

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

VODNÍ A VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



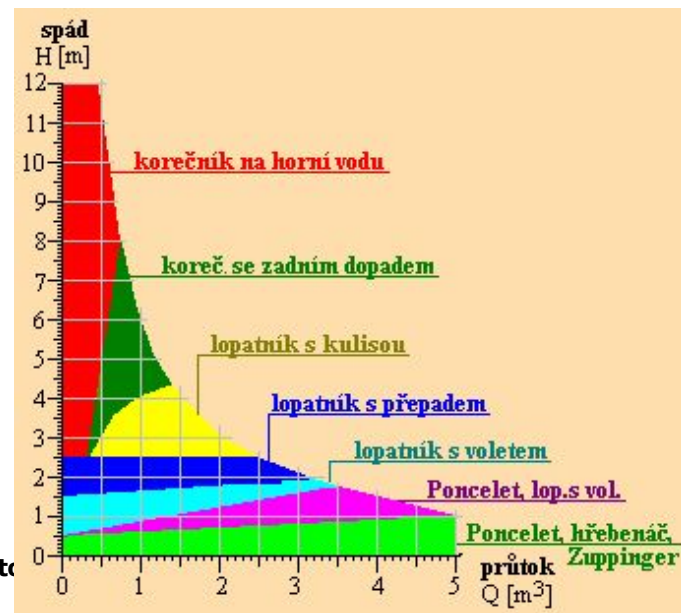
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Vodní motory 2

Milan Bělík

Vodní kola

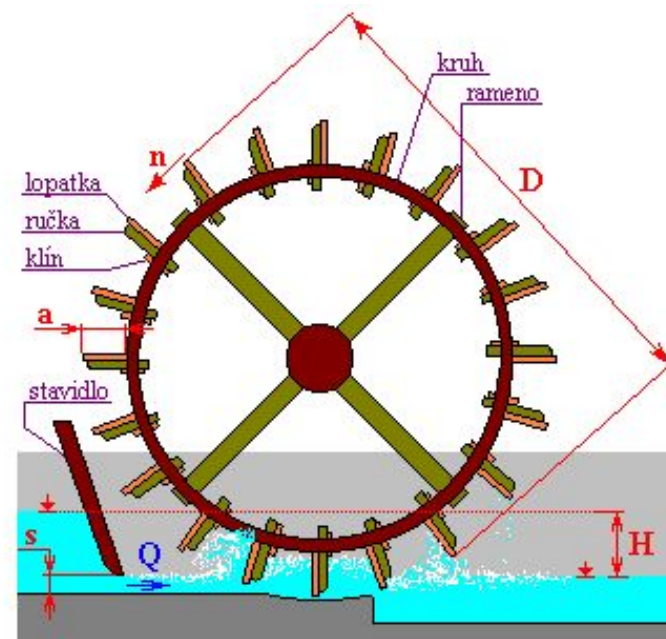
- kolo na spodní vodu (stříkový hřebenáč)
 - ◆ nejjednodušší kolo
 - ◆ velké průtoky, velmi malé spády (od 0 m), malá účinnost
 - ◆ citlivé na kolísání spodní hladiny
- korečník na horní vodu
 - ◆ větší spády, nejrychloběžnější kolo
- korečník na horní vodu s reverzním chodem
 - ◆ největší účinnost (až 85 %), nízké průběžné otáčky
 - ◆ malé průtoky, větší spády, nevadí kolísání hladiny
- korečník na horní vodu se zadním dopadem
 - ◆ vysoká účinnost, nízké průběžné otáčky
 - ◆ malé průtoky, větší spády
 - ◆ masivní věnec, nutný obloukový žlab (vole)
- lopatník s kulisou
 - ◆ malé spády, velké průtoky, dobrá účinnost, nepřesná regulace
 - ◆ nutný obloukový žlab (vole), nemá široké věnce, při zablokování znemožní průtok
- lopatník s přepadem
 - ◆ malé spády velké průtoky, pomaloběžný stroj
 - ◆ velké rozměry, při zablokování znemožní průtok
- lopatník s voletem
 - ◆ malé spády velké průtoky, pomaloběžný stroj
 - ◆ velké rozměry , při zablokování znemožní průtok
- Božkovo kolo
 - ◆ vnitřní nátok, komplikované uspořádání, těžkopádné
 - ◆ velmi malé průtoky, relativně vysoké otáčky
- Zuppingerovo kolo
 - ◆ velké průtoky, velmi malé spády, při zablokování znemožní průtok
 - ◆ vysoká účinnost, samoregulace
- Ponceletovo kolo
 - ◆ účinnost srovnatelná s turbínami, samoregulace
 - ◆ velké průtoky, velmi malé spády (stačí proudící voda), potřebuje žlab (vole)
- Sagebienovo kolo
 - ◆ velice pomaloběžné, velké rozměry, dlouhé lopatky, těžké
 - ◆ velké průtoky, malé spády, při zablokování znemožní průtok
- belík (valach)
 - ◆ malé průtoky, větší spády, malá účinnost
 - ◆ vysoké otáčky, lehký stroj
- kola se středním nátokem
 - ◆ využití výhod horního nátoku pro menší spády



typ kola	účinnost [%]
korečník na horní vodu s obráceným chodem	až 85
<u>korečník na horní vodu obyčejný</u>	65..80
korečník se zadním dopadem	65..75
lopatník s kulisou	65..70
lopatník s přepadem	60..75
lopatník s voletem	45..55
Zuppingerovo kolo	70..78
<u>Ponceletovo kolo</u>	60..65%
Sagebienovo kolo	až 80%
<u>stříkový hřebenáč</u>	30..35%
<u>belík</u> (valach)	25..30%

Stříkový hřebenač

- nejstarší kolo (od starověku)
- nejdéle používané (do 30. let 20. stol)
- kolo na spodní vodu (do 75 cm)
- účinnost 30 – 35 %
- stěrbina pod stavidlem přemění spád na E_k
- voda natéká na lopatku
 - ◆ částečně vyteče po lopatce výše
 - ◆ náhlá změna proudění – víření, rázy
- volný odtok z lopatek
 - ◆ pro usnadnění prohlubeň za kolem
 - ◆ při plochem odtoku větší ztráty (hrnutí vody)
- velice jednoduchá konstrukce
 - ◆ úzká kola – 1 věnec
 - ◆ široká kola 2 a více věnců
 - ◆ nátok těsně u kola
 - ◆ skloněné stavidlo se zaoblenou hranou nebo šikmý žlab



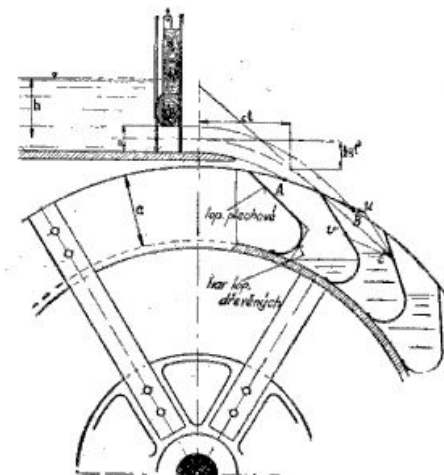
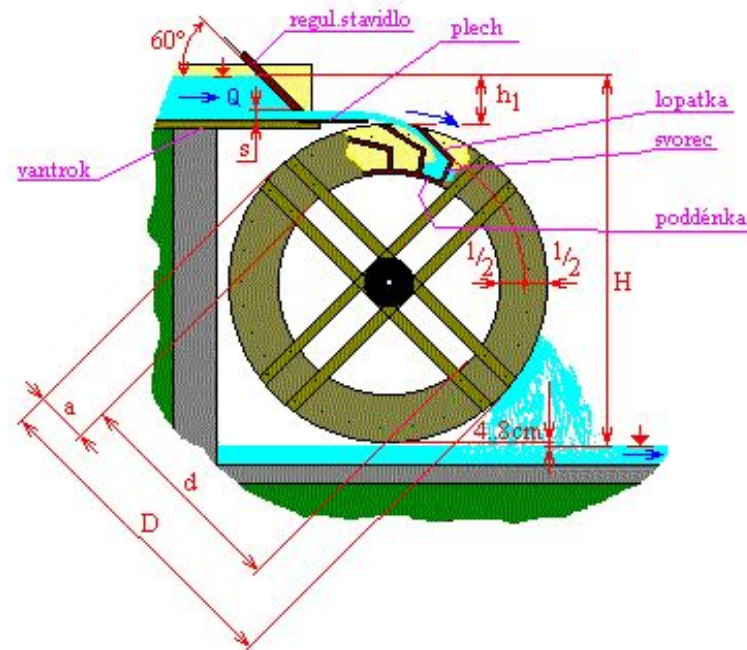


