

Vízerő hasznosítás

Készítette: Dr. Kullmann László, Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék

1. és 3. előadás anyaga

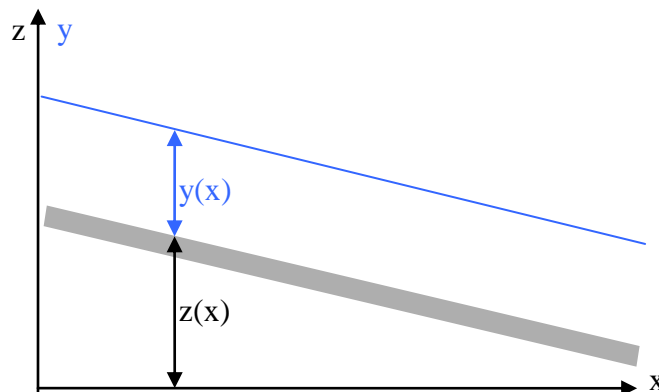
A vízgazdálkodás területei

vízkárelhárítás	vízhasznosítás
vízrombolás elleni védelem	egészségügy
árvízmentesítés	ivóvíz
folyószabályozás	sport
hordalék visszatartás	közlekedés (árú-, személyszállítás)
káros vizek elvezetése	csatornázás (folyók között)
víz tisztaság megóvása (olaj, cián, habkeltők)	ipari hasznosítás
	vízellátás
	öntözés
	halászat
	vízerő hasznosítás

A vízerőhasznosítás tehát a vízgazdálkodás része.

A vízerőhasznosítás alapelve: A víz levezetéséhez szükséges vízfelszín lejtésének csökkentése, így a felvív és alvív oldal között szintkülönbség (esés) létrehozása és annak energetikai hasznosítása.

Természetes vagy mesterséges szabad felszínű vízfolyások energetikai elemzése:



A folyómeder geodetikus magasságát az alapszint felett jelöljük z -vel, ez a folyó hosszirányú x koordinátájának függvénye. A vízmélységet az adott x szelvényben jelölje $y(x)$.

A meder esését jelöljük i -vel, ez az érték a $z(x)$ függvény differenciálhányadosának ellentettje:

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

A felszín leíró $y(x)$ függvény differenciálegyenlete a következő:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{i - J(Q, y, n)}{1 - Fr^2}, \quad (1)$$

itt J -vel jelöljük a meder ellenállását, ami a Q vízhozam, az y vízmélység és az n mederellenállást jellemző paraméter függvénye. A nevezőben a Froude-számot Fr -rel jelöltük, értéke folyók esetén mindig kisebb, mint egy, így a nevező pozitív. Az (1) egyenletből nyilvánvaló, hogy adott mederesés esetén akkor lesz a vízmélység állandó, ha a J mederellenállás éppen megegyezik a meder i esésével. Ezt nevezik **normál vízmélységnek**, minden térfogatáramhoz tartozik egy normál vízmélység. Ha azt akarjuk elérni, hogy a vízfelszín kevésbé lejtjen, mint a mederfenék, azaz energetikailag hasznosítható esés jöjjön létre, akkor

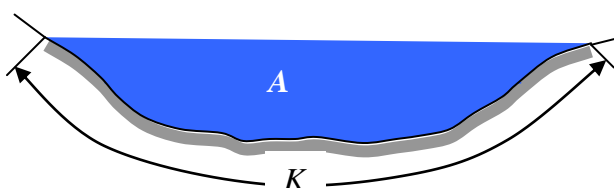
- a felszínt duzzasztani kell **duzzasztóművel**, vagy
- a vizet **üzemvíz csatornába** kell vezetni, ahol az n mederellenállás csökken.

Akár kis esésű, folyami, akár nagy esésű hegyvidéki erőtelepet terveznek, e módszerek egyikét alkalmazzák.

Az (1) egyenletbeli J mederellenállás számítási módja:

$$J = \frac{Q^2}{A^2 C^2 R_h} = \frac{n^2 Q^2}{A^2 R_h^{4/3}}. \quad (2)$$

Itt A jelöli a mederszelvényben a vízzel kitöltött területet, R_h pedig a hidraulikai sugár, melynek definíciója: $R_h = A/K$, itt K az ún. nedvesített kerület:

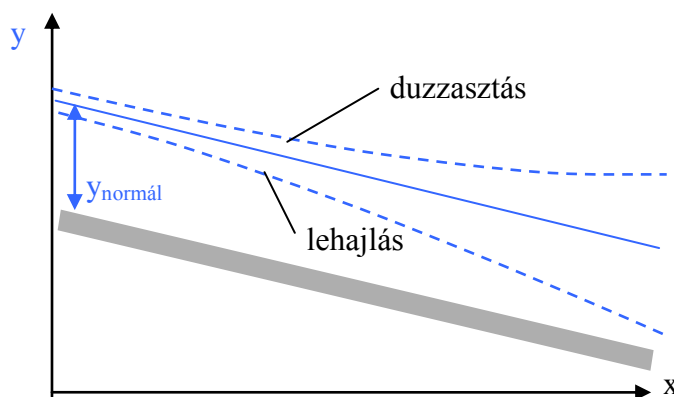


A fenti mederellenállás képlet és a hosszegységre eső csőbeli áramlási veszteségmagasság analóg fogalmak, így belátható, hogy: $\lambda = 8gn^2 / R_h^{1/3}$.

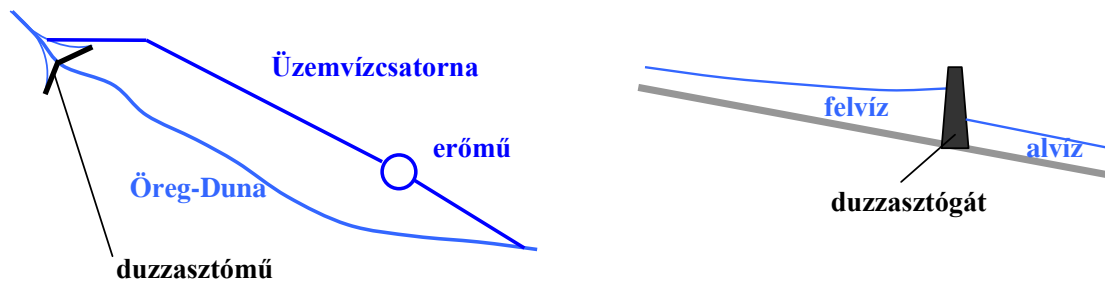
Érdeemes kiszámítani egy D átmérőjű, kör keresztmetszetű cső hidraulikai sugarát:

$$R_h = \frac{A}{K} = \frac{D^2 \pi}{4 \cdot D \pi} = \frac{D}{4} = \frac{D/2}{2}, \text{ azaz a hidraulikai sugár a cső sugarának fele.}$$

A normál-vízmélységtől eltérő, annál nagyobb induló vízszint esetén a folyó duzzasztásáról van szó, annál kisebb induló vízmélység esetén pedig a vízfelszín lehajlik:



Visszatérve a folyami vízerőtelepek alapvető energiahasznosítási lehetőségeire egy-egy példa a bős-gabcikovói, illetve a tiszalöki típusú erőmű. Előbbit a kép bal oldalán felülnézetben, utóbbit a kép jobb oldalán metszetben mutatja az alábbi ábra:



Vízenergia potenciál

A vízenergia potenciál alapja az E_{cs} csapadékpotenciál, melynek mértékegysége [MJ/év]. Egy A_i felületre lehulló évi cs_i [mm] csapadékmennyiség helyzeti energiája a talajra érskor, ha a talaj geodéziai magassága H_i az

$$E_{cs,i} = \rho \cdot g \cdot A_i \cdot cs_i \cdot H_i$$

képletből határozható meg. A teljes csapadékpotenciál egy $A = \sum A_i$ felületre az elemi potenciálok összege. A csapadék egy része beszívódik a talajba, más része azonnal elpárolog, a maradék folyik le a vízfolyásokba. A magasság helyett a létesítendő erőmű alvíz szintje feletti magasságkülönbségnek van csupán értéke, így az ideálisan kihasználható vízerőpotenciál a csapadékpotenciálnak csak kis tört része.

