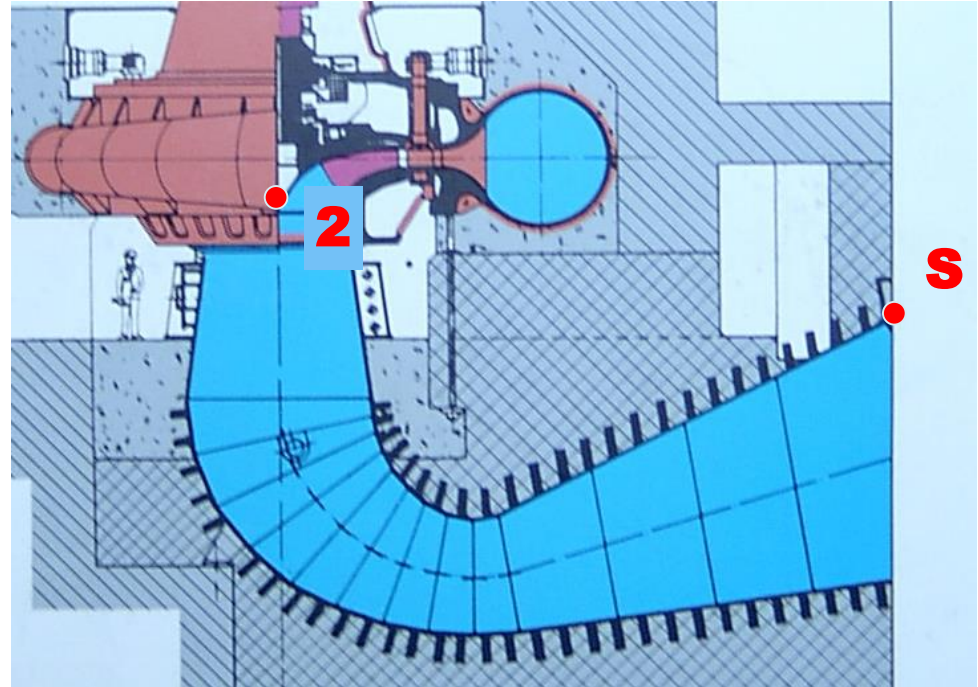


# Kavitáció, szívóképeség

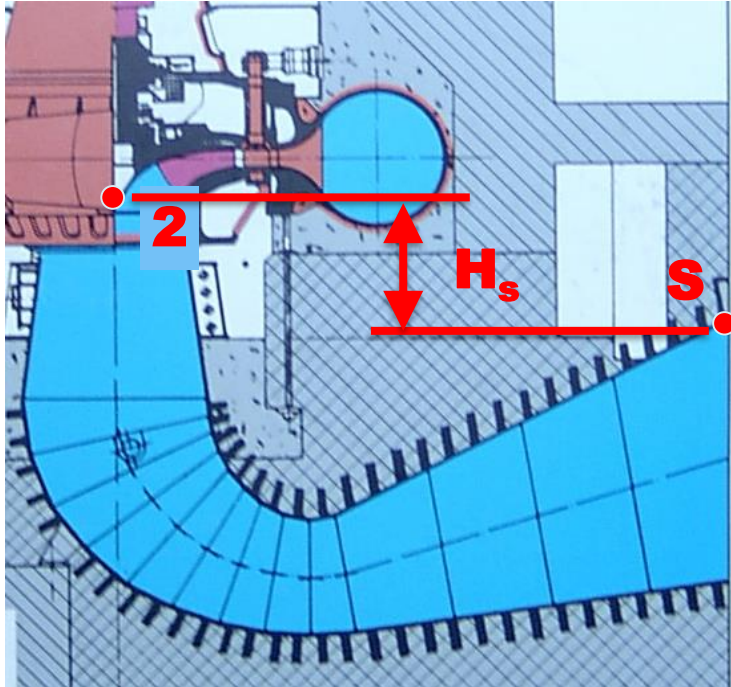
**Presezano (Italy): reversible high-pressure and high-output pump-turbine.**



Head (pumping mode)	501 m
Input (pumping mode)	254 MW
Head (turbining mode)	489 m
Output (turbining mode)	250 MW
Speed	428.6 r.p.m.
Impeller diameter	4309 mm



# Kavitáció, szívóképeség



Szívócsőben csökkentik a távozó közeg mozgási energiáját (diffúzor kialakítás)