H [m]	D [m]	a [m]	s [m]	Q ₁ [litr./sec.]	P ₁ [W]	n [ot./min]	lop. [ks]
0,2	4,6	0,36	0,058	113	70	3,3	40
0,25	5,0	0,38	0,061	133	110	3,4	40
0,3	5,3	0,39	0,064	153	150	3,5	44
0,35	5,6	0,41	0,067	172	200	3,6	44
0,4	6,0	0,43	0,070	191	250	3,6	44
0,45	6,3	0,44	0,072	209	310	3,6	44
0,5	6,3	0,45	0,074	228	370	3,8	44
0,55	7,0	0,47	0,076	246	440	3,6	48
0,6	7,3	0,48	0,078	264	510	3,6	48
0,65	7,6	0,49	0,080	281	590	3,6	48
0,7	8,0	0,50	0,082	299	680	3,5	48
0,75	8	0,51	0,084	0,316	0,77	3,7	48
0,8	8	0,53	0,086	0,333	0,87	3,8	48
0,85	8	0,54	0,088	0,35	0,97	3,9	48
0,9	8	0,55	0,089	0,367	1,07	4,0	48



Korečník na horní vodu

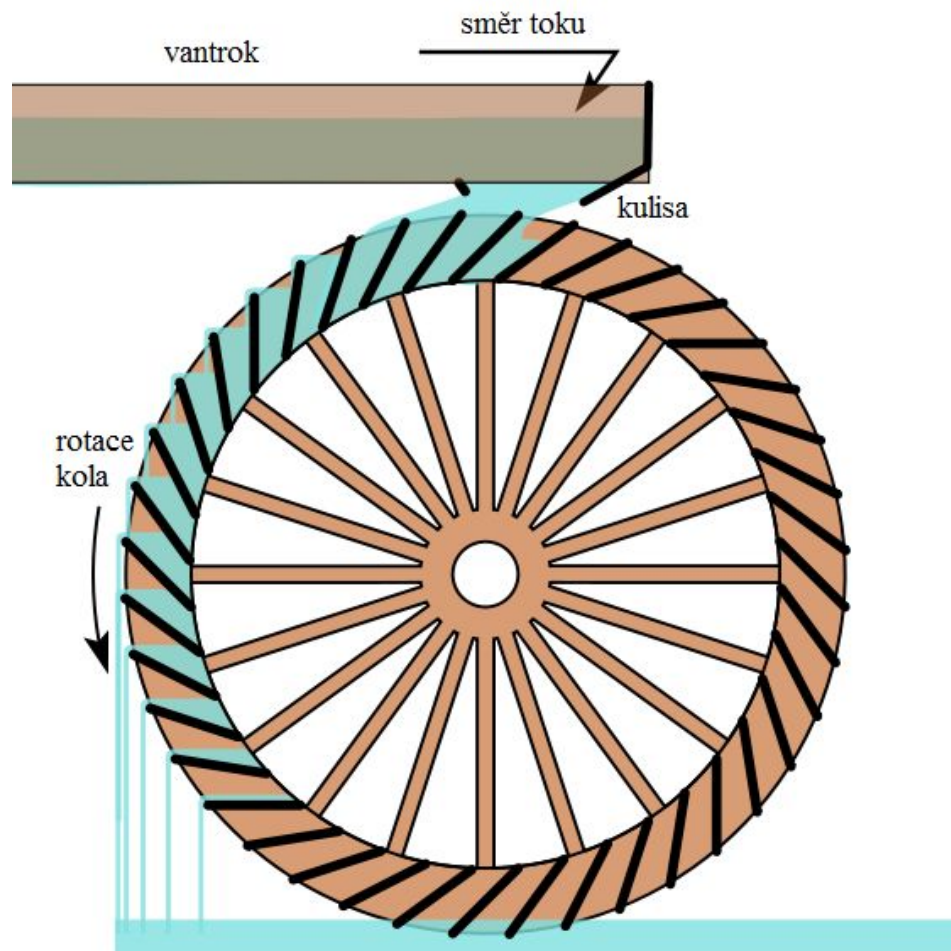
- používali již římané
- jedno z nejrozšířenějších kol
- kolo na horní vodu (spád 2 – 10 m)
- účinnost 65 – 80 %
- voda přiváděná vantrokem se šikmým stavidlem
 - ♦ tenký plochý paprsek
 - ♦ obloukem dopadá na nejvyšší bod kola
 - ♦ voda „dobíhá“ kolo – rychlejší než obvodová rychlost
- na vstupu využívá E_k , dále E_p
- výrazně skloněné, mělké široké korečky
 - ♦ šikmé lopatky (30° - teoreticky by měl být šikmější)
 - ♦ radiální opěrky (svorec)
 - ♦ vnitřní bednění (poddénka)
 - ♦ husté lopatkování (větší než šířka paprsku – odvzdušnění)
 - ♦ masivní postranní větce (uzavírají kolo)
- předčasné vylévání korečků – zakřivená stěna (vole)





H [m]	D [m]	d [m]	h ₁ [m]	s [m]	lop. [ks]	n [ot./min.]	Q ₁ [litr./sec.]	P ₁ [W]
1,6	1,31	0,91	0,24	0,037	24	14,6	60	691
1,8	1,51	1,11	0,24	0,037	24	12,7	60	778
2	1,71	1,27	0,24	0,040	28	11,2	66	950
2,2	1,91	1,47	0,24	0,040	28	10	66	1 045
2,4	2,00	1,56	0,35	0,040	28	11,4	79	1 369
2,6	2,14	1,62	0,41	0,048	30	11,6	101	1 898
2,8	2,34	1,82	0,41	0,048	32	10,6	101	2 044
3	2,54	2,02	0,41	0,048	32	9,8	101	2 190
3,2	2,74	2,22	0,41	0,048	36	9,1	101	2 336
3,4	2,94	2,42	0,41	0,048	36	8,4	101	2 482
3,6	3,08	2,48	0,47	0,055	36	8,7	1,26	3 266
3,8	3,21	2,61	0,54	0,055	38	8,9	135	3 694
4	3,41	2,81	0,54	0,055	40	8,4	135	3 888
4,2	3,61	3,01	0,54	0,055	42	7,9	135	4 082
4,4	3,81	3,21	0,54	0,055	44	7,5	135	4 277
4,6	4,01	3,41	0,54	0,055	46	7,2	135	4 471
4,8	4,21	3,61	0,54	0,055	48	6,8	135	4 666
5	4,41	3,81	0,54	0,055	48	6,5	135	4 860
5,2	4,53	3,83	0,62	0,064	46	6,7	168	6 290
5,4	4,61	3,91	0,74	0,064	46	7,3	184	7 144
5,6	4,81	4,11	0,74	0,064	48	6,9	184	7 409
5,8	5,01	4,31	0,74	0,064	48	6,7	184	7 673
6	5,21	4,51	0,74	0,064	48	6,4	184	7 938
6,5	5,71	5,01	0,74	0,064	56	5,9	184	8 600
7	6,21	5,51	0,74	0,064	60	5,4	184	9 261
7,5	6,58	5,88	0,87	0,064	64	5,5	200	10 773
8	6,99	6,29	0,96	0,064	68	5,5	210	12 096
8,5	7,49	6,79	0,96	0,064	72	5,1	210	12 852
9	7,99	7,29	0,96	0,064	76	4,8	210	13 608
9,5	8,49	7,79	0,96	0,064	80	4,5	210	14 364
10	8,99	8,29	0,96	0,064	84	4,3	210	15 120