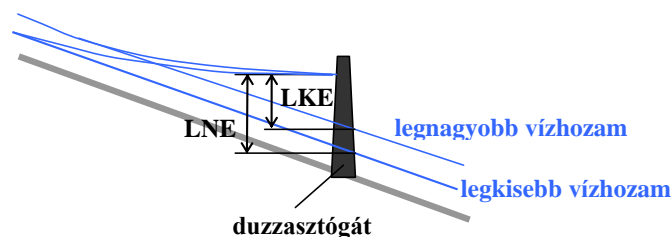
A ténylegesen hasznosítható vízerőkészletet vízfolyásonként kell összegezni. A létesítendő erőmű felett a legközelebbi mellékfolyóig, városig tarthat legfeljebb a folyó visszaduzzasztása. A megépítendő gátak koronájának magassága megadja a duzzasztási szintet. A gát alatt, az alvíz oldalon a folyó vizét tovább kell vezetni, az alvízszint a pillanatnyi vízhozam függvénye. A duzzasztott felvív és az alvíz szintkülönbsége a H esés. A vízerőtelep bevezetett hidraulikai teljesítménye tehát

$$P_{be,h} = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H [\text{W}] = Q \cdot 1000 \cdot g \cdot H [\text{W}] = 9.8 \cdot Q \cdot H [\text{kW}].$$

A megtermelhető villamos teljesítmény ennek turbina és generátor hatásfok-szorosa, a két hatásfok szorzatának becült értéke miatt a 9.8 szorzó helyett a hasznos villamos teljesítmény közelítőleg

$$P_{h,vill} = 8 \cdot Q \cdot H [\text{kW}]. \quad (3)$$

Láttuk, hogy a H esés a fel- és al-víz szintkülönbsége és függ a folyó pillanatnyi Q vízhozamától. A legkisebb vízhozam (**LKV**) esetén kapjuk a legnagyobb esést (**LNE**) és fordítva, az esés akkor a legkisebb (**LKE**), ha a vízhozam a legnagyobb (**LNV**).

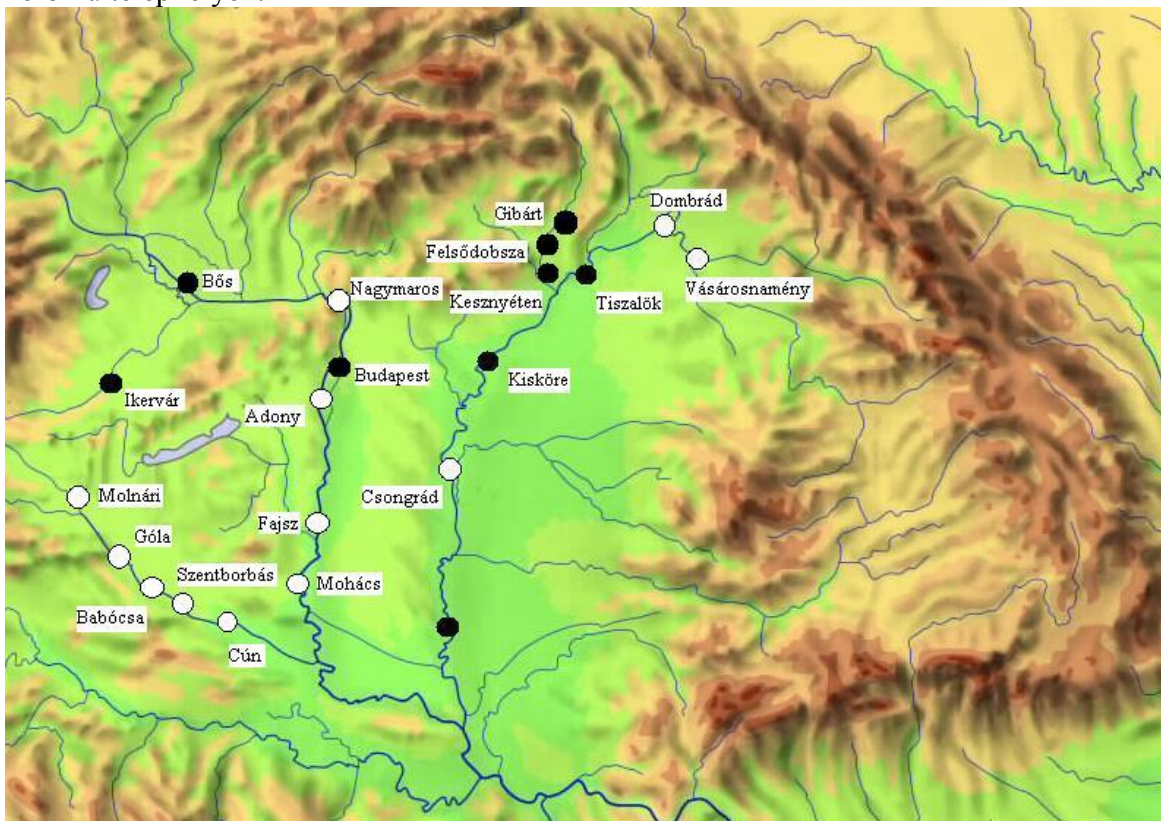


Magyarország vízerőképlete

A főbb magyarországi folyók elméleti vízerőképlete az alábbi (forrás:Lakatos-Ötvös-Kullmann: A hazai vízenergia potenciál elméleti és reális értékeinek közelítő meghatározása, Energiagazdálkodás, 45, 6, 2004.)

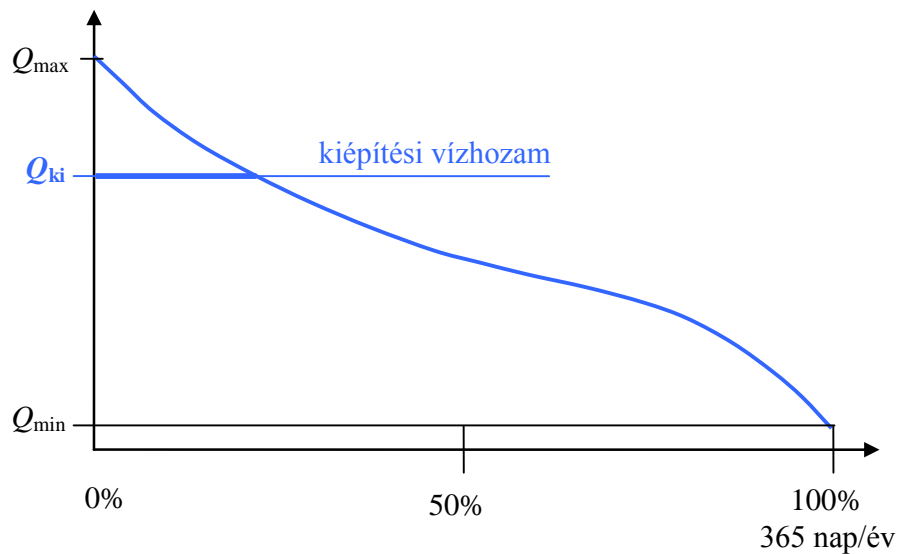
Folyó(k) neve	Elméleti vízerőképlet [GWh/év]
Duna	5348
Tisza	708
Dráva-Mura	756
Rába	187
Hernád	139
Többi	308
összesen	7446

Az alábbi Kárpát-medence térképen láthatók a megépített (●) és műszakilag megépíthető (○) vízerőmű telephelyek.



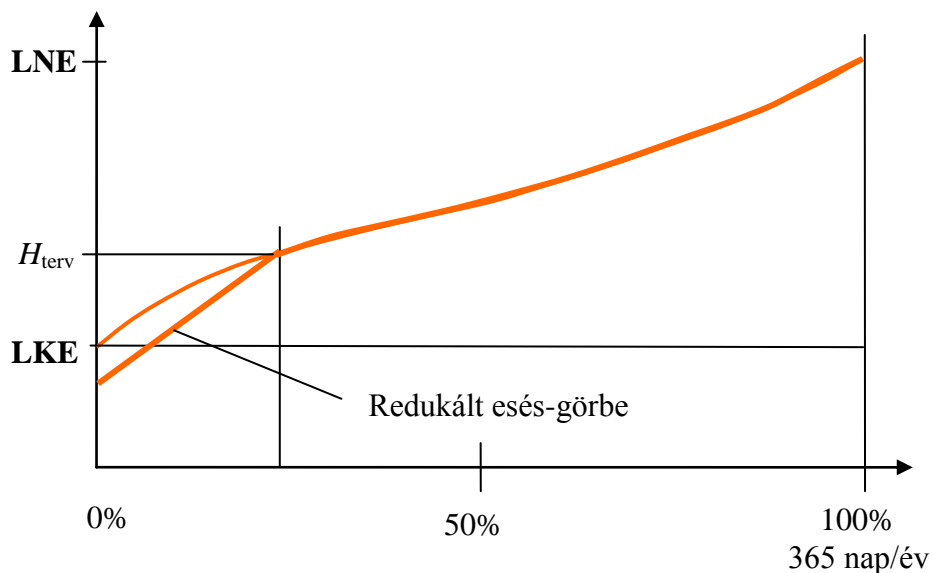
Jelenleg az energetikai lobbyérdekek miatt nincs esélye újabb jelentős vízerőmű megépítésének, néhány erőmű terve készen áll. Az EU előírásai szerint a következő 20 évben Magyarországnak is jelentősen növelnie kell a megújulók arányát a teljes hazai energiatermelésen belül, így várhatóan a figyelem ismét e terület felé fordul. Számos helyen a világban jelenleg is építés alatt állnak nagyteljesítményű vízerőművek, például Izlandon egy 700 MW névleges teljesítményű vízerőmű épül. Kínában, a Yangtse-folyón pedig már elkészült a Three Gorges erőmű 14 egyenként 700, összesen 9800 MW turbinája, teljesítménnyel, amit további 12 turbina üzembe helyezése követett. Így az erőmű teljes kapacitása 18,2 GW.

