

# Elektrárny A1M15ENY

## **přednáška č. 10**

*Jan Špetlík*

[spetlij@fel.cvut.cz](mailto:spetlij@fel.cvut.cz) - v předmětu emailu „ENY“

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky ČVUT, Technická 2, 166 27 Praha 6

Množství paliva:  $\dot{m}_{pal} = \frac{P_{net}}{\eta_{net} \cdot Q_i^r} = \frac{1000}{0,33 \cdot 15} = 202 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Množství síry v palivu:  $\dot{m}_S = \dot{m}_{pal} \cdot S^r = 202 \cdot 0,02 = 4,04 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Množství popela v palivu:  $\dot{m}_A = \dot{m}_{pal} \cdot A^r = 202 \cdot 0,15 = 30,3 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Množství vody v palivu:  $\dot{m}_W = \dot{m}_{pal} \cdot W^r = 202 \cdot 0,30 = 60,6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Množství uhlíku v palivu:  $\dot{m}_C = \dot{m}_{pal} \cdot (1 - W^r - A^r - S^r) = 202 \cdot (1 - 0,3 - 0,15 - 0,02) = 107,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Množství přivedeného vzduchu:

$$\dot{V}_{vz} = \lambda \cdot \dot{V}_{vzst} = \lambda \cdot \frac{22,4}{0,21} \cdot \left( \frac{\dot{m}_C}{12} + \frac{\dot{m}_S}{32} \right) = 1,3 \cdot \frac{22,4}{0,21} \cdot \left( \frac{107,1}{12} + \frac{4,04}{32} \right) = 1,3 \cdot 965 = 1255 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

což je:  $\frac{1255}{202} = 6,21 \text{ m}^3/\text{kg}$  paliva

Množství suchých spalin bez přebytku vzduchu:

$$\dot{V}_{snst} = \frac{22,3}{12} \cdot \dot{m}_C + \frac{21,9}{32} \cdot \dot{m}_S + 0,79 \cdot \dot{V}_{vzst} = 199,02 + 2,76 + 762,35 = 964 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Množství suchých spalin se zadaným přebytkem vzduchu:

$$\dot{V}_{sns} = \frac{22,3}{12} \cdot \dot{m}_C + \frac{21,9}{32} \cdot \dot{m}_S + 0,79 \cdot \dot{V}_{vzst} + (\lambda - 1) \cdot \dot{V}_{vzst} = 199,02 + 2,76 + 762,35 + (1,3 - 1) \cdot 965 = 1253,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Přebytek kyslíku v suchých spalinách na výstupu z kotle za KV bude:

$$\omega_{O_2(KV)} = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot \frac{\dot{V}_{vzst}}{\dot{V}_{sns}} = 0,21 \cdot (1,3 - 1) \cdot \frac{965}{1253,6} = 4,8 \%$$

Množství vlhkých spalin se zadaným přebytkem vzduchu:

$$\dot{V}_{sn} = \dot{V}_{sns} + 1,24 \cdot \dot{m}_W = 1253,6 + 1,24 \cdot 60,6 = 1328,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Poměry za filtrem:

$$\dot{m}_{pop(F)} = X_{pop} \cdot (1 - O_c) \cdot \dot{m}_A = 0,9 \cdot (1 - 0,999) \cdot 30,3 = 0,0272 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Poměry v odsiřovací jednotce:

Látkové množství zreagované síry:

$$\dot{n}_S = \frac{\eta_{ODS} \cdot \dot{m}_S}{M_S} = \frac{0,95 \cdot 4,04}{0,032} = 119,9 \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1}$$

Molární hmotnosti reaktantů a produktů:

$$M_{CaCO_3} = (40 + 12 + 3 \cdot 16) / 1000 = 0,1 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$M_{CaSO_4 \cdot 2H_2O} = (40 + 32 + 4 \cdot 16 + 2 \cdot 2 + 2 \cdot 16) / 1000 = 0,172 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$M_{CO_2} = (12 + 2 \cdot 16) / 1000 = 0,044 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Ve výsledné bilanci reakce platí

$$\dot{n}_S = \dot{n}_{CaCO_3} = \dot{n}_{CaSO_4 \cdot 2H_2O} = 2 \cdot \dot{n}_{O_2}$$