korečník na horní vodu s reverzním chodem



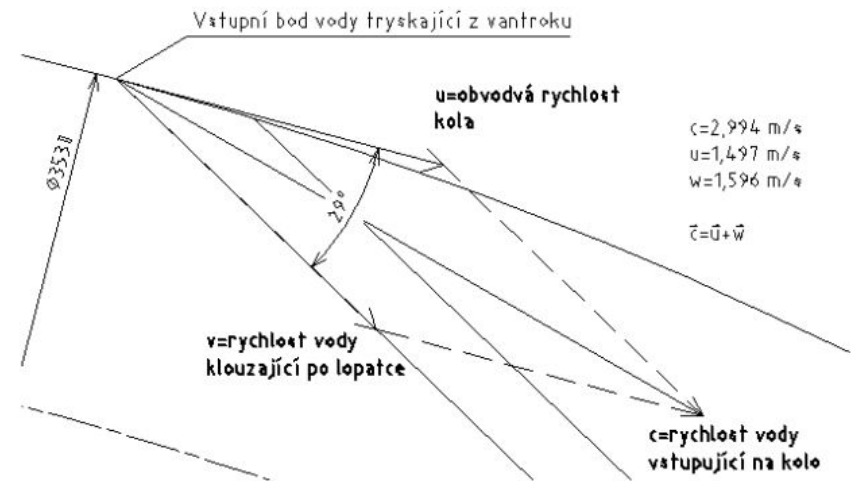
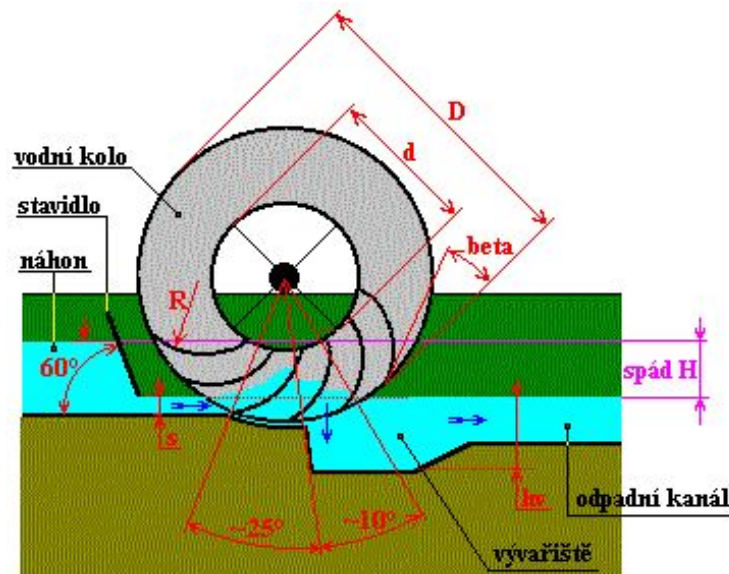
Belík (valach)

- připomíná Bánkiho turbínu
- kolo na horní vodu (spád 2 – 5 m)
- účinnost 30 – 35 %
- atypické provedení nátoku zakřiveným skluzem
 - ◆ zužující se silný paprsek vody
- na vstupu využívá E_k
 - ◆ krátká doba setrvání v lopatkách
 - ◆ nemá čas se uklidnit a předat E_p
- malá rozměry (30 cm – 2 m)
- malé výkony (jednotky kW)
 - ◆ pohon pil



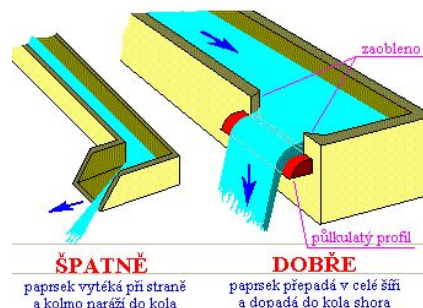
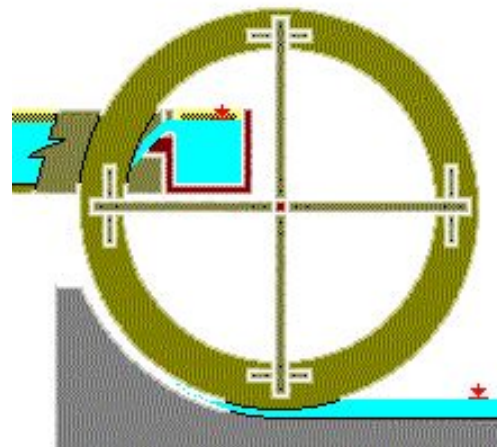
Ponceletovo kolo

- 1826 – Jean Poncelet
- moderní kolo na spodní vodu
- účinnost 60 – 65 %
- návrh podobný turbíně
- pod stavidlem se spád mění na E_k
 - ◆ voda naběhne na zakřivenou lopatku
 - ◆ pozvolný, plynulý nátok, nevíří
 - ◆ při zastavení pohybu voda začíná plynule odtékat
 - ◆ konečný odtok směrem dolů – nutná prohlubeň pod odtokem
- zjednodušená konstrukce – mnohonásobně lomené lopatky



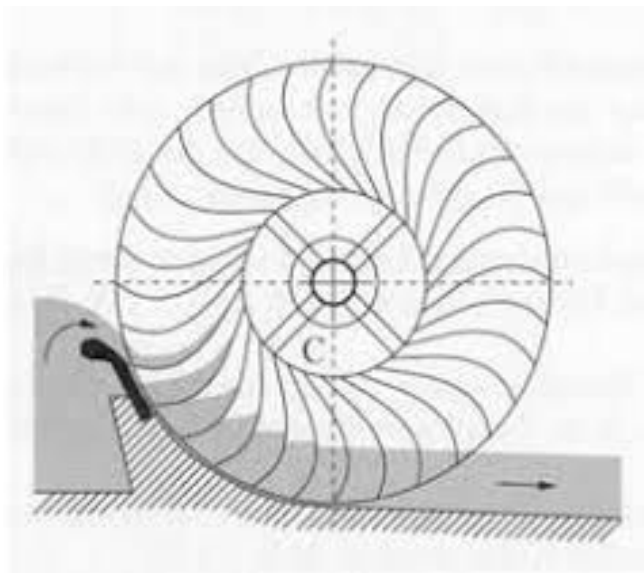
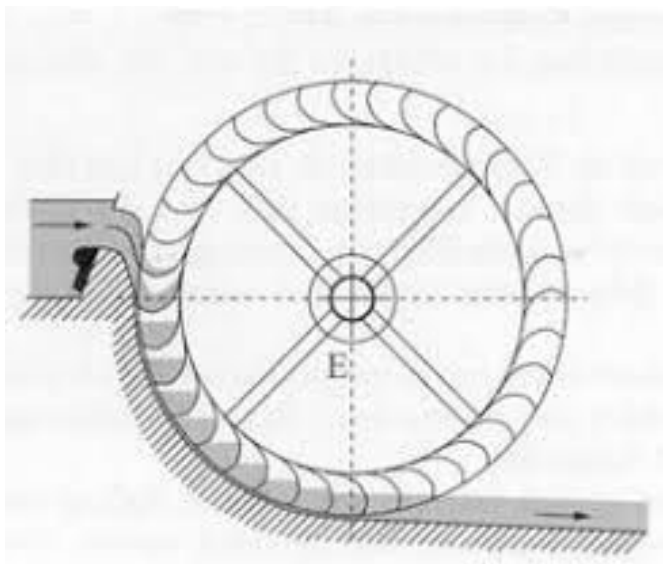
Božkovo kolo

- **1865 – Romuald Božek (syn Josefa Božka)**
 - ◆ vodárna Sychrovského zámku
 - ◆ spád 1,6 m, průtok 26 l/s
- **komplikovaný vnitřní nátok žlabem**
 - ◆ žlab rovnoběžný s hřídelí s otvorem ve stěně
- **složitá konstrukce věnců**
 - ◆ labilní konstrukce
- **otevřené korečky plněné zevnitř**
 - ◆ vnitřní lopatky otevřené
- **výtok vnější stranou korečků**
 - ◆ vnější lopatky zavřené úzkou štěrbinou
 - ◆ štěrbina brzdí výtok vody
 - ◆ vyprázdnění korečku až dole
- **velmi malé průtoky (desítky l/s)**
 - ◆ voda naběhne na zakřivenou lopatku
 - ◆ pozvolný, plynulý nátok, nevíří
 - ◆ při zastavení pohybu voda začíná plynule odtékat
 - ◆ konečný odtok směrem dolů – vzniká reakční síla
 - ◆ nutná prohlubeň pod odtokem
- **návrh využívá principů pro turbíny**
- **replika: Boskovice - Lasákův mlým (hotel Moravia)**