Egy folyó vízhozama napról napra változik, de éves átlagban hasonló időbeli eloszlást követ. Az adott folyószakaszra jellemző vízhozam tartóssági görbe tipikus alakja az alábbi:



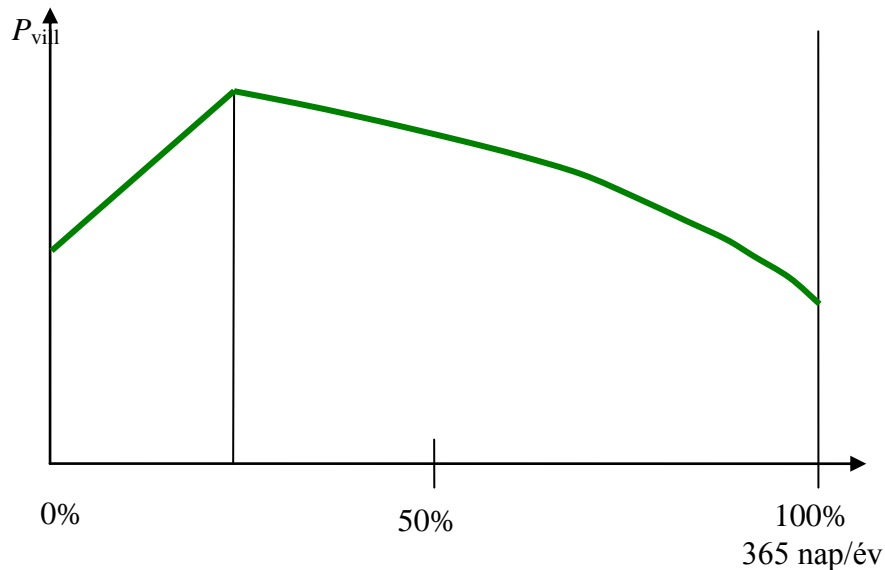
Az ábrába berajzoltuk a kiépítési vízhozamot is, az ennél nagyobb, árvízi vízmennyiség Q_{ki} feletti feleslegét hasznosítatlanul átengedik a zsilipeken, az ennél kisebb vízhozamokat a turbinákon teljes egészében hasznosítják (természetesen például a hajózási zsilipeken – lásd később – ilyenkor is van vízvesztés).

A vízhozam tartóssági görbéhez – megtervezett **duzzasztási szint** esetén – megszerkeszthető az eséstartóssági görbe is. Az év minden napján rendelkezésre áll az $LKV=Q_{\min}$ vízhozam, ehhez tartozik a legnagyobb esés (**LNE**), az $LNV=Q_{\max}$ vízhozamhoz a legkisebb esés (**LKE**).



A kiépítési vízhozamhoz tartozó esés a H_{terv} tervezési esés. Ennél kisebb esések esetén a turbinák nem dolgoznak optimális üzemállapotban, ezért a megnövekedett veszteségeket az esés redukciójával lehet figyelembe venni. A $H_r = 1,5 H - 0,5 H_{\text{terv}}$ képlet szerint, ezt ábrázolja a „Redukált esés-görbe” nevű vonal.

Így végül a megtervezett duzzasztási szint és a Q_{ki} kiépítési vízhozam, mint két tervezési adat ismeretében a (3) képletből az év napjaira megszerkeszthető a teljesítménytartóssági görbe, mint a vízhozam- és az esés-tartóssági görbe szorzata, melynek integrálja a teljes esztendőre a megtermelhető villamos energiát adja:



Változtatva a tervezett duzzasztási szintet és a kiépítési vízhozamot a megtermelhető villamos energia is változik. A tervezett duzzasztási szint növelése jelentős beruházási költségnövekedést okoz. A tervezés során keresik a beruházási költség és a megtermelhető villamos energia piaci értékének hányadosát, a fajlagos költséget. Ennek minimumához tartozik az optimális terv.

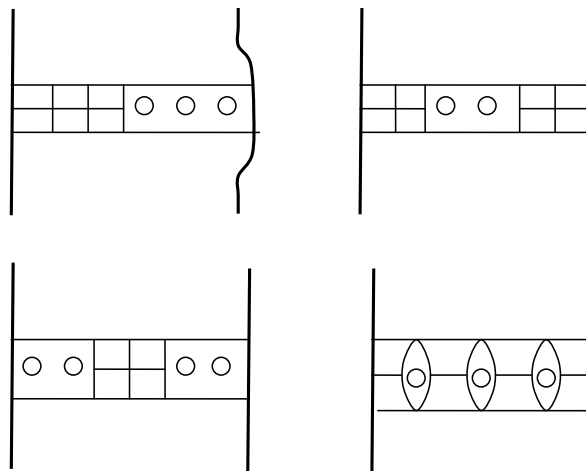
Folyami vízerőtelepek főbb típusai

A kis esésű, folyami erőtelepek típusai az alábbiak

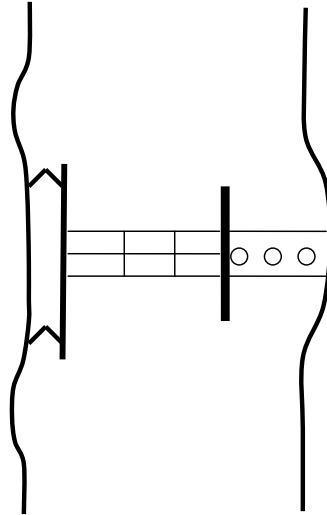
öblözetbe épített
megosztott

szigetszerű
pillérbe épített

Ezek a típusok vázlatosan felülnézetben az alábbi ábrán láthatóak.



Az öblözetbe épített erőtelep típust az alábbi ábrán részletesebben is bemutatjuk. Az ábrán látható a duzzasztóművön és a tőle pillérrel elválasztott – a kis körökkel jelzett – turbinákon túl a hajósilip is.