Potřebná teoretická hmotnost vápence:  $\dot{m}_{CaCO_3} = \dot{n}_{CaCO_3} \cdot M_{CaCO_3} = 119,9 \cdot 0,1 = 11,99 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Množství vzniklého sádrovce:  $\dot{m}_{CaSO_4 \cdot 2H_2O} = \dot{n}_{CaSO_4 \cdot 2H_2O} \cdot M_{CaSO_4 \cdot 2H_2O} = 119,9 \cdot 0,172 = 20,62 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Množství oxidu siřičitého:  $\dot{m}_{SO_2(ODS)} = (1 - \eta_{ODS}) \cdot \dot{n}_S \cdot M_{SO_2} = (1 - 0,95) \cdot 119,9 \cdot 0,032 = 0,364 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Změna bilance suchých spalin za odsířením:

Z původního množství suchých spalin ubude:  $\Delta \dot{V}_{SO_2} = -\eta_{ODS} \cdot \frac{21,9}{32} \cdot \dot{m}_S = -0,95 \cdot \frac{21,9}{32} \cdot 4,04 = -2,63 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

přibude CO<sub>2</sub>:  $\Delta \dot{V}_{CO_2} = +22,3 \cdot 10^{-3} \cdot \dot{n}_{CO_2} = +22,3 \cdot 10^{-3} \cdot 119,9 = +2,67 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

přibude zbytek z oxid. vzduchu:  $\Delta \dot{V}_{vz} = +22,4 \cdot 10^{-3} \cdot \dot{n}_{O_2} \cdot \frac{0,79}{0,21} = + \frac{22,3 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 119,9 = +1,34 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Celkově bilance:  $\dot{V}_{sns(ODS)} = \dot{V}_{sns} + \Delta \dot{V}_{SO_2} + \Delta \dot{V}_{CO_2} + \Delta \dot{V}_{vz} = 1253,6 - 2,63 + 2,67 + 1,34 = 1254,98 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Přebytek kyslíku v suchých spalinách na výstupu z odsíření bude:

$$\omega_{O_2(ODS)} = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot \frac{\dot{V}_{vzst}}{\dot{V}_{sns(ODS)}} = 0,21 \cdot (1,3 - 1) \cdot \frac{965}{1263,8} = 4,8 \%$$

Hmotnost emitovaného oxidu uhličitého:

$$\dot{m}_{CO_2} = \dot{m}_C \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_C} + \dot{m}_{C(ODS)} \cdot M_{CO_2} = 107,1 \cdot \frac{0,044}{0,012} + 199,9 \cdot 0,044 = 392,7 + 8,79 = 401,5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

### 1.A EMISNÍ LIMITY TZL

$$c_{TZLref} = c_{TZL} \cdot \frac{0,21 - \omega_{O_2ref}}{0,21 - \omega_{O_2(ODS)}} = \frac{\dot{m}_{pop(F)}}{\dot{V}_{sns(ODS)}} \cdot \frac{0,21 - \omega_{O_2ref}}{0,21 - \omega_{O_2(ODS)}} = \frac{0,0272}{1263,8} \cdot \frac{0,21 - 0,06}{0,21 - 0,048} = 19,9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Emisní limity TZL splňuje

### 1.B EMISNÍ LIMITY SO2

$$c_{SO_2ref} = c_{SO_2} \cdot \frac{0,21 - \omega_{O_2ref}}{0,21 - \omega_{O_2(ODS)}} = \frac{\dot{m}_{SO_2(ODS)}}{\dot{V}_{sns(ODS)}} \cdot \frac{0,21 - \omega_{O_2ref}}{0,21 - \omega_{O_2(ODS)}} = \frac{0,319}{1263,8} \cdot \frac{0,21 - 0,06}{0,21 - 0,048} = 233,7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Emisní limity SO2 nesplňuje, příliš sirnaté uhlí a tomu neodpovídající účinnost odsíření