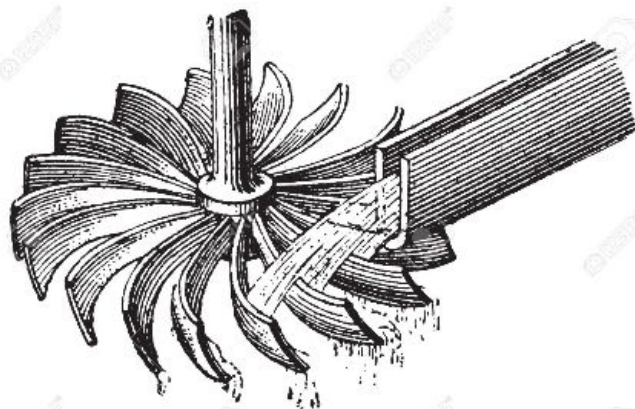
Kola se středním nátokem

- obecně úprava kol pro „nevhodné spády“



2.2.1 Horizontální vodní kolo

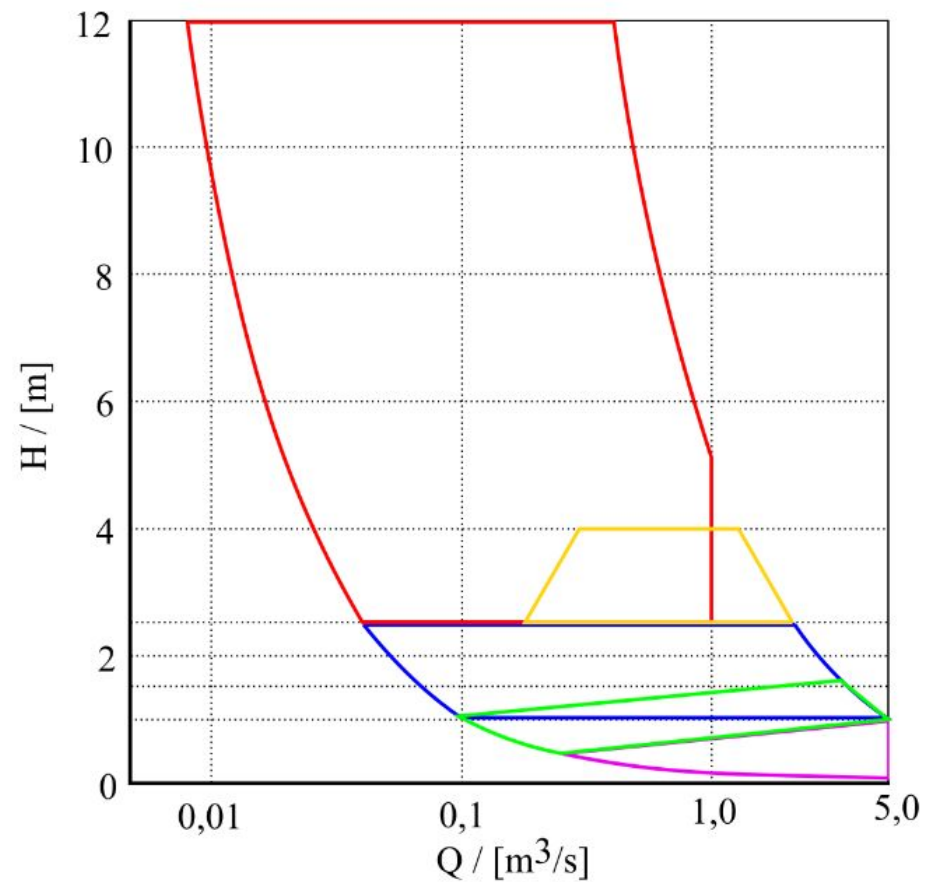
Horizontální kolo se dá přirovnat ke kotouči s lopatkami, usazenému v proudu vody. Tato konstrukce byla sice výrazně neefektivní, ale díky vertikálnímu uložení hřídele nebylo k pohonu mlecích kamenů potřeba žádného ozubeného převodu, který by změnil směr os hřídelů. Kvůli absenci převodového soukolí nebylo možné přizpůsobit otáčky požadovanému účelu. [10]



Obr. 2.4: Schematické zobrazení horizontálního vodního kola Norse, převzato z [12]

Mlýny používané pro mletí zrn s tímto typem vodního kola se nazývaly *Norse mills*. V Sýrii byla tato vodní kola používána pro zpracování bavlny. [10]

Kvůli své nízké účinnosti (v rozmezí od 15 do 30 % [13]) byla již v 1. století nahrazena vertikálním provedením.



Obr. 2.3: Graf vhodnosti jednotlivých typů vodních kol, překresleno z [11]

kde ● představuje vodní kolo s horním nátokem, ● Zuppingerovo kolo s přepadem, ● Bachovo vodní kolo, ● Zuppingerovo vodní kolo s voletem a ● Ponceletovo vodní kolo.

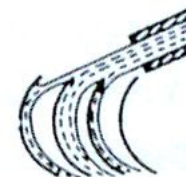
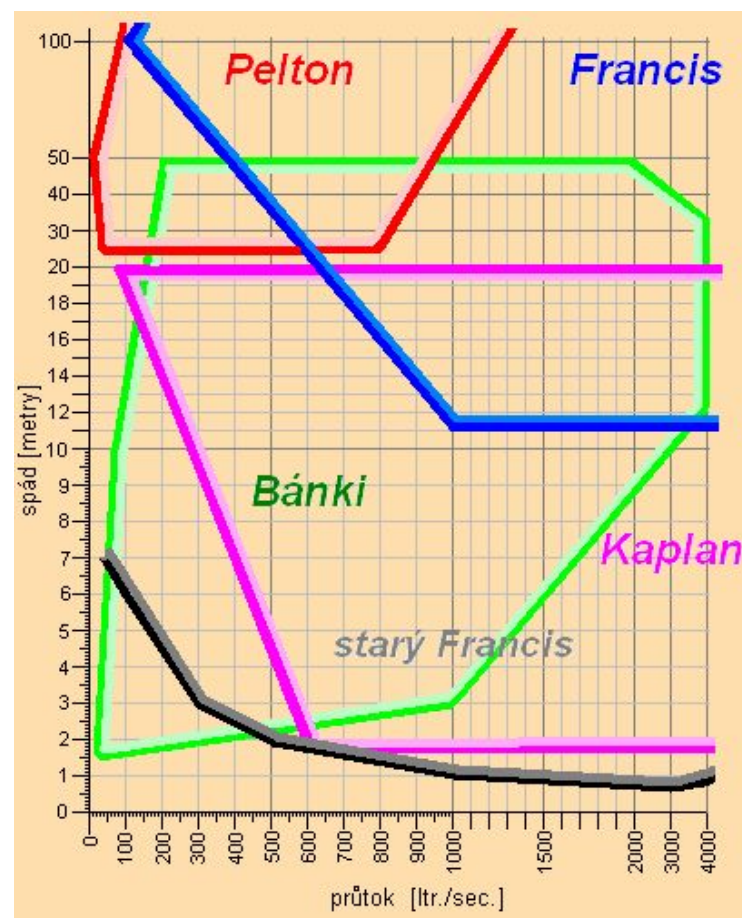
Vodní turbíny

■ Akční turbíny (rovnotlaké)

- ◆ Peltonova turbína
- ◆ Reiffensteinova turbína
- ◆ turbína Sfindex
- ◆ turbína Swift
- ◆ Segnerova turbína
- ◆ Zuppingerova turbína
- ◆ turbína Turgo
- ◆ Girardova turbína
- ◆ Hänelova turbína
- ◆ Schwamkrugova turbína
- ◆ Bánkiho turbína