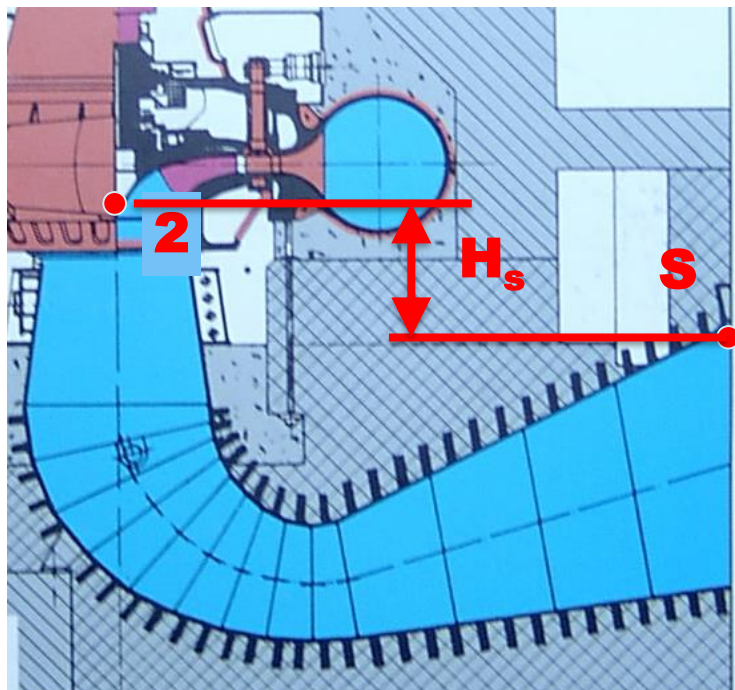
nő a hasznosítható esés

**Bernoulli egyenlet:**  
(„2” és „S” pontok között)

$$\frac{p_2}{\rho g} + H_s + \frac{c_2^2}{2g} = \frac{p_0}{\rho g} + 0 + \frac{c_s^2}{2g} + h'_{\text{szívócső}}$$

$$p_2 = p_0 - \rho g H_s - \frac{\rho}{2} (c_2^2 - c_s^2) + h'_{\text{szívócső}} = p_0 - \rho g H_s - KQ^2$$





Teljesülnie kell az alábbi feltételnek:

$$p_2 = p_0 - \rho g H_s - KQ^2 > p_g$$

Mekkora a nyomástartalék?

- Ezt az esés százalékában fejezzük ki:

$$NPSH_r = \sigma \cdot H$$

- $\sigma$ : Thoma-féle kavitációs szám
- Megengedhető szívómagasság:

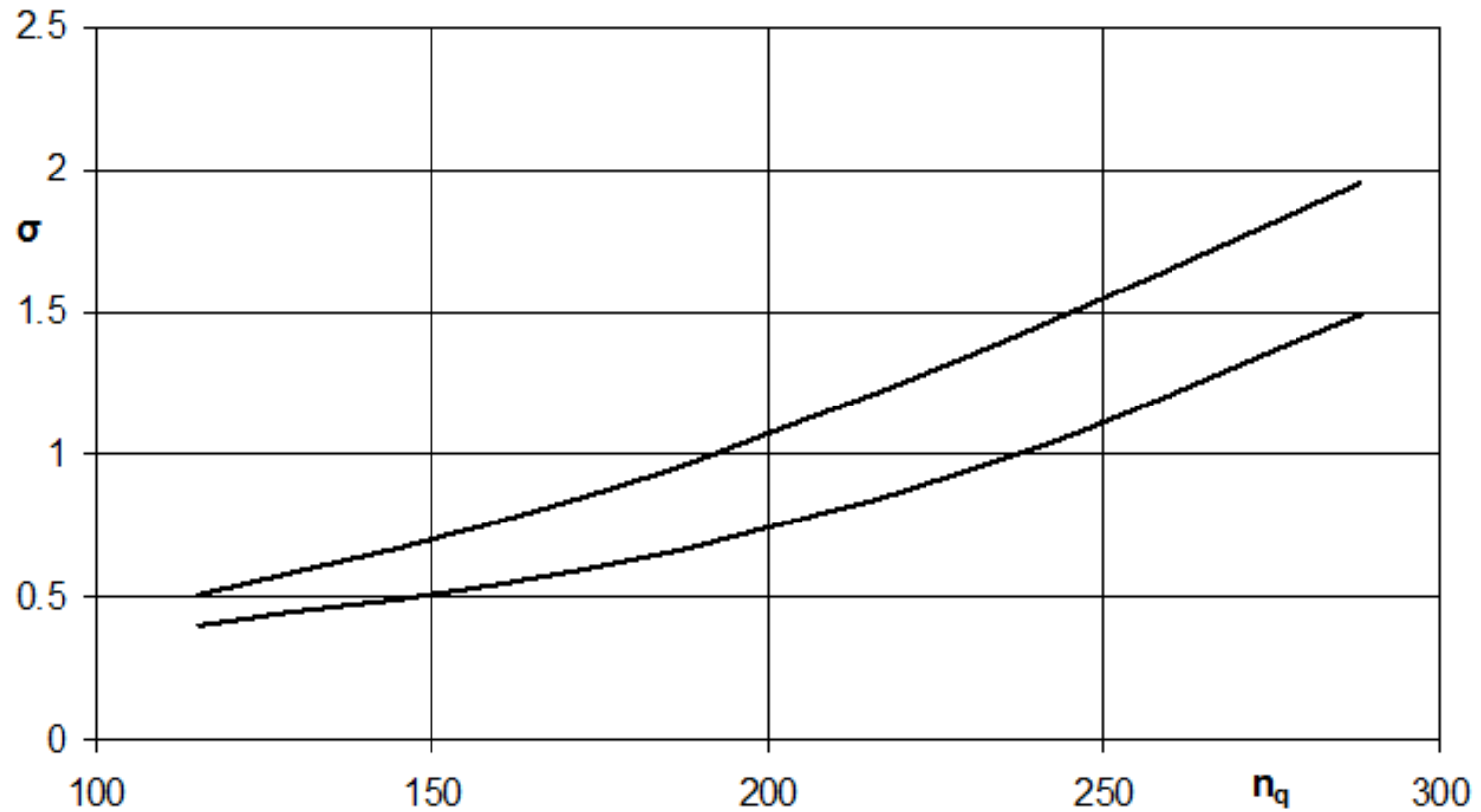
$$H_{s, meg} = \frac{p_0 - p_g - KQ^2}{\rho g} - \sigma \cdot H$$

Ha  $H_s$  negatív, akkor a járókerék az alvíz alatt helyezendő el.