## 2 HMOTNOSTNÍ TOKY

$$\dot{m}_{pal} = 202 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{CaCO_3} = 19,99 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{CaSO_4 \cdot 2H_2O} = 34,38 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{CO_2} = 401,5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

### 3 EMISNÍ POVOLENKY

Na 1 vyrobenou a prodanou MWh připadá externalita:

$$E_{CO_2/MWh} = \frac{3600 \cdot \dot{m}_{CO_2}}{P_{net}} \cdot E_{CO_2/t} = \frac{3600 \cdot 401,5}{1000} \cdot 25 = 1445,4 \text{ kg} \cdot \text{MWh}^{-1} \cdot 0,025 \text{ EUR} \cdot \text{kg}^{-1} = 36,1 \text{ EUR} \cdot \text{MWh}^{-1}$$

Bude-li tato elektrárna povolenky nakupovat, bude jen toto představovat podíl

$$\frac{E_{CO_2/MWh}}{V_{/MWh}} = \frac{36,1}{60} = 60 \%$$

z obrátu za vyrobenou elektrickou energií

# Čerpadla

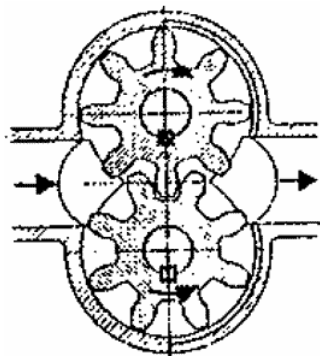
Příkon čerpadla:

$$P = \frac{Q \cdot \rho}{\eta} \left( H \cdot g + \frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} \right) = \frac{Q \cdot \rho}{\eta} \cdot Y$$

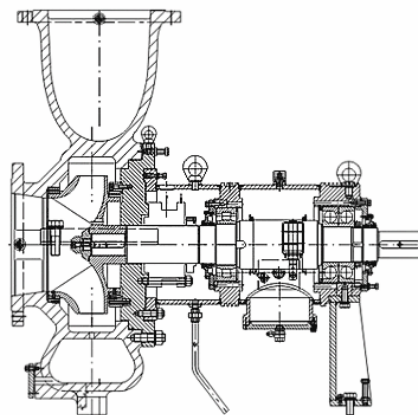
$Y$  [J.kg<sup>-1</sup>] měrná energie

Rozdělení čerpadel:

- **hydrostatická** – převažuje tlaková a potenciální energie  $Y \approx H \cdot g + \frac{p}{\rho}$
- **hydrodynamická** – převažuje kinetická složka energie  $Y \approx \frac{c^2}{2}$

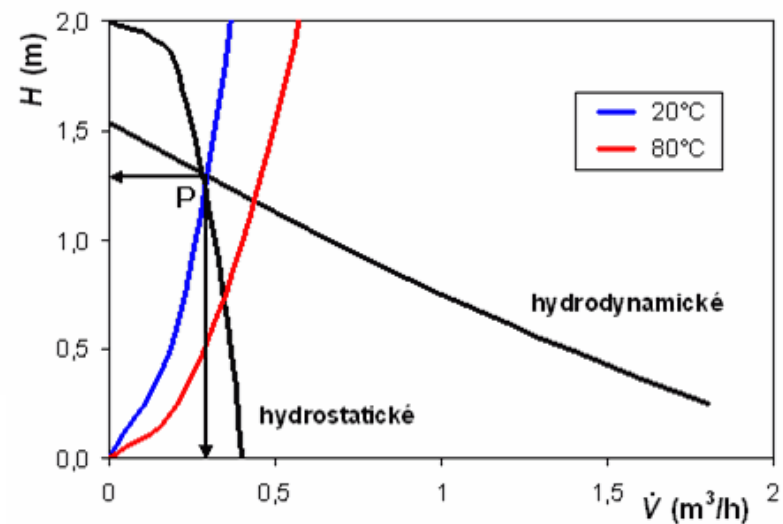


Hydrostatické  
zubové čerpadlo



Hydrodynamické  
procesní čerpadlo

Q-H charakteristika:



# Ventilátory

## Dopravní přetlak:

- do 1 kPa – nízkotlaké
- 1 až 3 kPa - středotlaké
- 3 až 10 kPa – vysokotlaké

Pro vyšší přetlaky – dmychadla a kompresory

## Celková účinnost ventilátoru:

$$\eta = \eta_m \cdot \eta_i \quad \eta_m \text{ mechanická účinnost (tření ložisek, vibrace)}$$

$$\eta_i = \frac{\Delta p_c}{\Delta p_c + \Delta p_z}$$

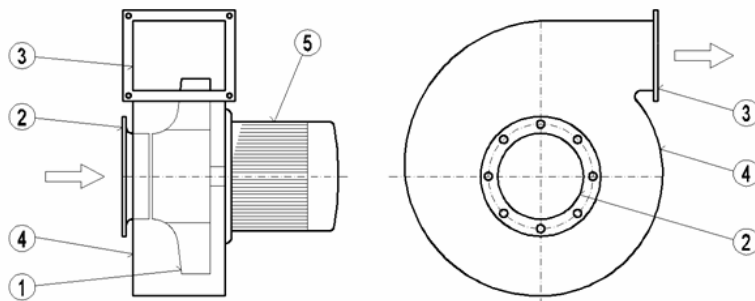
vnitřní účinnost  
(tlakové ztráty polytropického děje)

## Příkon ventilátoru na spojce:

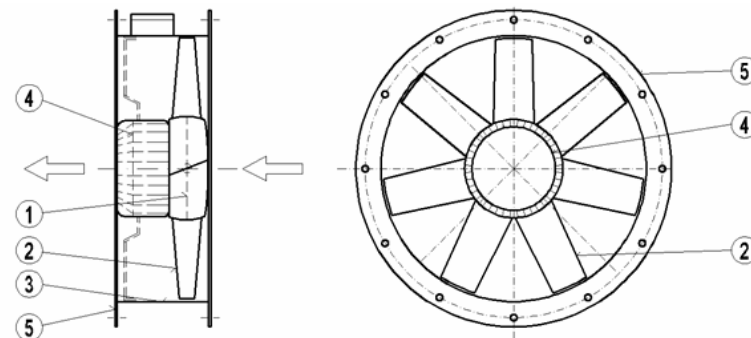
$$P_{mech} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_c}{\eta}$$

## Rozdělení ventilátorů:

### **Radiální**



### **Axiální**

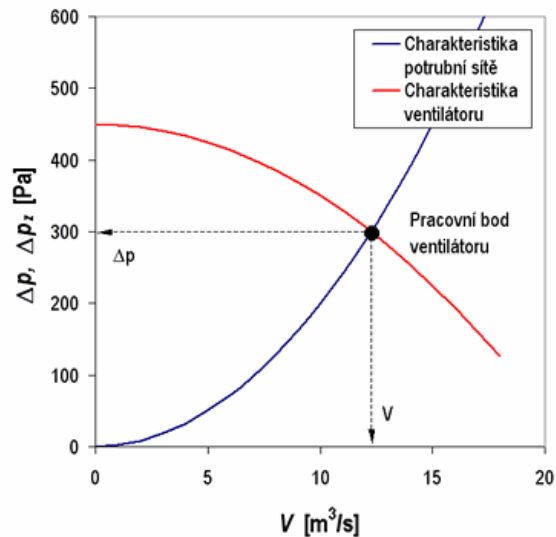


# Ventilátory

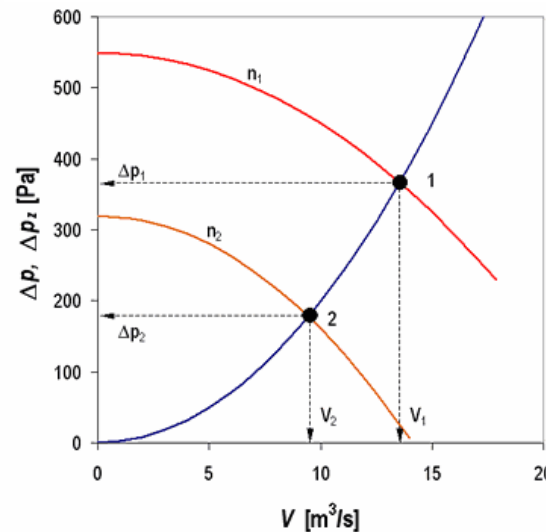
## Pracovní charakteristika ventilátoru:

Závislost vyvozeného přetlaku na objemovém průtoku při konstantních otáčkách

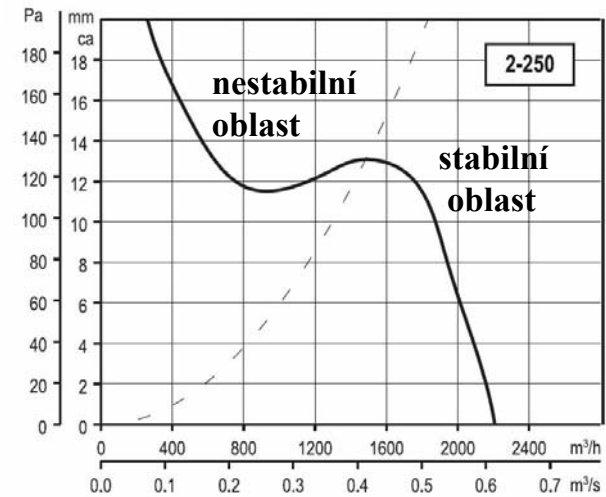
Pracovní bod se nachází v průsečíku pracovní charakteristiky a charakteristiky potrubní sítě



Charakteristika typická pro radiální ventilátor



Vliv změny otáček na novou pracovní charakteristiku



Charakteristika typická pro axiální ventilátor

Parametr	a) změna otáček při $\rho = \text{konst.}$	b) změna hustoty při $n = \text{konst.}$
Objemový průtok vzduchu $V$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	$V_2 = V_1 \frac{n_2}{n_1}$	$V_2 = V_1$
Celkový dopravní tlak $\Delta p$ [Pa]	$\Delta p_2 = \Delta p_1 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$	$\Delta p_2 = \Delta p_1 \frac{\rho_2}{\rho_1}$
Výkon ventilátoru $P$ [W]	$P_2 = P_1 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3$	$P_2 = P_1 \frac{\rho_2}{\rho_1}$



# Přehled největších TE v ČR

Elektrárna	Celkový instalovaný výkon [MW]	bloků	Rok uvedení do provozu	palivo	provozovatel
Prunéřov II	1 050	5	1981 - 82	hnědé uhlí	ČEZ
Počerady	1 000	5	1970 - 77	hnědé uhlí	ČEZ
Chvaletice	800	4	1977 - 78	hnědé uhlí	ČEZ
Dětmarovice	800	4	1975 - 76	černé uhlí	ČEZ
Tušimice II	800	4	1974 - 75	hnědé uhlí	ČEZ
Mělník III	500	1	1981	hnědé uhlí	ČEZ
Prunéřov I	440	4	1967 - 68	hnědé uhlí	ČEZ
Vřesová	370	2	1996	zemní plyn, energoplyn	Sokolovská uhelná
Opatovice	363	6	1960 - 97	hnědé uhlí	Elektrárny Opatovice
Mělník I	352	6	1961 - 95	hnědé uhlí	ENERGOTRANS
Kladno - Dubská	306	4	1976 - 99	hnědé uhlí, černé uhlí, biomasa	Alpiq Generation (CZ)
Ostrava-Kunčice	254	11	1957 - 2000	černé uhlí, hutné plyn	Arcelor Mittal
Komořany	239	8	1959 - 98	hnědé uhlí, zemní plyn	United Energy
Mělník II	220	2	1971	hnědé uhlí	ČEZ
Ledvice 2	220	2	1967	hnědé uhlí	ČEZ
Vřesová (teplárna)	220	4	1967 - 91	hnědé uhlí, zemní plyn	Sokolovská uhelná
Tisová I	184	4	1959 - 60	hnědé uhlí, biomasa	ČEZ
Třebovice	174	2	1961	černé uhlí, lehký topný olej	Dalkia
Litvínov T200	166	8	1942 - 55	hnědé uhlí	Unipetrol
Poříčí	165	3	1957	hnědé uhlí, černé uhlí, biomasa	ČEZ