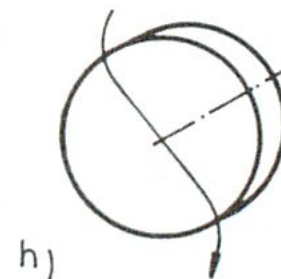
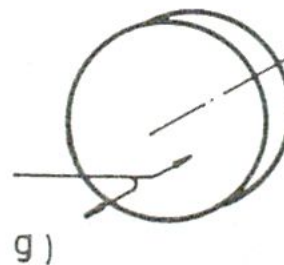
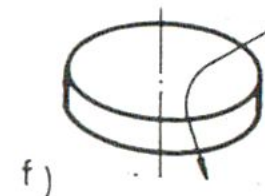
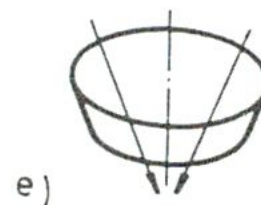
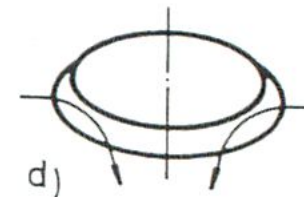
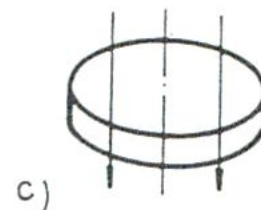
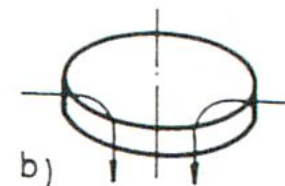
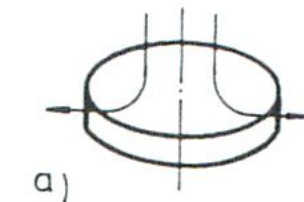
■ Reakční turbíny (přetlakové)

- ◆ Kaplanova turbína
- ◆ Thomanova turbína
- ◆ propelerova turbína
- ◆ Francisova turbína
- ◆ Fourneyronova turbína
- ◆ Jonvalova turbína
- ◆ Henschel-Jonvalova turbína
- ◆ Francis-Reiffensteinova turbína
- ◆ Dériazova turbína



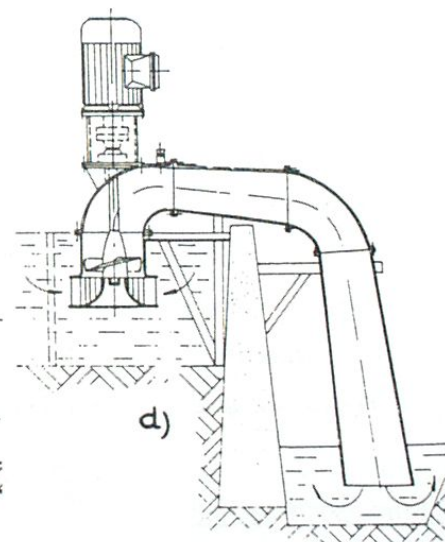
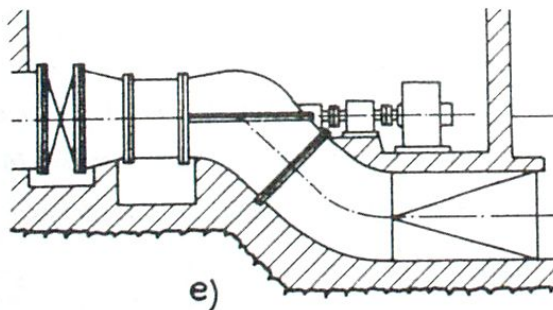
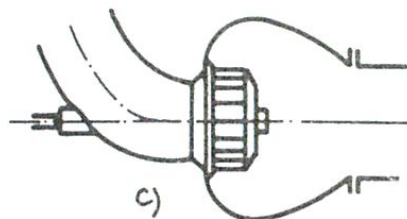
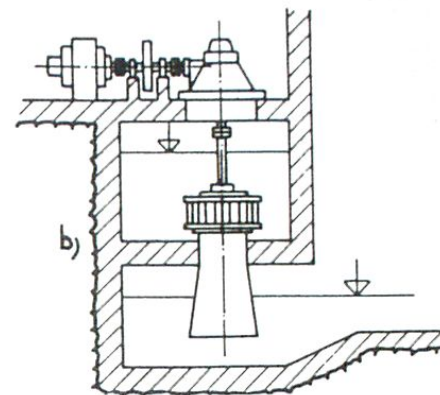
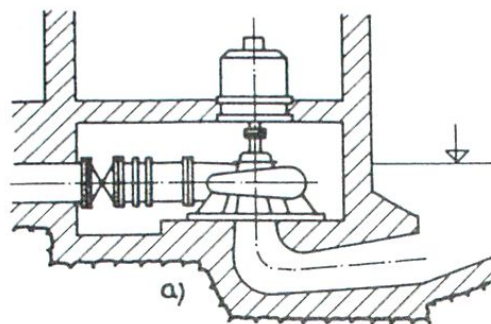
Dělení vodních turbín

- **centrifugální**
- **centripetální**
- **axiální**
- **radiálně axiální**
- **diagonální**
- **se šikmým průtokem**
- **tangenciální**
- **s dvojnásobným průtokem**



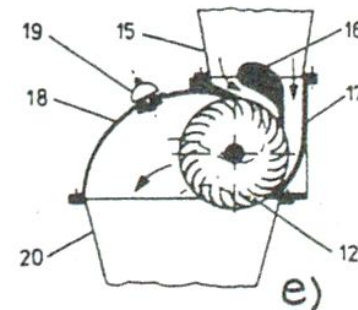
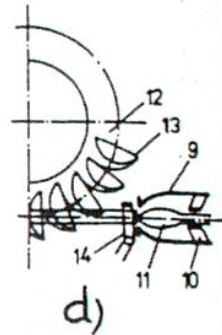
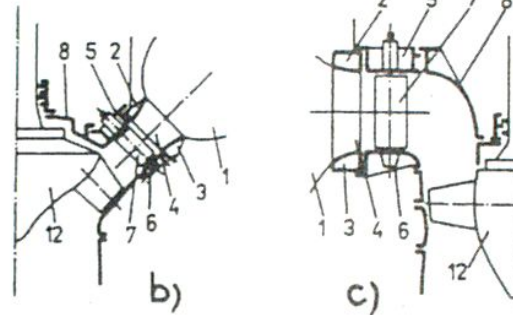
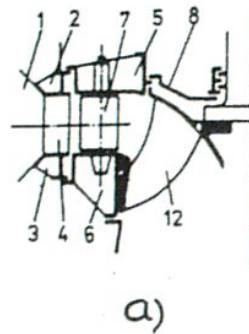
Dělení vodních turbín

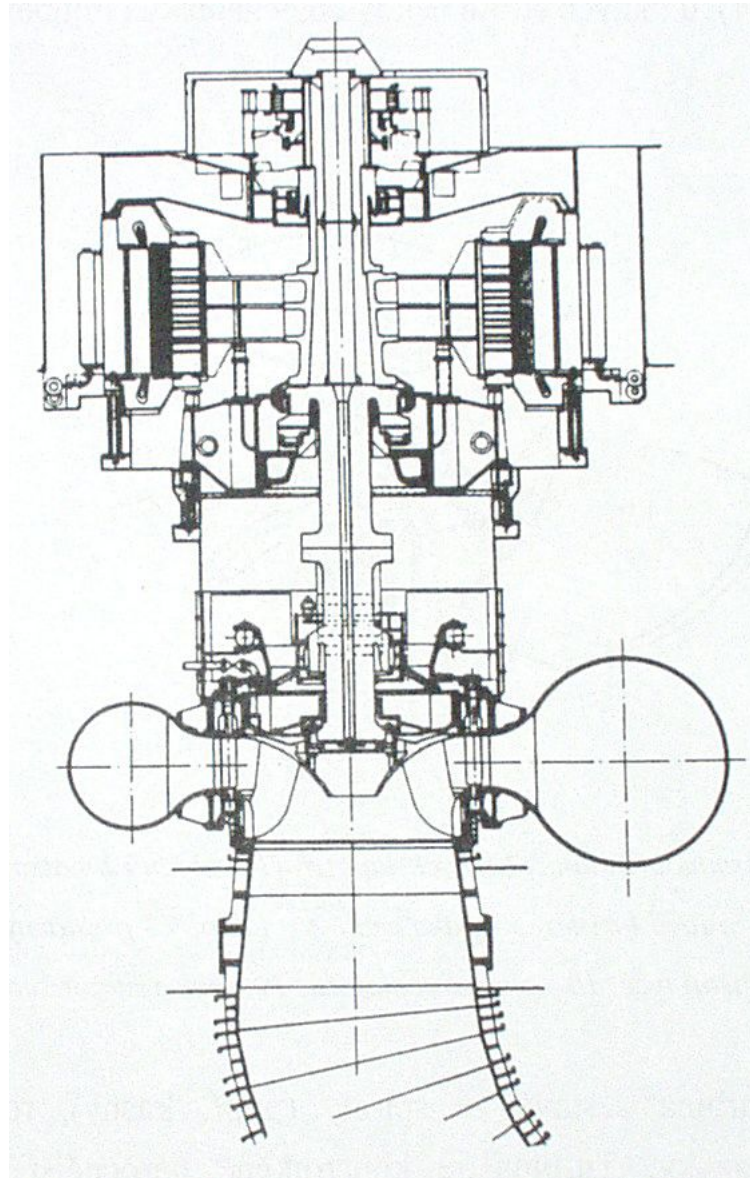
- spirální
- kašnová
- kotlová
- násosková
- přímoproudá