# Kavitáció, szívókéesség

Turbinák  $\sigma$  kavitációs száma a jellemző fordulatszám függvényében





# Kavitáció







# Kavitáció





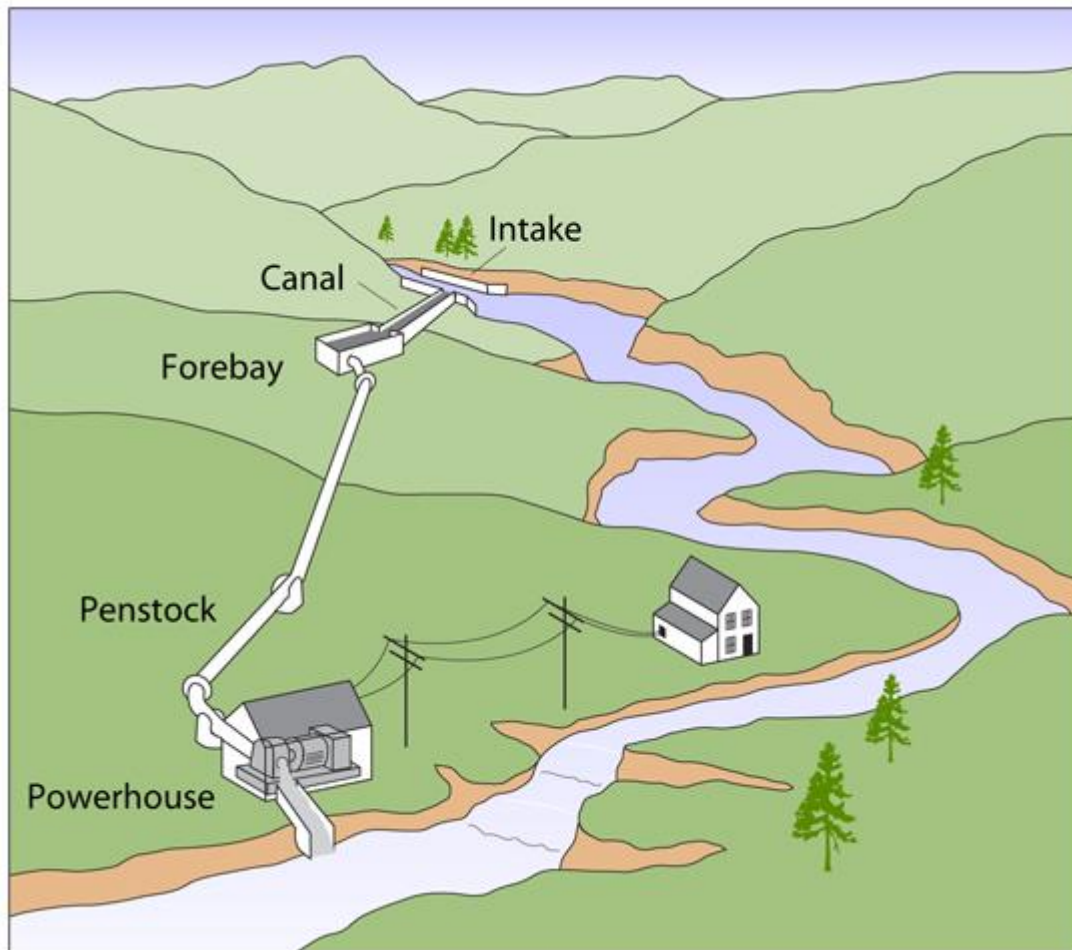
# Kavitáció





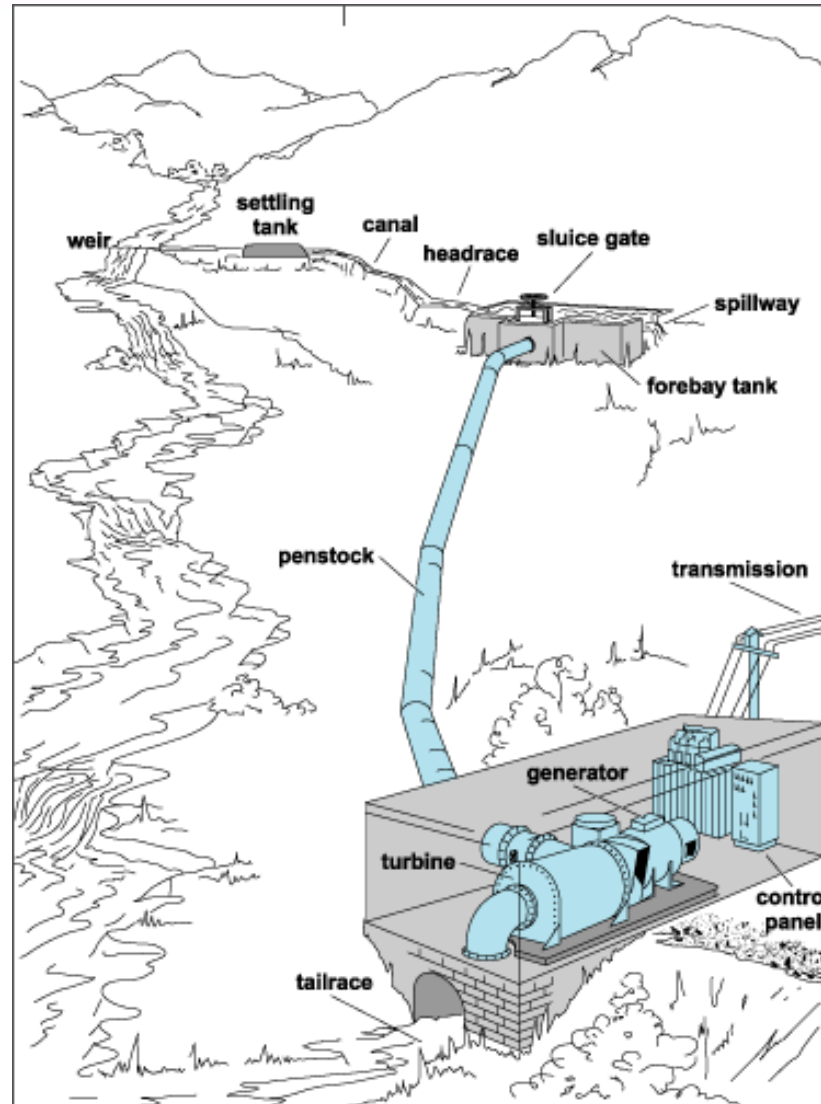
# Törpe vízerőművek, PAT

(Pump As Turbine)