# Vodní elektrárny

## Princip:

- přeměna kinetické energie proudící vody na rotační energii turbíny
- turbína je na společné hřídeli s generátorem

## Výhody:

- obnovitelný zdroj (*ne však zcela z pohledu zákona 180/2005 Sb.*)
- neznečišťují ovzduší, neprodukují emise
- nezávislé na dopravě paliv a surovin
- špičkový zdroj (doba najehtí na plný výkon ~ 100 s)
- vyžadují minimální obsluhu i údržbu a lze je ovládat na dálku
- nízké provozní náklady, minimální investiční riziko
- zapojitelné do vodohospodářského systému
- velmi vysoká životnost

## Nevýhody:

- značná cena a čas výstavby, dlouhá doba návratnosti (až 15 let)
- nutnost zatopení velkého území
- závislost na stabilním průtoku vody

## Zastoupení:

- v ČR cca 10% spotřeby elektrické energie

# Vodní elektrárny

Podle principu akumulace vodní energie (typu vzdouvacího zařízení):

- **průtočné /jezové/** (spád je obvykle vytvořen jezem)
- **derivační / náhonové/** (spád je vytvořen umělým zařízením - náhonem)
- **přehradní /akumulační/** (využívají spád vytvořený přehradní zdí)
- **přečerpávací** (využívají vodu přečerpanou z dolní nádrže do horní)
- **přilivové /slapové/** (spád je vytvořen mořským přílivem a odlivem)

Podle spádu (výsledného tlaku):

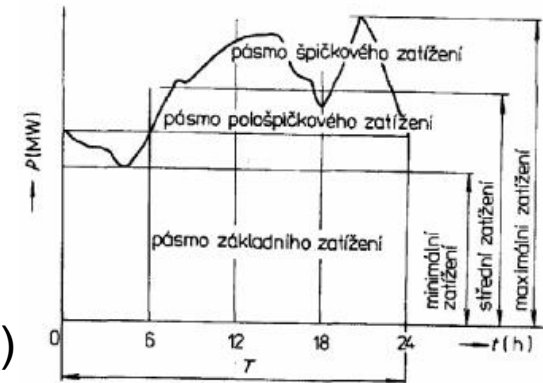
- **nízkotlaké** (spád do 20 m)
- **středotlaké** (spád 20 – 100 m)
- **vysokotlaké** (spád nad 100 m)

Podle využití v DDZ:

- **základní** (doba využití  $\tau \approx$  nad 6 tis. hod/rok )
- **pološpičkové** (doba využití  $\tau \approx$  2-4,5 tis. hod/rok )
- **špičkové** (doba využití  $\tau \approx$  0,7-1,5 tis. hod/rok )

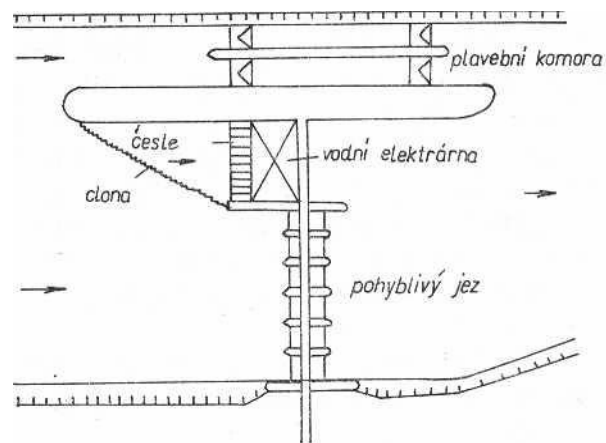
Podle výkonu:

- **malé vodní elektrárny /MVE/** (do 10 MW – počítají se mezi OZE)
- **(velké) vodní elektrárny /VE/** (nad 10 MW)