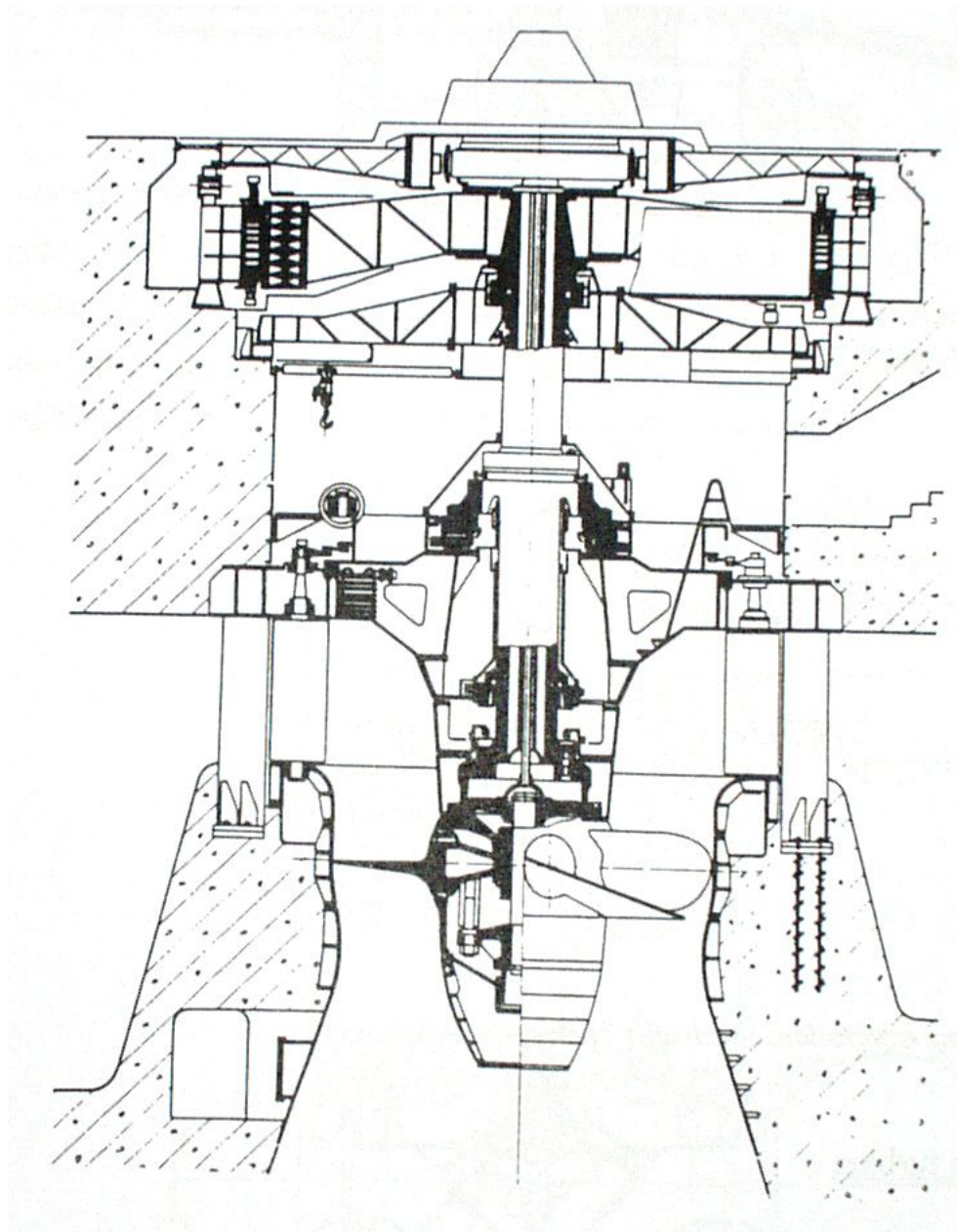


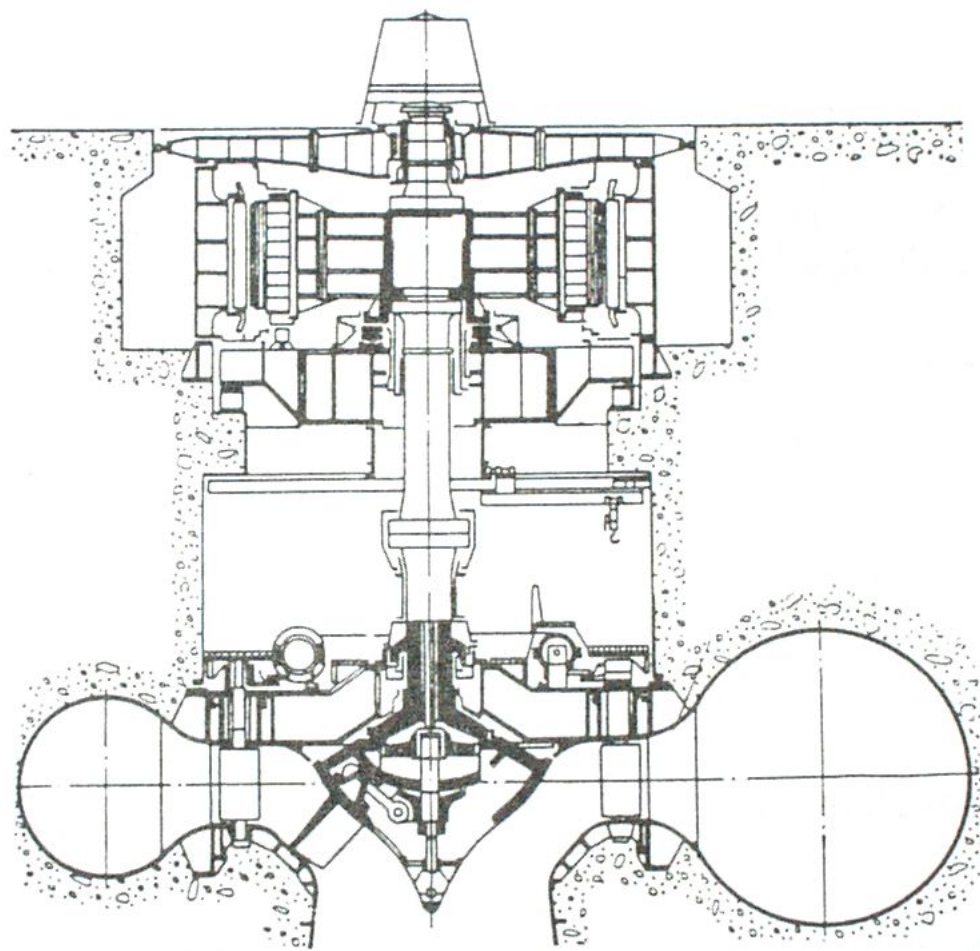
Nejčastěji používané turbíny

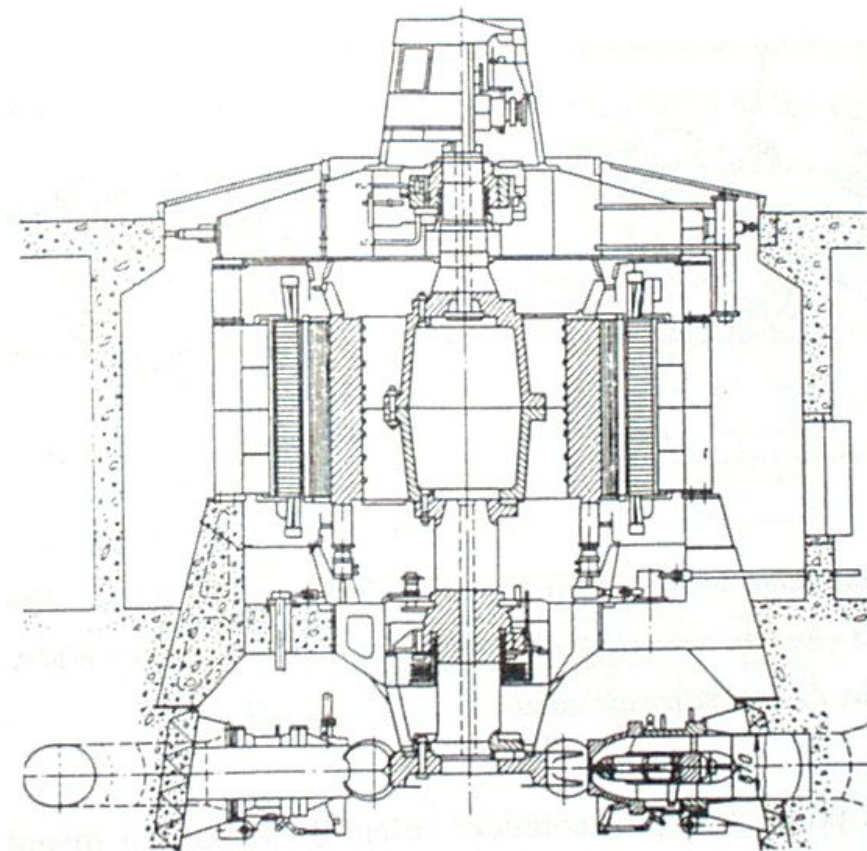
- Francisova turbína
- Dériazova turbína
- Kaplanova turbína
- Peltonova turbína
- Bánkiho turbína

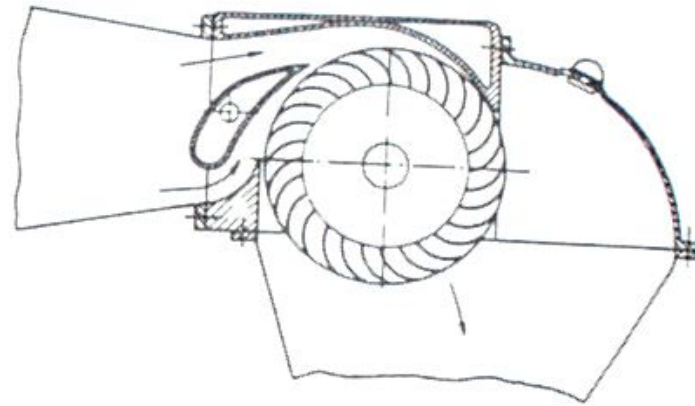
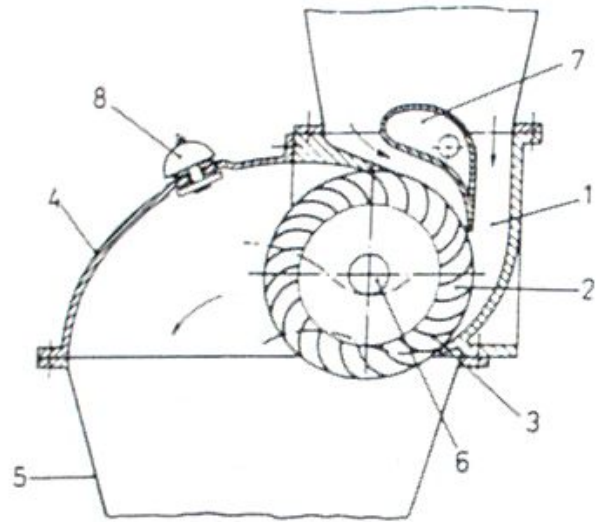












Základy teorie vodních turbín

- **měrná energie – energetický obsah**

- ◆ **energie polohová E_z**

- ◆ **energie tlaková E_p**

- ◆ **energie kinetická E_v**