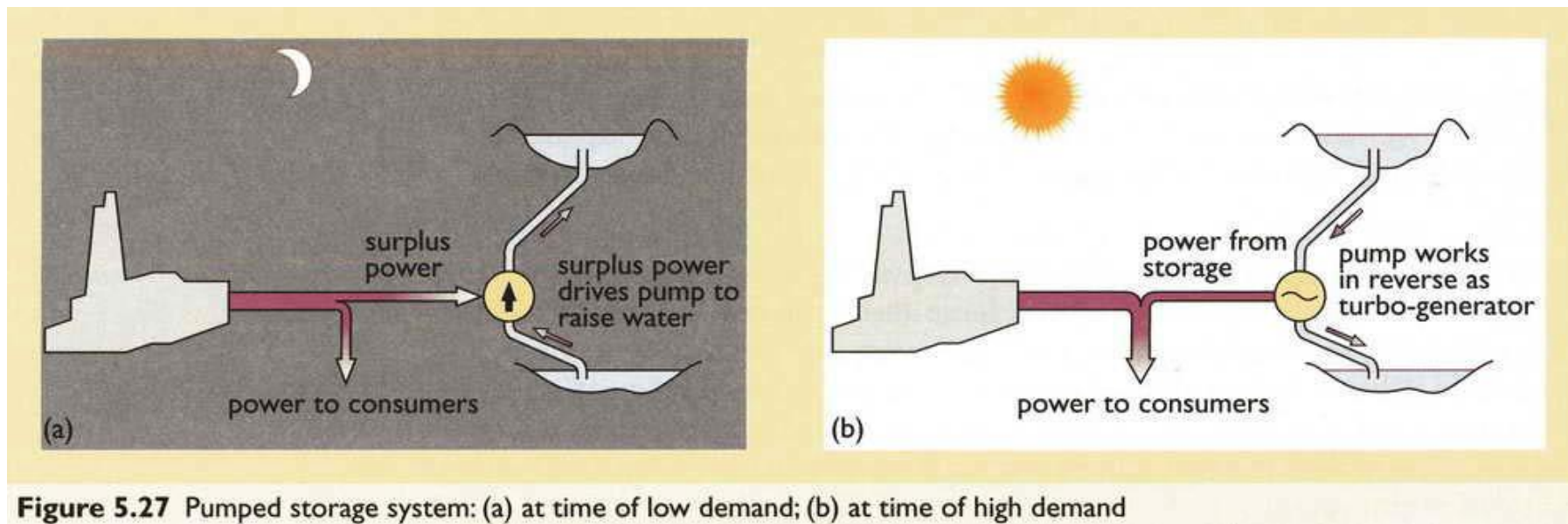


# Törpe vízerőművek, PAT





# Szivattyús vízenergia rendszer

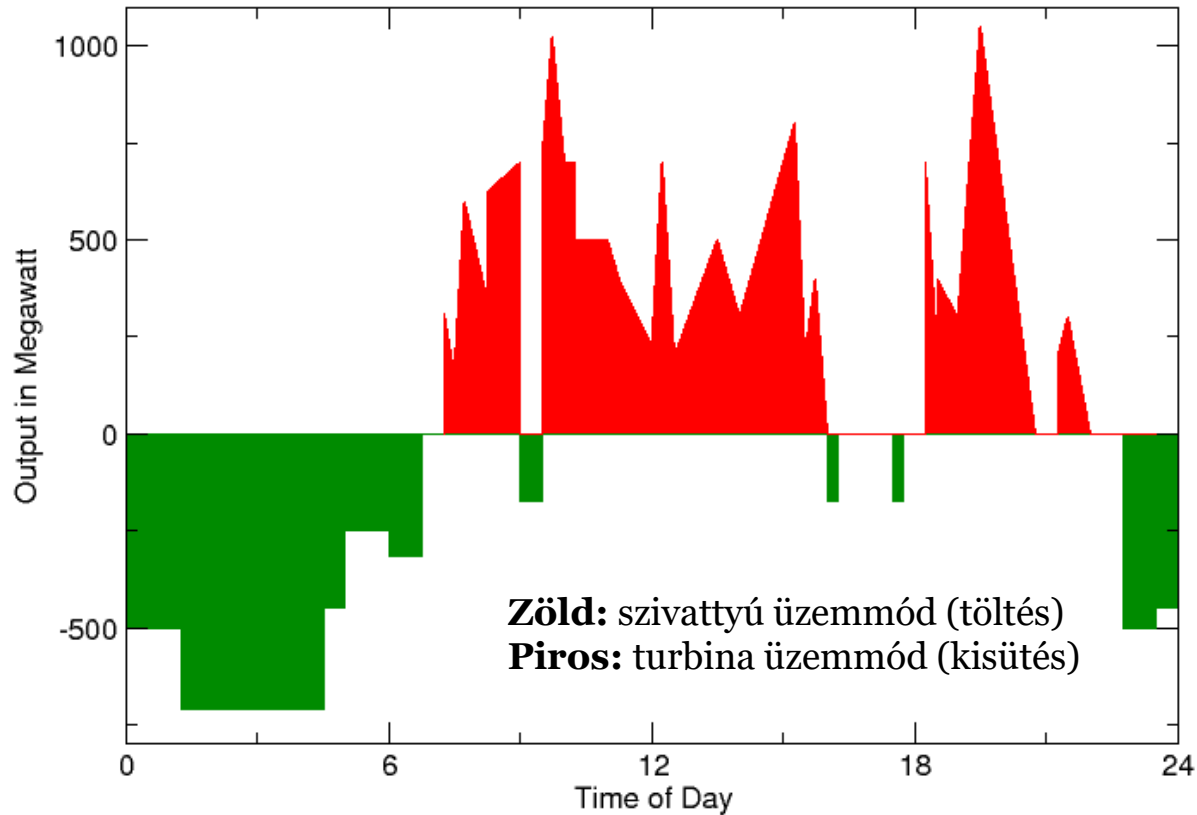


**Figure 5.27** Pumped storage system: (a) at time of low demand; (b) at time of high demand

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



# Szivattyús vízenergia rendszer



*Forrás: Wikipedia*



# Szivattyús vízenergia rendszer

## Goldisthal szivattyús vízerőmű

- Elhelyezkedése: Németország, Thüringia tartomány
- Beépített teljesítmény: 1060 MW
- Felső víztározó: 12 millió m<sup>3</sup>
- Alsó víztározó: 18,9 millió m<sup>3</sup>
- 4 darab Francis szivattyú-turbina (ebből kettő fordulatszám szabályzással)
- Esés: ~300 m
- Gépház a hegy mélyén található barlangban