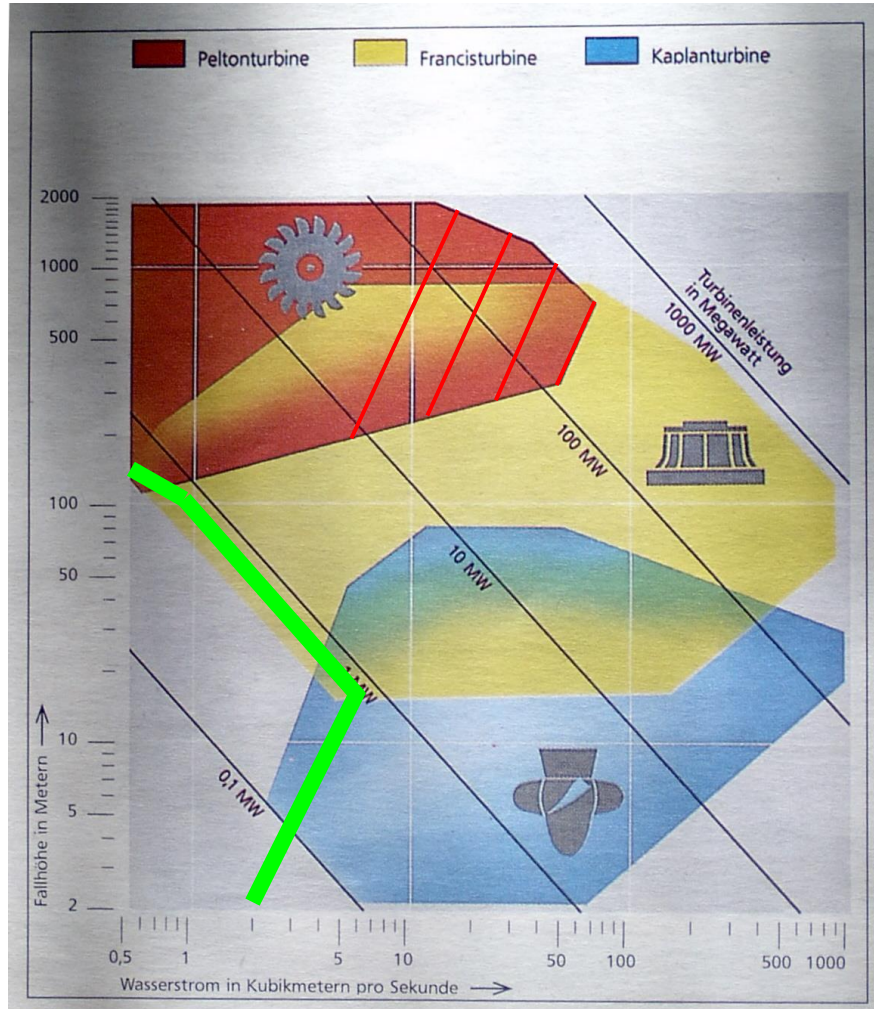


A vízerő hasznosítás története

1732	Bernoulli	A „reakcióelv” felismerése
1750	Segner János András	A reakcióelv alkalmazása a Segner kerékben
1754	Euler	Az Euler turbinaegyenlet megfogalmazása
1827-33	Fourneyron	Radiális – centrifugális - turbinakonstrukció
1841	Henschel/Jonval	Axiálturbina szívócsővel
1846	Pelton	Szabadsugár (Pelton)turbina
1849	Francis	Radiális – centripetális turbinakonstrukció
1878	Fink	Francis turbina vezetőlapát állítása Fink gyűrűvel
1903/1907	Mitchell/Bánki Donát	Kettős átömlésű határturbina – Bánki turbina
1913	Kaplan	Propeller turbina állítható járókerék lapátokkal
napjainkban		Pelton turbina ~ 200 MW Francis turbina ~ 500 MW Kaplan turbina ~ 150 MW

Turbinatípusok

Az alábbi diagram a Q [m³/s]térfogatáram – H [m]esés koordinátarendszerben mutatja be a különféle turbinatípusok alkalmazási területét és az állandó teljesítmény vonalakat.



Magyar szempontból érdekes a Bánki-turbina alkalmazási területe is, ezt **zöld** vonallal határoltuk körül. A négy **piros** vonal a Pelton turbina sugárcsöveinek számát mutatja, a baloldali vonaltól balra 1 sugárcső bocsátja a vizet a Pelton turbina lapátkerekére, majd 2, 4 végül 6 sugárcsövet alkalmaznak a vonalak közötti üzemi tarományokban.

Szokás a turbinatípusokat az Áramlástechnikai gépek c. tárgyban megismert n_q jellemző fordulatszám értékével is megkülönböztetni.

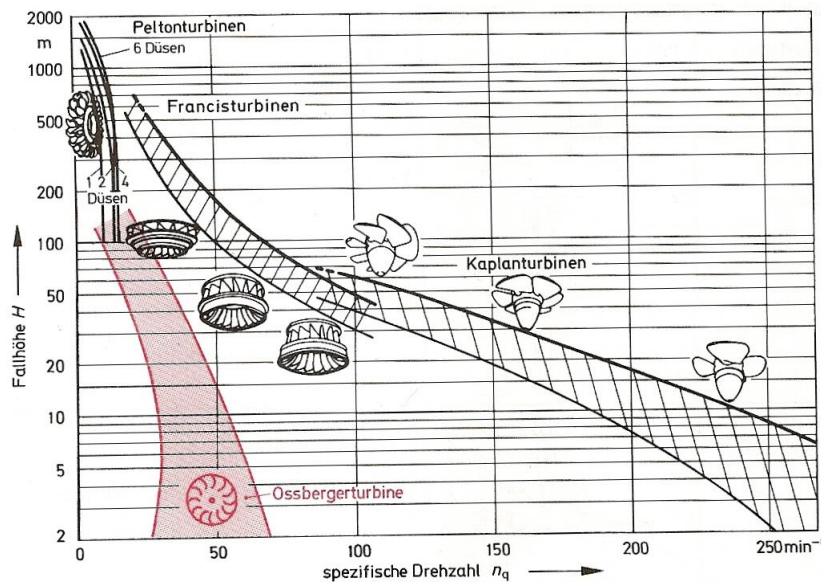
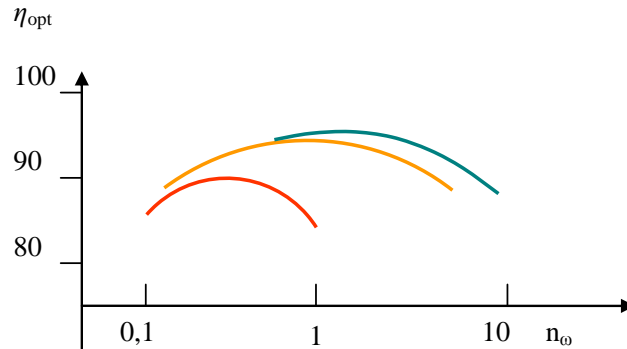
A jellemző fordulatszám:

$$n_q = \frac{n \cdot Q_{opt}^{1/2}}{H_{opt}^{3/4}} \quad (4)$$

Mivel a (3) képlet szerint $Q = P_h / (8 \cdot H)$ és $n = 60 \cdot \omega / (2\pi)$, így a jellemző fordulatszám átalakítható.

$$n_q = \frac{60}{2\pi\sqrt{8}} \frac{\omega\sqrt{P_{h,opt}}}{H_{opt}^{5/4}}, \quad \text{innen } n_\omega = \frac{\omega\sqrt{P_{h,opt}}}{H_{opt}^{5/4}}, \quad \text{használják az } n_s = \frac{n\sqrt{P_{bev,opt}}}{H_{opt}^{5/4}} \text{ értéket is.} \quad (5)$$

Legkisebb a jellemző fordulatszáma a Pelton turbinának, ezt követi a Bánki turbina, majd a Francis, végül a Kaplan turbina. Az elérhető hatásfok maximum (a színek megegyeznek az előző ábra színeivel **Pelton, Francis, Kaplan**)



Turbina típusok az n_q jellemző fordulatszám és a H esés függvényében.

A Bánki turbinát a német Ossberger továbbfejlesztette, így e típus róla is el van nevezve.

Víz turbinák, mint örvényelven működő áramlástechnikai gépek alapvető egyenlete az Euler turbinaegyenlet. A kinyerhető elméleti – súlyegységre eső – fajlagos munka a folyadék perdületének csökkentése révén lehetséges:

$$H_e = \frac{c_{1u}u_2 - c_{2u}u_1}{g} > 0. \quad (6)$$

A kilépő perdület (c_{2u} sebességkomponens) célszerűen 0, az ettől eltérő érték energiavesztés többletet okoz kilépéskor. Pozitív energiatermeléshez tehát $c_{1u} > 0$ szükséges. Ezt a perdületet mind Kaplan, mind Francis turbináknál állítható terelőlapátokkal – úgynevezett vezetőkerékkel – állítják elő. Az alábbi fényképen látható Francis-turbina járókerék lapátjain a sebességi háromszögek egy – az elő és hátlap közötti közepes – áramvonalon ilyenek. Belépés: 1, kilépés 2 indexszel van jelölve. Az abszolút sebességet c , a relatív sebességet w , a kerületi sebességet u jelöli és látható a relatív sebességekhez illeszkedő lapátalak is.

Víz turbinák szívóképessége, a kavitáció jelensége

Víz turbinák szívócsövében a járókerékből távozó mozgási energiát csökkentik, ezzel a hasznosítható esés nő. A víz energiátartalmát jellemző Bernoulli összeg a turbina járókerék után (2. pont), illetve a szívócső (ez egy egyenes vagy görbült diffúzor) végén (S-jelű pont) az áramlási veszteségben különbözik.