$$E = g \cdot z + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$$

- **ustálené proudění ideální kapaliny**

- ◆ **Bernoulliho rovnice (bez ztrát)**

$$E_1 = E_2 = konst.$$

$$E_2 < E_1$$

- **měrná energie díla**

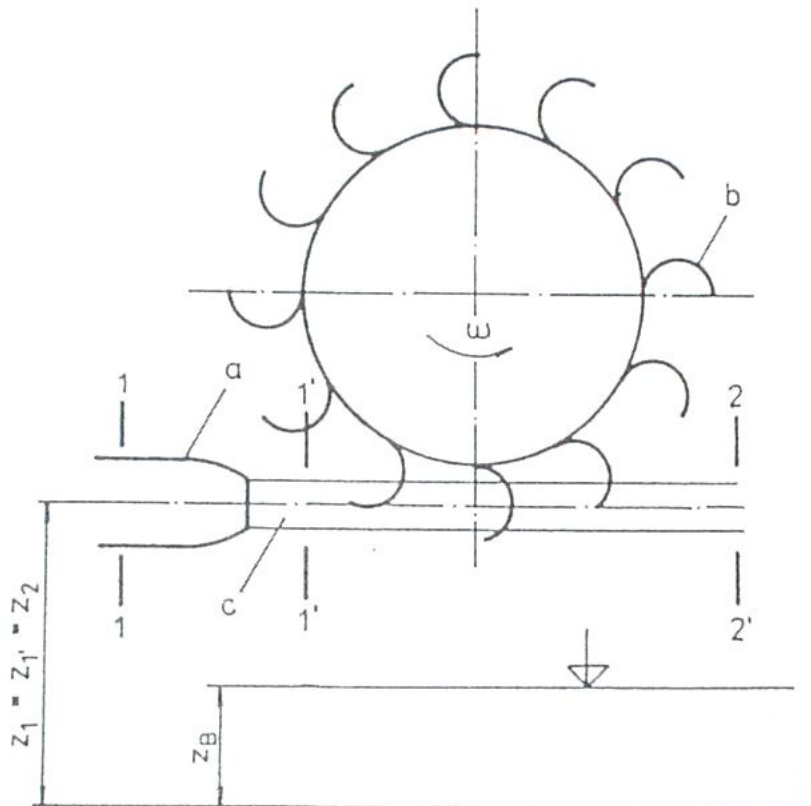
$$E_A - E_B = g \cdot (z_A - z_B) + \frac{p_A - p_B}{\rho} + \frac{v_A^2 - v_B^2}{2}$$

- **měrná energie turbíny**

$$E = g \cdot (z_1 - z_2) + \frac{p_1 - p_2}{\rho} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}$$

$$E = g \cdot (z_A - z_B) + \frac{p_A - p_B}{\rho} + \frac{v_A^2 - v_B^2}{2} - E_d$$