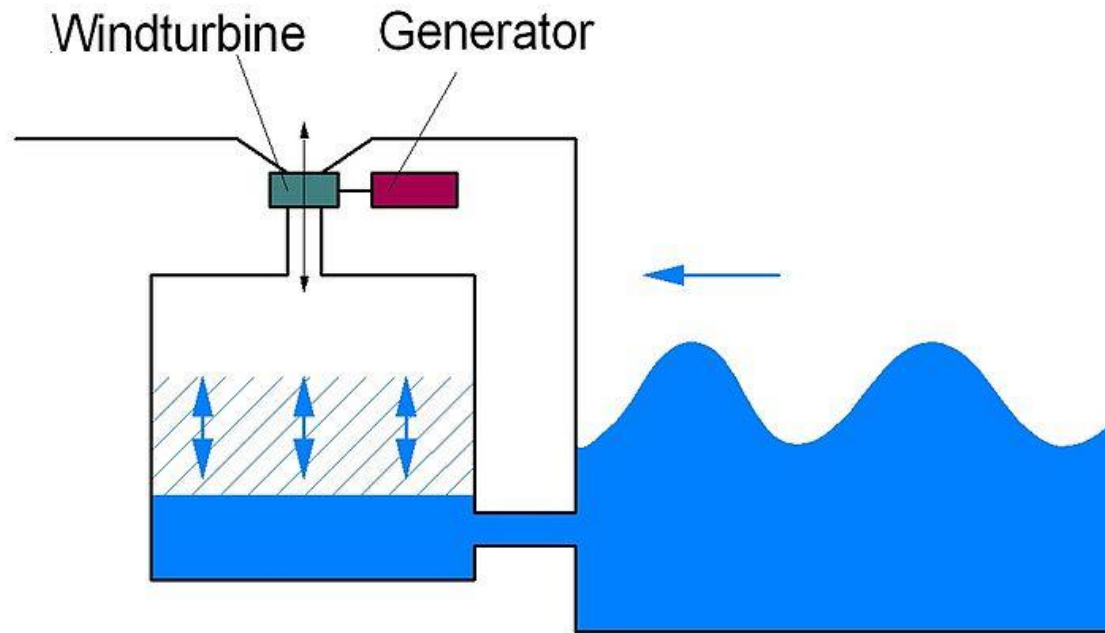
Forrás: <http://www.voith.com/>



# További megoldások

## Hullámerőmű

**(Wells turbina: széliránytól függetlenül egy irányba forog, „átpattan a lapátozás”)**







# További megoldások

## Hullámerőmű





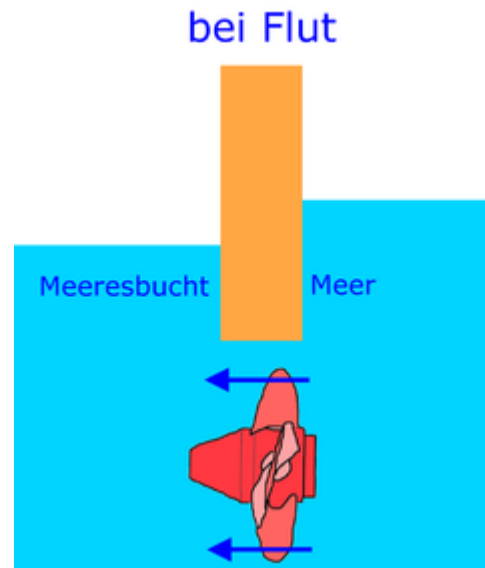
# További megoldások

## Árapály erőmű

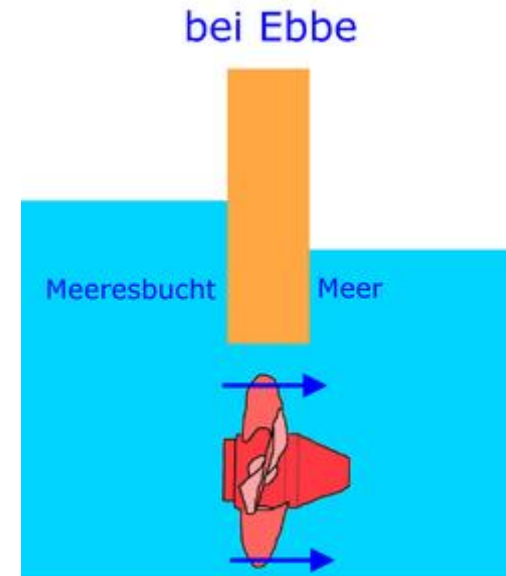
Általános jellemzők:

- A kiváltó ok: Hold (3/4) és Nap (1/4) gravitációs vonzó ereje
- A világtenger szintje akár  $\pm$  3-4 métert is változhat
- Ciklikus, naponta kétszer apály és dagály