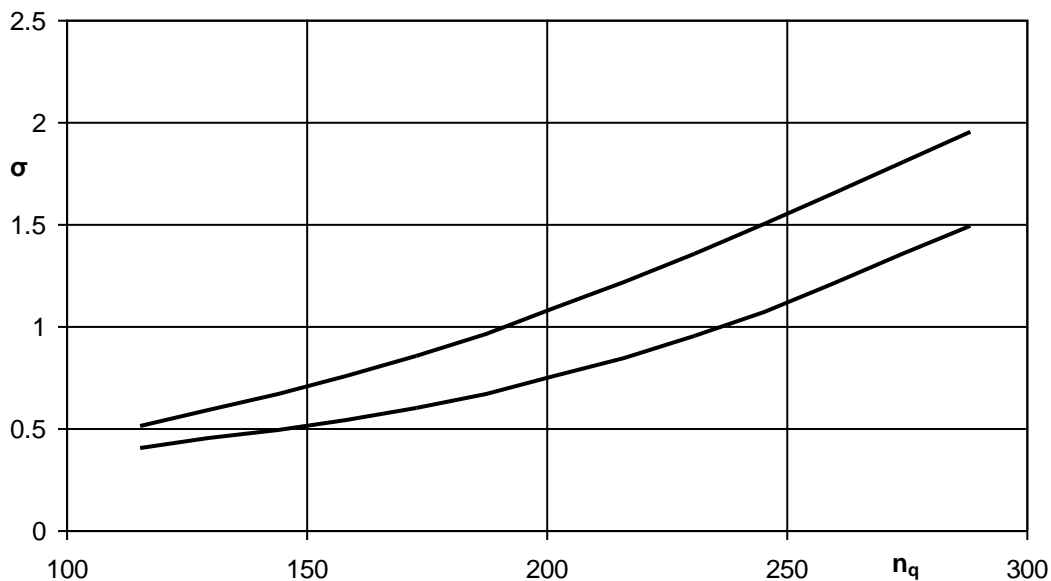
$$\frac{p_2}{\rho g} + H_s + \frac{c_2^2}{2g} = \frac{p_0}{\rho g} + 0 + \frac{c_s^2}{2g} + h'_{szívócső}.$$

Innen

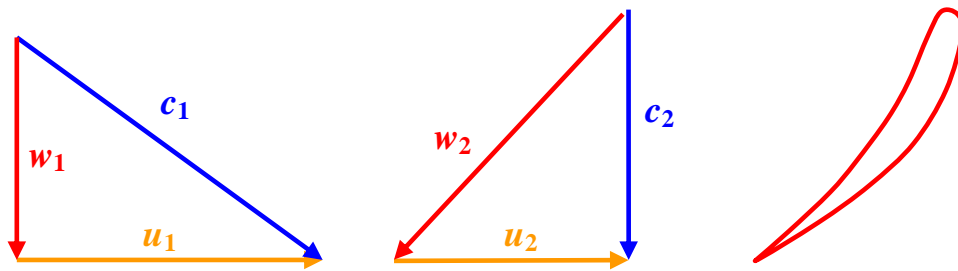
$$p_2 = p_0 - \rho g H_s - \frac{\rho}{2}(c_2^2 - c_s^2) + h'_{szívócső} = p_0 - \rho g H_s - KQ^2,$$

Ahol a sebesség négyzettel, tehát Q^2 -tel arányos tagokat összefogtuk egy tagba. A járókerék kilépő keresztmetszete H_s magasságban van az alvíz felett. Mekkora lehet ennek értéke? Mivel az alvíz szintjén p_0 légköri nyomás uralkodik, így a fenti képlet szerint H_s magasságban $p_0 - \rho g H_s - KQ^2$ a nyomás. Ennek biztonságosan nagyobbak kell lennie a víz hőmérsékletéhez tartozó p_g gőznyomásnál. Ez a biztonságos nyomás tartalék az esés százalékában fejezhető ki, azaz σH . Itt σ az úgynevezett Thoma-féle kavitációs szám, ami az n_q jellemző fordulatszám függvénye, az alábbi ábrán látható sávban található a kísérletileg igazolt σ értékek.

Turbinák σ kavitációs száma a jellemző fordulatszám függvényében



A megengedhető szívómagasság így a $H_{s,meg} = \frac{p_0 - p_g - KQ^2}{\rho g} - \sigma H$ képletből határozható meg a fenti diagram alapján.

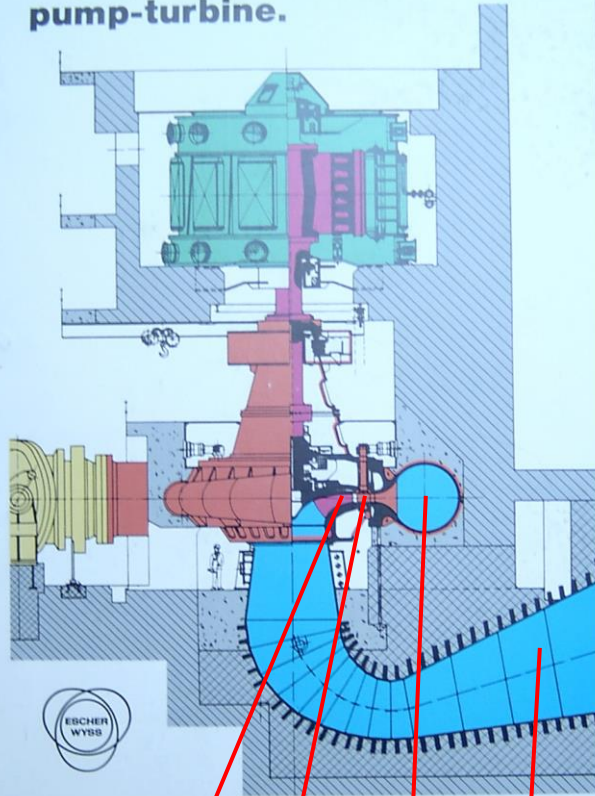


„**Gyors**” járású Francis turbina járó + vezetőkeréke
Az (5) képlet szerinti jellemző fordulatszám értéke **nagy**.



Three Gorges Vízermű (Kína) Francis turbina járókere.
Az erőműben 26 Francis turbina működik

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

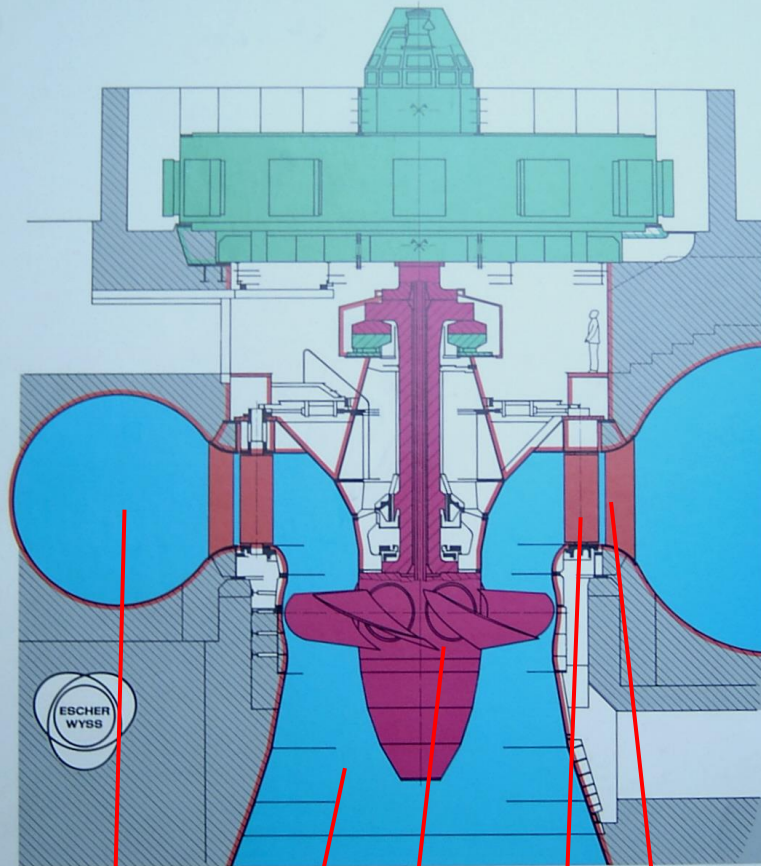


Head (pumping mode)	501 m
Input (pumping mode)	254 MW
Head (turbining mode)	489 m
Output (turbining mode)	250 MW
Speed	428.6 r.p.m.
Impeller diameter	4309 mm

Járókerék, vezetőkerék, csigaház, szívócső

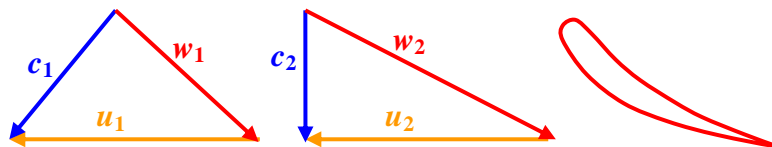
Kis jellemző fordulatszámú (**lassú** járású) Francis turbina-szivattyú