Rovnotlaké turbíny



$$E_1 = \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2}$$

$$E_{1'} = \frac{p_{1'}}{\rho} + \frac{v_{1'}^2}{2}$$

$$E_2 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2}$$

$$E_1 = E_{1'} + E_{d(1-1')} = E_2 + E_{d(1-2)}$$

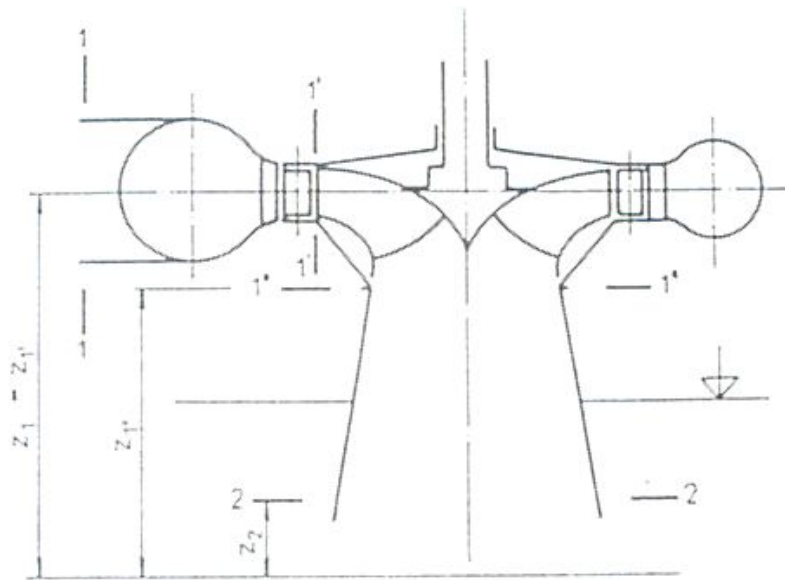
$$p_1 = p_{1''} + p_b$$

$$p_{1'} = p_2 = p_b$$

$$\frac{p_{1''}}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{v_{1'}^2}{2} + E_{d(1-1')} = \frac{v_2^2}{2} + E_{d(1-2)}$$

$$E = \frac{p_{1''}}{\rho} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}$$

Přetlakové turbíny



$$E_1 = z_1 \cdot g + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2}$$

$$E_{1'} = z_{1'} \cdot g + \frac{p_{1'}}{\rho} + \frac{v_{1'}^2}{2}$$

$$E_{1''} = z_{1''} \cdot g + \frac{p_{1''}}{\rho} + \frac{v_{1''}^2}{2}$$

$$E_2 = z_2 \cdot g + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2}$$

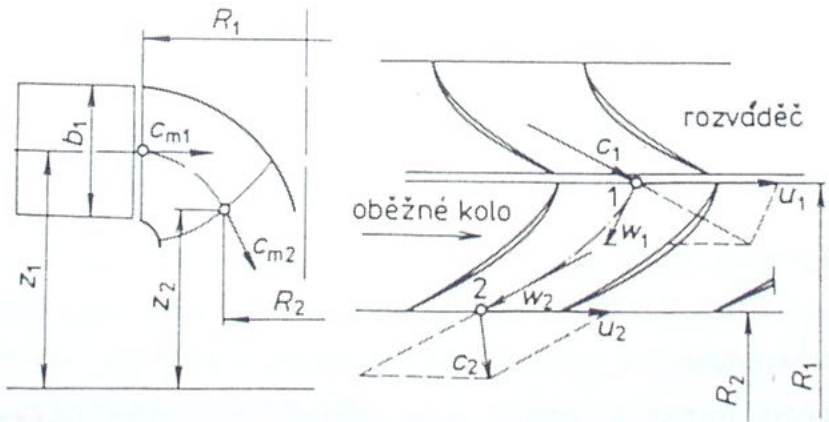
$$E_1 = E_{1'} + E_{d(1-1')}$$

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_{1'}}{\rho} + \frac{v_{1'}^2}{2} + E_{d(1-1')}$$

$$p_1 > p_{1'} > p_2$$

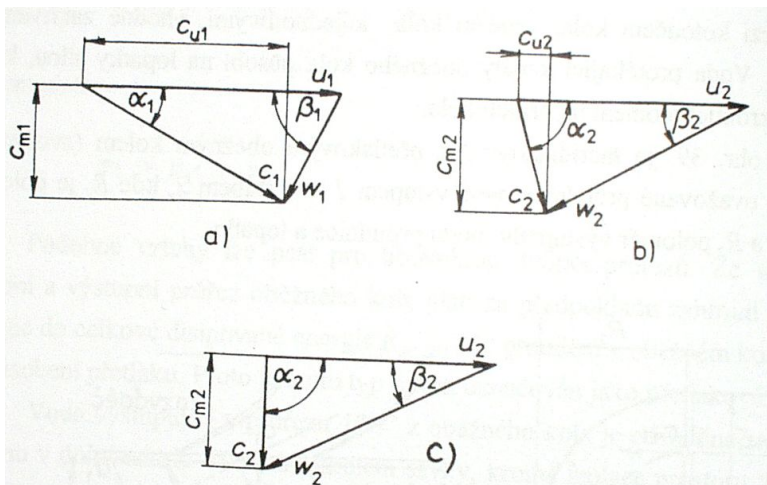
$$E = g \cdot (z_1 - z_2) + \frac{p_1 - p_2}{\rho} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}$$

Eulerova energetická rovnice



$$E \cdot \eta_h = u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2}$$

$$Q_k = 2\pi R_1 b_1 c_{m1}$$



$$w_1^2 = c_1^2 + u_1^2 - 2 u_1 c_1 \cos \alpha_1 \quad c_1 \cos \alpha_1 = c_{u1}$$

$$w_2^2 = c_2^2 + u_2^2 - 2 u_2 c_2 \cos \alpha_2 \quad c_2 \cos \alpha_2 = c_{u2}$$

$$u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2} = \frac{1}{2} (w_2^2 - c_2^2 - u_2^2 - w_1^2 + c_1^2 + u_1^2)$$

$$E \cdot \eta_h = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2}$$

Energetická bilance turbíny

$$\eta = \eta_Q \cdot \eta_h \cdot \eta_m$$

$$\eta_Q = \frac{Q - Q_z}{Q} = 1 - \frac{Q_z}{Q}$$

$$\eta_h = \frac{P_h}{P_t} = \frac{E - E_z}{E}$$

$$\eta = \frac{P}{P_h} = \frac{P_h - P_z}{P_h} = 1 - \frac{P_z}{P_h}$$

teoretický výkon

$$P_t = Q \rho E$$

hydraulický výkon

$$P_h = P_t \eta_Q \eta_h = Q \rho E \eta_Q \eta_h$$

mechanický výkon

$$P = P_h \eta_m = P_t \eta_Q \eta_h \eta_m = P_t \eta$$

Podobnost vodních turbín

$$E \eta_h = u_1 c_{u1}, \quad E' \eta'_h = u'_1 c'_{u1}$$

$$E \eta_h = k u_1^2, \quad E' \eta'_h = k u'^2_1$$

$$\frac{u_1}{u'_1} = \frac{n}{n'} = \left(\frac{E}{E'} \right)^{1/2}$$

$$\frac{Q}{Q'} = \frac{c_{m1}}{c'_{m1}} = \frac{u_1}{u'_1} = \left(\frac{E}{E'} \right)^{1/2}$$

$$\frac{P}{P'} = \frac{Q E}{Q' E'} = \left(\frac{E}{E'} \right)^{3/2}$$

$$\frac{M}{M'} = \frac{P}{P'} \frac{n'}{n} = \frac{E}{E'}$$

Změna rozměrů oběžného kola

$$\pi D_1 n = \pi D'_1 n' , \quad \frac{n}{n'} = \frac{D'_1}{D_1}$$

$$\frac{Q}{Q'} = \frac{D_1^2}{D'^2_1}$$

Jednotkové parametry

$$n_{1E1D} = \frac{n D_1}{\sqrt{E}} \quad (n_{1H1D} = \frac{n D_1}{\sqrt{H}})$$

$$Q_{1E1D} = \frac{Q}{D_1^2 \sqrt{E}} \quad (Q_{1H1D} = \frac{Q}{D_1^2 \sqrt{H}})$$

$$\eta_D = 1 - (1 - \eta_M) \sqrt[4]{\frac{D_M}{D_D}} \sqrt[10]{\frac{E_M}{E_D}}$$

Měrné otáčky

$$n_q = 333 n_b = 333 n \frac{Q^{1/2}}{E^{3/4}}$$

$$n_s = 1200 n \frac{Q^{1/2}}{E^{3/4}} \eta^{1/2}$$

Peltonova	4 až 15
Francisova pomaloběžná	25 až 35
normální	35 až 60
rychloběžná	60 až 100
Dériazova	85 až 115
Kaplanova (3 až 10 lopatek)	100 až 310