- Kiszámítható: nagyon pontosan ütemezhető

### Dagály



### Apály

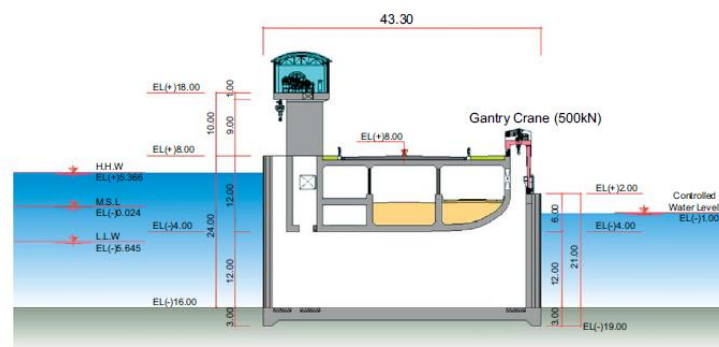
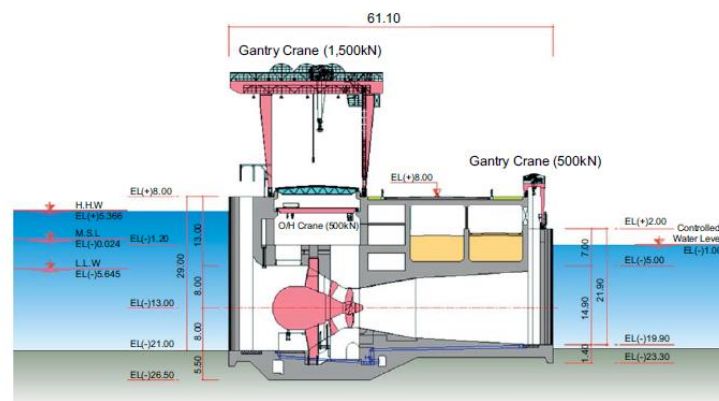
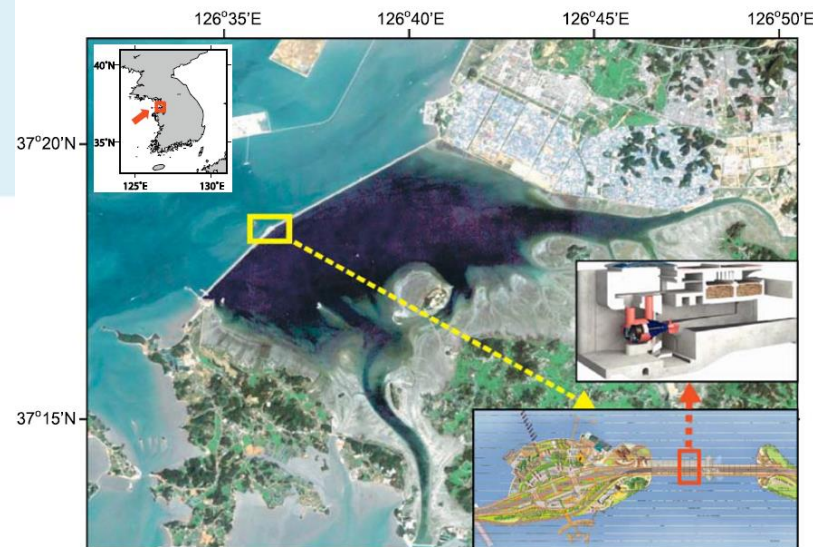




# SIHWA ár-apály erőmű

## • Tervezési adatok

- $H_{\text{névleges}} = 5,82 \text{ m}$
- $Q_{\text{névleges}} = 482 \text{ m}^3/\text{s}$
- „öböl (medence) szintje: -1 m,  
felszíne: 56 km<sup>2</sup>,
- Turbinák: 10 db 26 MW-os
- Csak dagálykor működik
- Minimális esésigény:  $H > 2 \text{ m}$   
E felett be, ez alatt  
kikapcsol
- Indiai-óceán ingadozása:  
-3,5 ... +3 m