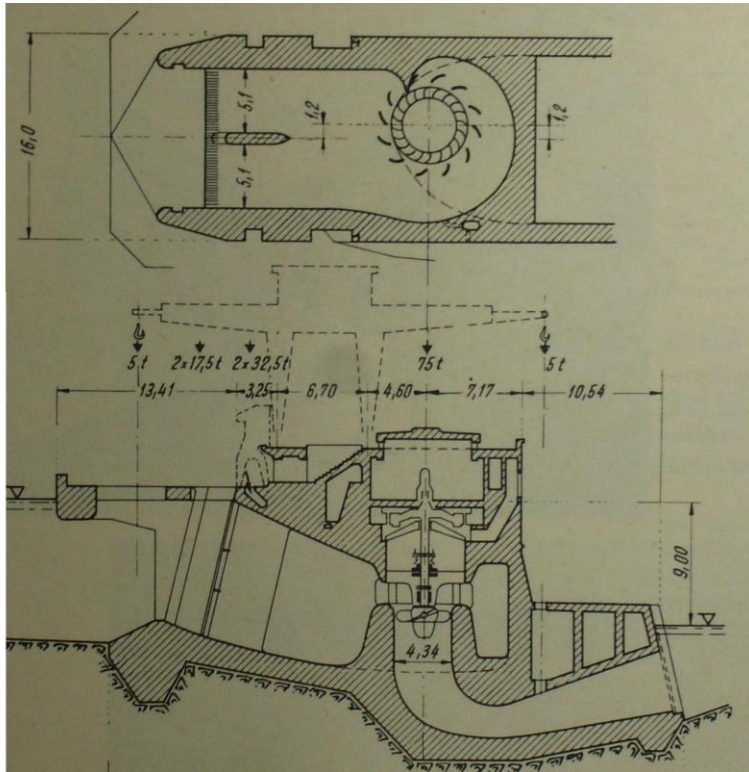
Cedillo (Spain): large Kaplan turbines on the Tagus river (4 units).



Head	43 m
Output per turbine	110 MW
Speed	93.8 r.p.m.
Runner diameter	7600 mm

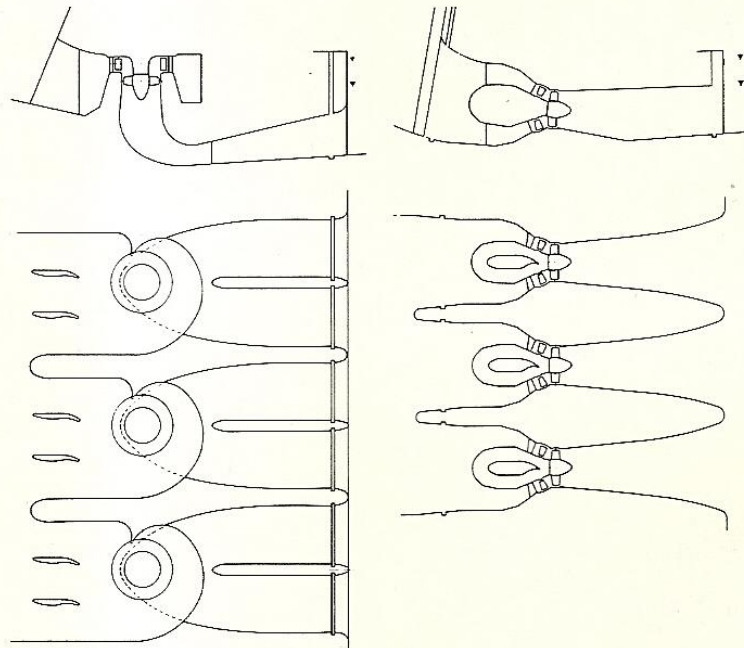
Csigaház, szívócső, járókerék, vezetőkerék, támlapát
 Mind a vezető-, mind a járókerék lapátok állíthatóak
 Fém csigaházas Kaplan turbina





Beton házas Kaplan turbina felülnézete és metszete
(Forrás: J. Raabe, lásd alább)

A Kaplan turbinák helyigénye mind függőleges, mind vízszintes irányban nagy, ezért csőturbinákban nyerik ki gyakran a folyók vízenergiáját. Az alábbi ábrán azonos teljesítményre tervezett 3 darab Kaplan turbina, illetve 3 darab csőturbina helyigényét hasonlították össze.

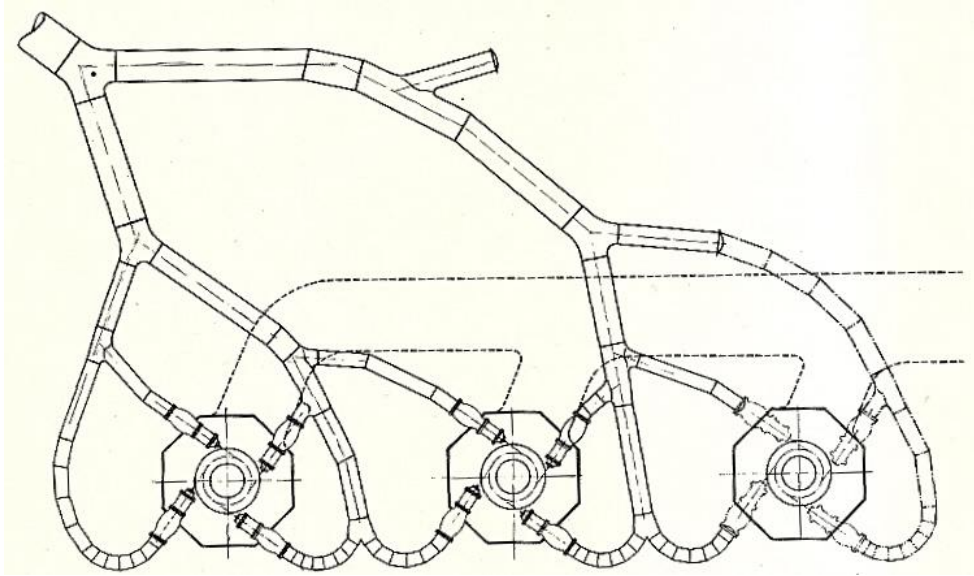


Kaplan turbinák

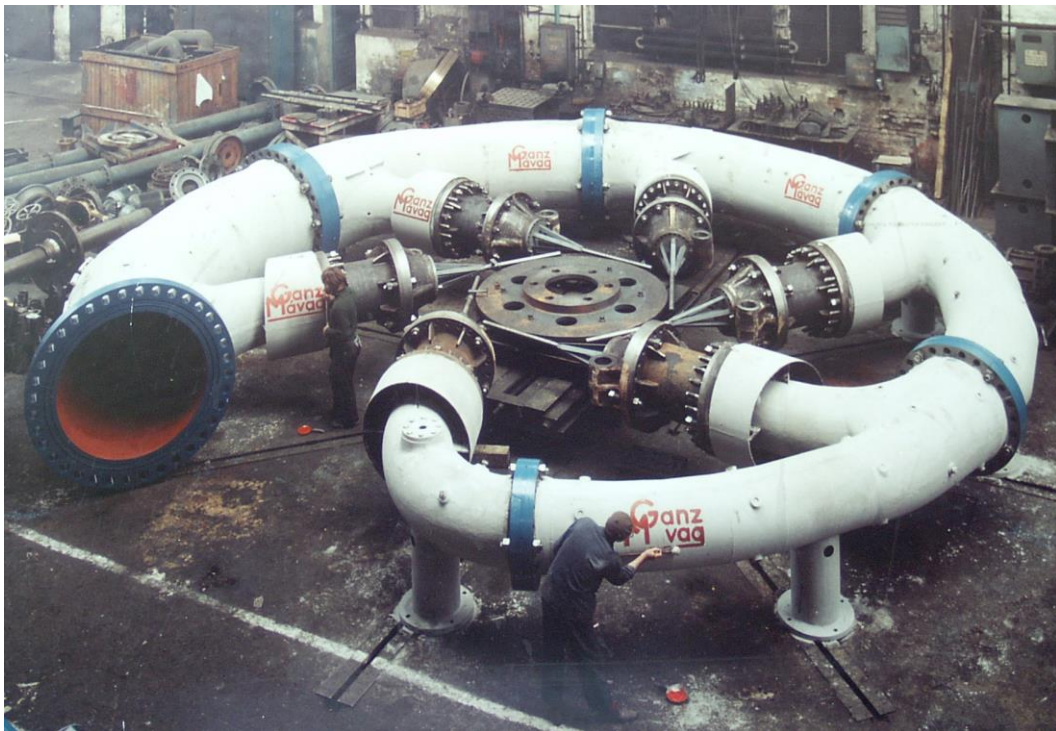
Csőturbinák

hely igénye

A legnagyobb esésekre Pelton turbinákat terveznek egy vagy több (legfeljebb 6) sugárcsővel. E típus esetén a Pelton kanálban a nyomás légköri, nyomáscsökkenés a járókerékben nincs – csupán a sugárcsőben, ahol a víz helyzeti energiából eredő hidrosztatikus nyomása mozgási energiává alakul át. A turbina a víz impulzusváltozását hasznosítja hajtóerőként, így itt is a forgatónyomaték a víz impulzusnyomatékának megváltozásából adódik, az Euler turbinaegyenlet továbbra is érvényes.



Három darab négy sugárcsőes Pelton turbina vízelosztó csővezetéke



Hat sugárcsőes Pelton turbina szerelés közben



Két Pelton kanál



Bánki turbina járókerék
ipari műemlék,
Bánki Donát ezen végzett
kismintakísérleteket



Kaplan turbina kisminta járókereke



Francis turbina járókerék

Víz turbinák üzemi jelleggörbéi alatt a víznyelés (Q)-fordulatszám (n); hajtónyomaték (M)-fordulatszám (n) függvénykapcsolatokat értjük állandó esés (H) és rögzített vezetőkerék állás, azaz fajlagos nyitás ($\varepsilon = Q/Q_{\text{névleges}}$) mellett. Szokásos a grafikonokon a hatásfok ($\eta = \text{áll.}$) vonalakat is megadni.

A jobb összehasonlíthatóság érdekében azonban úgynevezett fajlagos mennyiségeket használnak, azaz $H = 1$ m névleges esésre $D = 1$ m járókerék átmérőre vonatkoztatott értékeket, melyeket $_{11}$ indexszel jelölnék.

A definíciók a kontinuitási egyenleten és az Bernoulli egyenleten alapulnak.

$$Q \approx \text{felület} \cdot \text{sebesség} \approx \frac{D^2 \pi}{4} \sqrt{2gH} \approx D^2 \sqrt{H}, \text{ így } \frac{Q}{D^2 \sqrt{H}} = \frac{Q_{11}}{1^2 \sqrt{1}} = Q_{11}, \text{ azaz } Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \sqrt{H}}$$

A kerületi sebesség és a vízsebesség arányából adódik, hogy

$D\pi m = u \approx \text{vízsebesség} \approx \sqrt{2gH}$, így

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

Hasonlóan a teljesítmény

$$P_{bev} \approx \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot H}{\eta} \approx D^2 \sqrt{H} \cdot H, \text{ így}$$

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

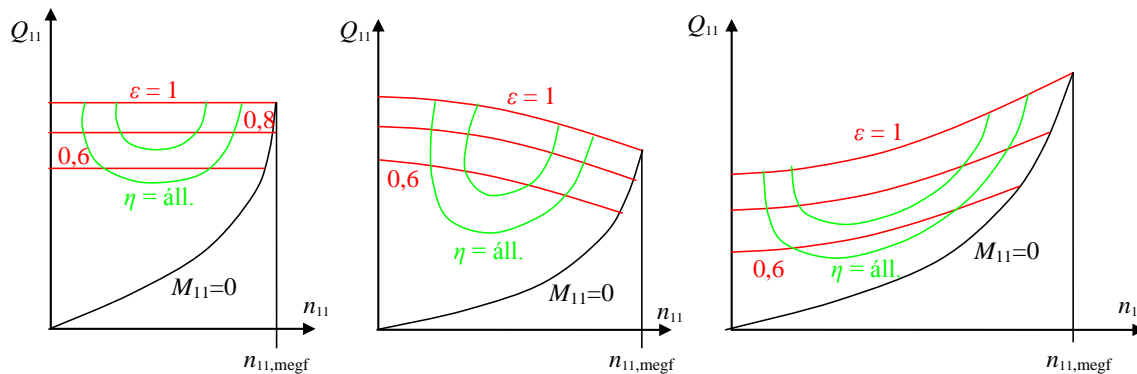
Végül a nyomaték esetében

$$M \approx \frac{P_{bev}}{\omega} \approx \frac{P_{bev}}{n} \approx \frac{D^2 H^{3/2}}{\sqrt{H}} \approx D^3 H, \text{ így}$$

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

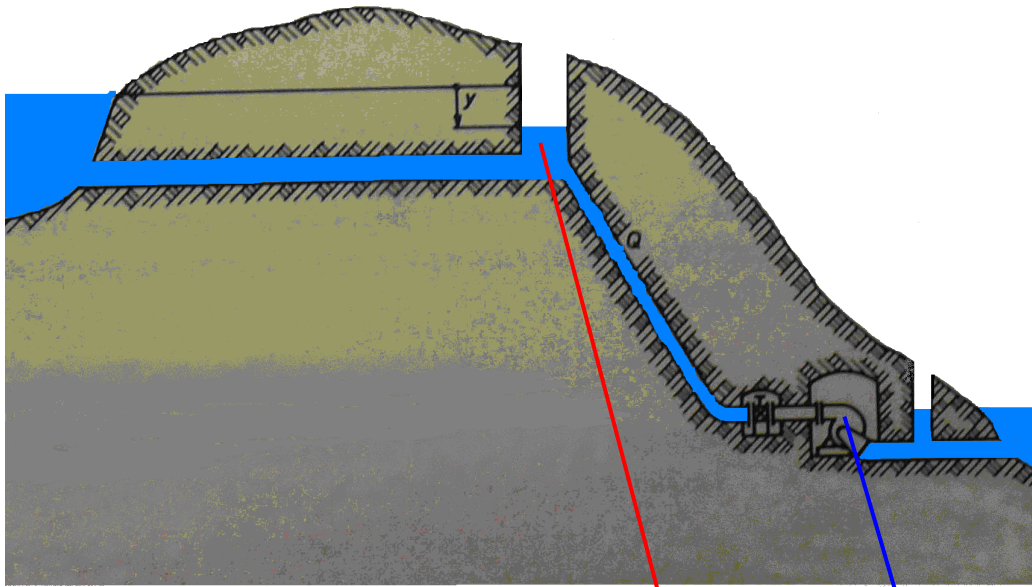
Amennyiben nem vizet, hanem valamilyen vegyi üzem rekuperációs turbinájában rendelkezésre álló, víztől eltérő sűrűségű folyadékot használunk, akkor a sűrűséget nem szabad állandóként a képletekből elhagyni!

A fajlagos mennyiségek koordináta rendszerében ábrázolt üzemi jellemzők grafikonjai az alábbi ábrán láthatók. Megrajzoltuk az állandó hatásfokú üzemállapotokat jelölő zöld vonalakat. Bejelöltük a legnagyobb nyitáshoz (víznyeléshez) és zérus terhelő nyomatékhoz tartozó fordulatszámot. Erre az n_{megf} megfutási fordulatszámra gyorsul a turbina+generátor gépcsoport, ha a villamos hálózat hibájából a generátor és így a turbina terhelése „leesik”. Erre a fordulatszámra kell méretezni a gépcsoportot. Láthatóan ez Kaplan turbinák esetén a legkritikusabb.