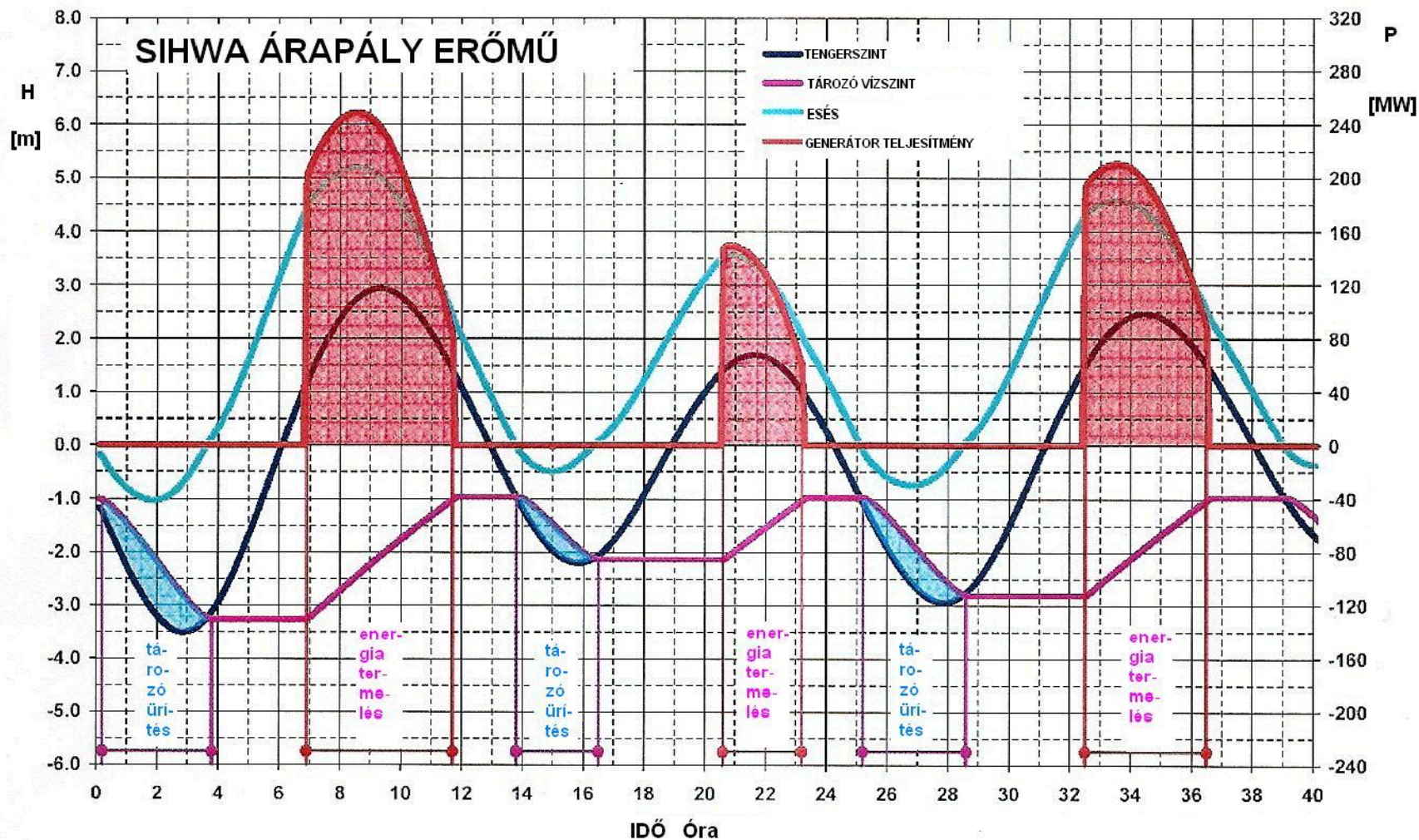


Young HoBae, Kyeong Ok Kim, Byung Ho Choi, Lake Sihwa tidal power plant project, Ocean Engineering 37 (2010) 454–463