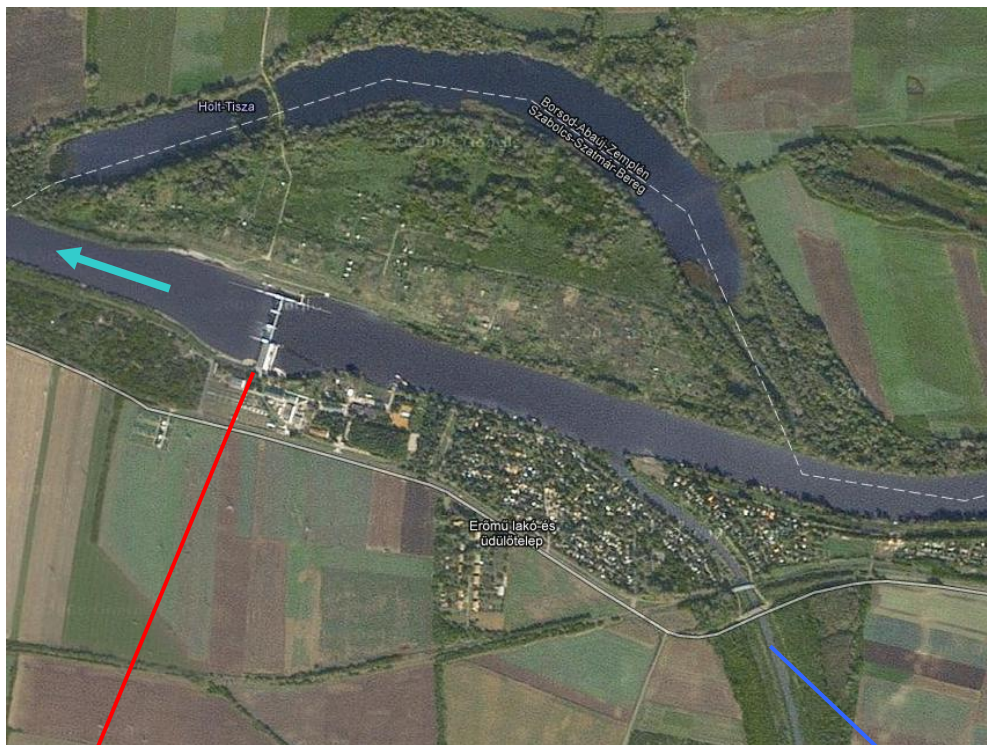


Pelton turbina Lassú járású **Francis** turbina **Kaplan** turbina
 Víznyelés-fordulatszám jelleggörbéi rögzített vezetőkerék állásnál (nyitásnál)

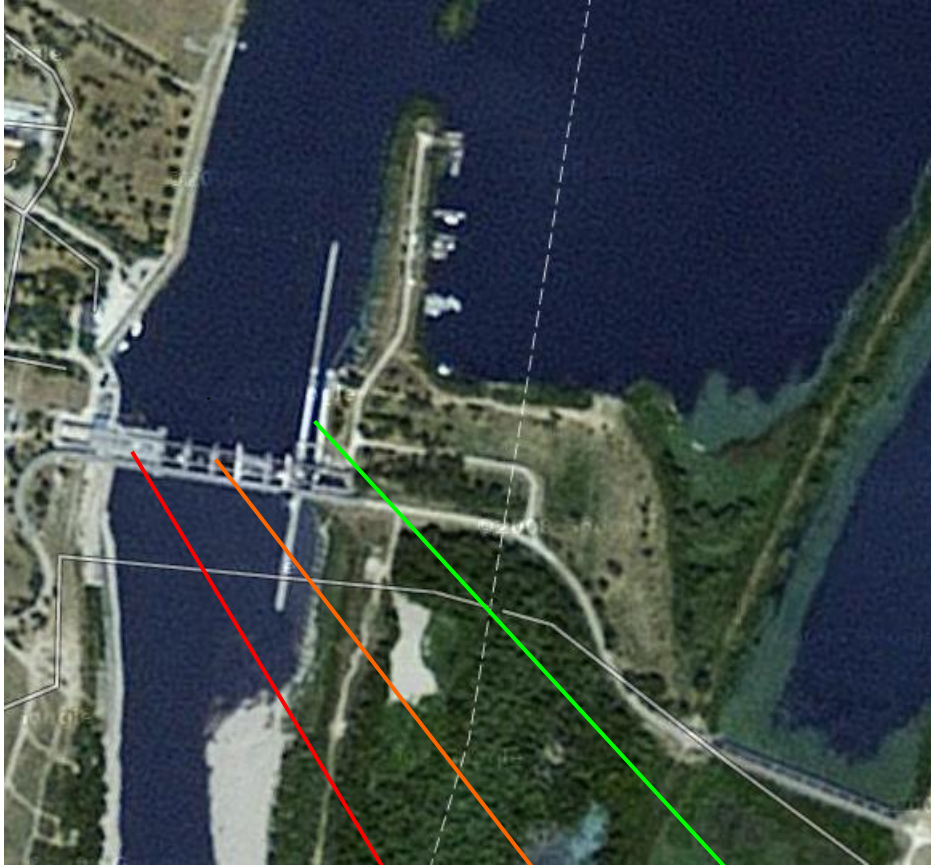
Különösen nagy esésű vízerőművek vízturbinájára (lassú járású Francis turbina, Pelton turbina) hosszú nyomócsövön, sziklába vájt alagútba fektetett csatornában érkezik a víz. Esetenként, például elektromos hálózati üzemzavarok esetén gyorsan le kell zárni a vezetőkereket, a Pelton sugárcső szabályozó tűjét annak érdekében, hogy a terheletlen turbina ne gyorsuljon fel a megfutási fordulatszámra és a felesleges vízvesztés is elkerülhető legyen. Ilyenkor azonban a turbina előtti elzáró szerkezet zárásakor jelentős nyomáshullám indul meg a záró szerkezettől a felvív oldali tározó felé, ez a csövet szilárdságilag veszélyezteti. A csőtörések elkerülésére a rendszerbe lengésvédelmi vízaknát terveznek, a feltorló víz abban okoz szintemelkedést (az ábrán látható y szintkülönbség csökken), ami néhány lengés után jelentősen csillapodik. Az ilyen aknák méretezéséhez manapság nyomástranziens szimulátorok állnak rendelkezésre, többek között a BME Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék is fejlesztett ki ilyen szimulátort.



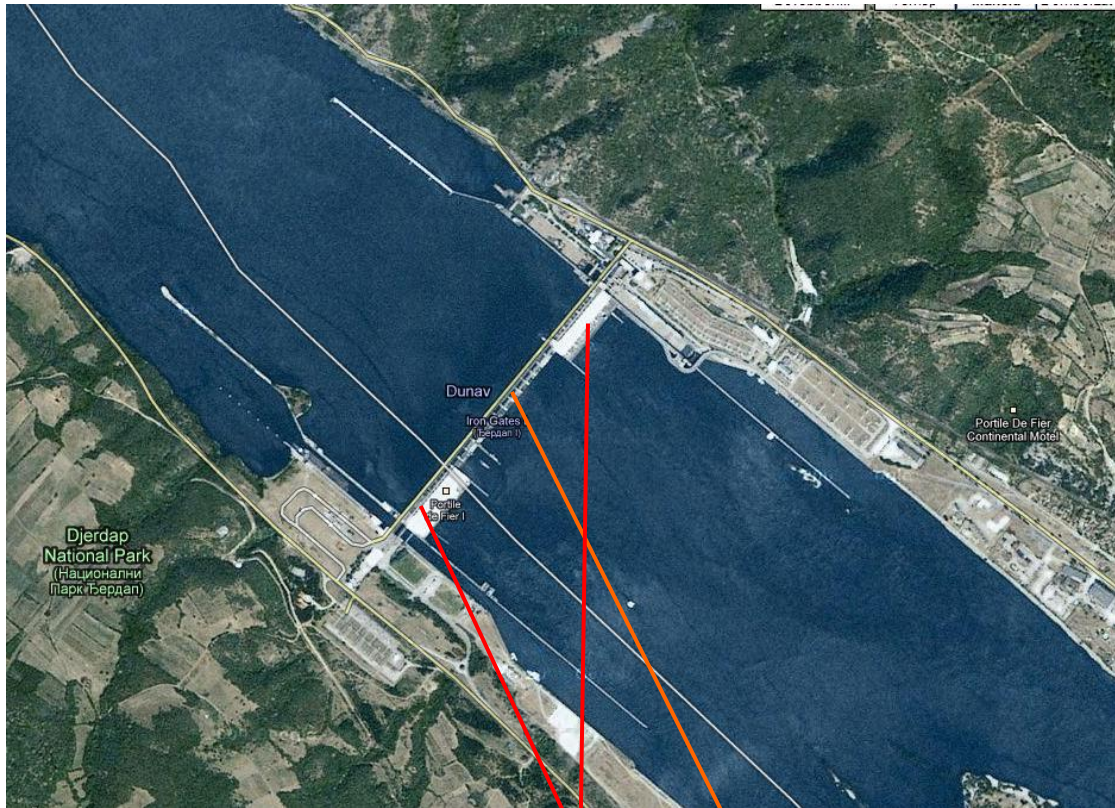
Nagy esésű vízerőmű metszete **lengésvédelmi vízaknával, Francis-turbinával**
 (Forrás: J. Raabe, Hydraulische Maschinen und Anlagen,
 Teil 4, Wasserkraftanlagen, VDI Verlag, 1970)



A **Tiszalöki Vízerőtelep**, amelyik villamos energiát termel és biztosítja a **Keleti Főcsatorna** vízellátását



A Kiskörei Vízérőtelep: **erőmű**, **duzzasztómű**, **hajózó csatorna**



Vaskapu vízérőmű: **erőművek**, **duzzasztómű**