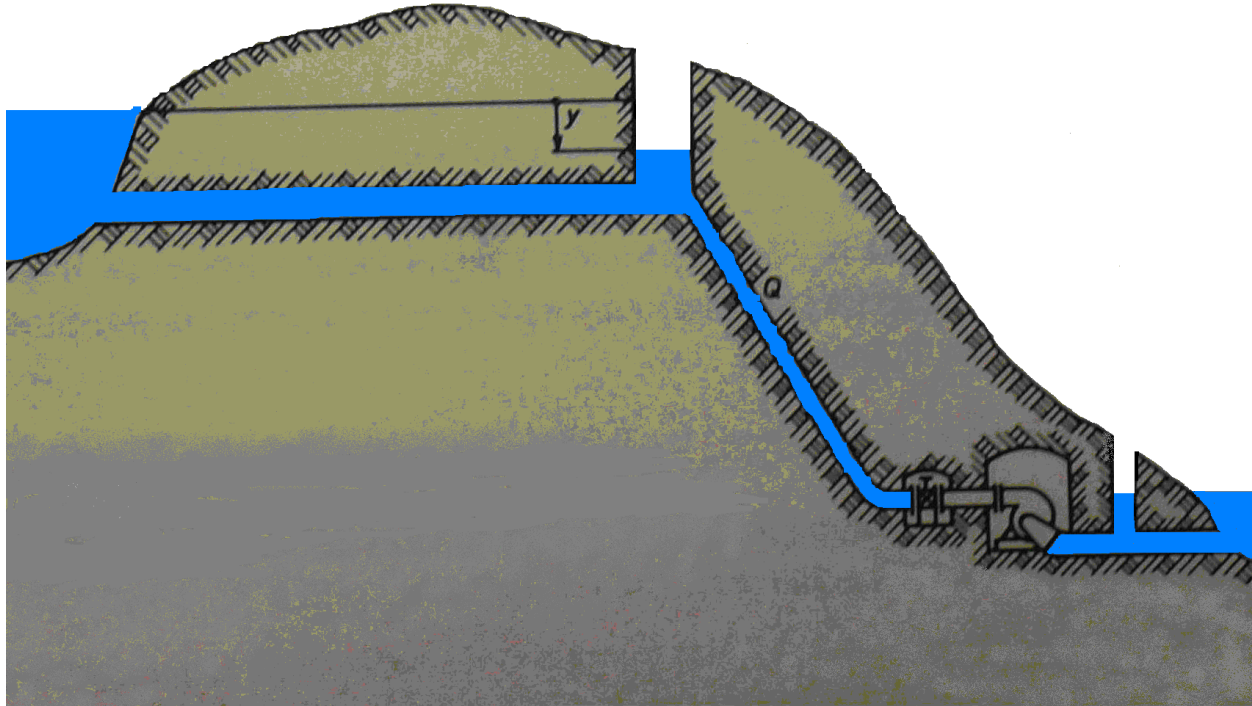
# SIHWA ár-apály erőmű, 40 órás ciklus







# Lengésvédelmi akna



Nagy esésű vízerőmű metszete **lengésvédelmi vízaknával, Francis-turbinával**

(Forrás: J. Raabe, Hydraulische Maschinen und Anlagen, Teil 4, Wasserkraftanlagen, VDI Verlag, 1970)



# Környezeti hatások

## A vízenergia megújuló energia, segíti a

- vízgazdálkodást az erőmű környékén (pl. Tiszalökön ágazik ki a Tiszából a Keleti Főcsatorna)
- kis teljesítmény ingadozásával kiegyenlíti az egyéb megújulókat (szél, nap) kihasználhatóságát
- segíti a hajózást, üdülést
- biztonságos, 1920 óta Európában, 1980 óta Ázsiában nem volt gátszakadás
- nem fogyasztja el az energiaforrását és nem melegíti a folyók vizét
- a folyami vízerőművek gyakran növelik a folyók oxigénbevitelét
- javít(hat)ja a közlekedést, mert a folyami duzzasztógát gyakran hídként is szolgál
- üvegházhatású gázkibocsátása a legkisebb az összes energiaforrás között (az energiafüveké lehet negatív is, mert megkötik a levegőből a CO<sub>2</sub>-t)



# Környezeti hatások

## Ámbár

- társadalmi elfogadottsága kérdéses
- kis mértékben növeli a párolgást a tározókból
- a szennyezett folyóvizek a tározókban bomlanak, ami gáz (főleg metán) felszabadulást okozhat
- gátol(hat)ja a halak vándorlását, halak sérülését okozhatja
- talajeróziót, illetve más folyószakaszokon hordalék lerakódást okozhat.



# Megállapítások / szempontok

1. A folyó [kW/km] vízereje változó, de ennek átlagértéke meghatározható
2. Fontos szempont a tervezett erőmű helyszíne, lakott területektől való távolsága és a villamos hálózathoz való közelsége.
3. A villamos energiaigény az erőmű közelében jelenleg és várhatóan a jövőben.
4. A folyóvölgy topográfiája.
5. A helyszín geológiája, a talaj szerkezete.
6. Meglévő vízügyi létesítmények a helyszín közelében: további erőművek, duzzasztóművek, gátak, belvízátemelő telepek, szivattyútelepek, öntöző rendszerek.
7. Közlekedési létesítmények.
8. Kis esésű erőműveknél a felvízi tározó lehetséges méretei és jövőbeni hasznosíthatósága.





# Megállapítások / szempontok

9. Az energiatermelés melletti egyéb hasznosítási lehetőségek – hajózás, öntözés, vízművek – létesítése ezek bevétele ugyanis javíthatja a megtérülést.
10. Ha a folyó még nincs kiépítve, akkor a teljes erőműrendszert egyszerre kell megtervezni.
11. Környezeti szempontok figyelembe vétele, műemlékek megőrzése (Ada Kaleh sziget a Vaskapu erőmű fölött, Mosel 12 erőművel megvalósult lépcsőzése), történelmi városrészek megőrzése. A talajvízszint emelkedését szádfalakkal lehet meggátolni.
12. Üzemvíz csatornás kis, vagy nagy esésű erőműveknél a régi folyómeder vízellátásáról gondoskodni kell (Szigetközi kis Duna). Utólag beépített fenékküszöbökkel vagy zsilipekkel kell a vízpótlást biztosítani. Gondot okoz, ha az árvizet a régi mederbe kell hirtelen beengedni.

A large dam with water cascading over it, with a building in the foreground and hills in the background. The dam is a long, dark structure with many spillways. The water is a deep blue color. In the foreground, there is a building with a blue roof and a stone wall. The background shows green hills under a clear blue sky.

**Köszönöm a figyelmet!**