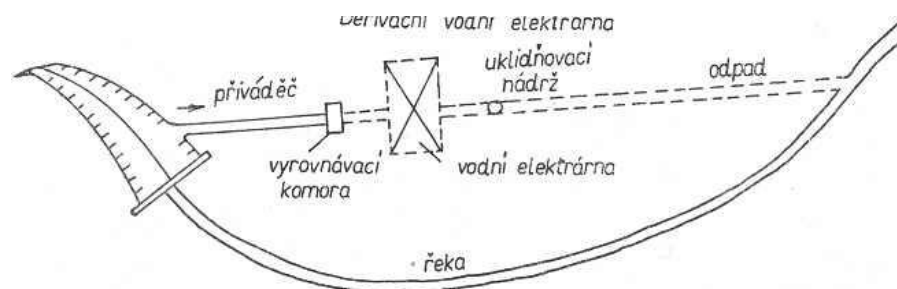


DDZ a nasazení různých typů elektráren

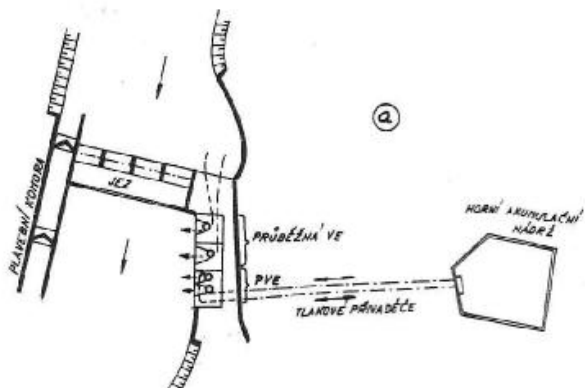
# Vodní elektrárny



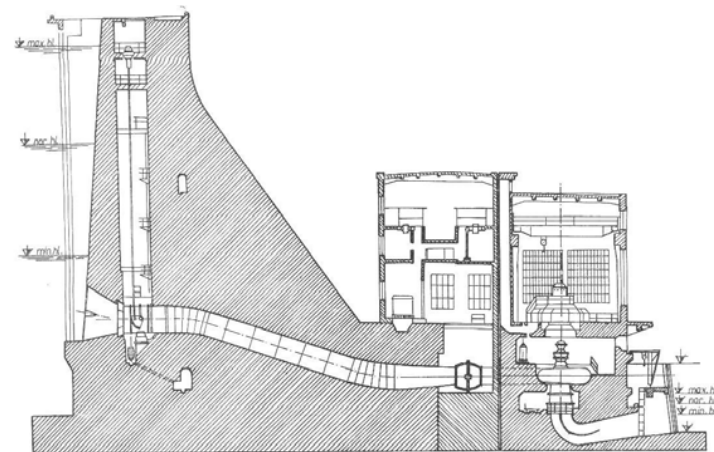
průtočná (jezová) elektrárna



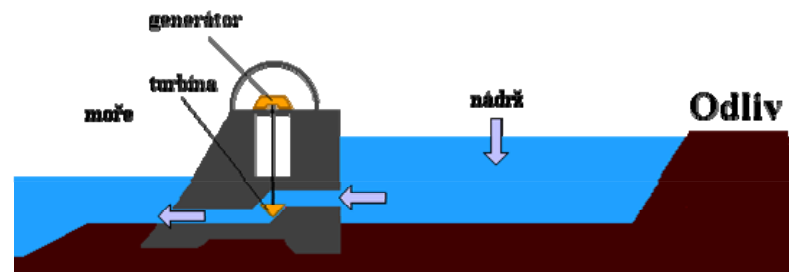
derivační (náhonová) elektrárna



přečerpávací elektrárna



akumulační (přehradní) elektrárna



přilivová elektrárna

# Vodní elektrárny

## Hrubý spád $H_{HR}$ :

Hrubý (brutto) spád [m] je rozdíl hladin mezi profilem vzduť hladiny a profilem pod vzdouvacím objektem

## Čistý spád $H$ :

Čistý (užitečný) spád [m] je hrubý spád zmenšený o hydraulické ztráty vzniklé v přívodním kanálu a ztráty třením v odváděcím kanálu

$$H = H_{HR} - \sum_i H_{zi} - \frac{v_{OK}^2}{2g} + \frac{v_{PK}^2}{2g}$$

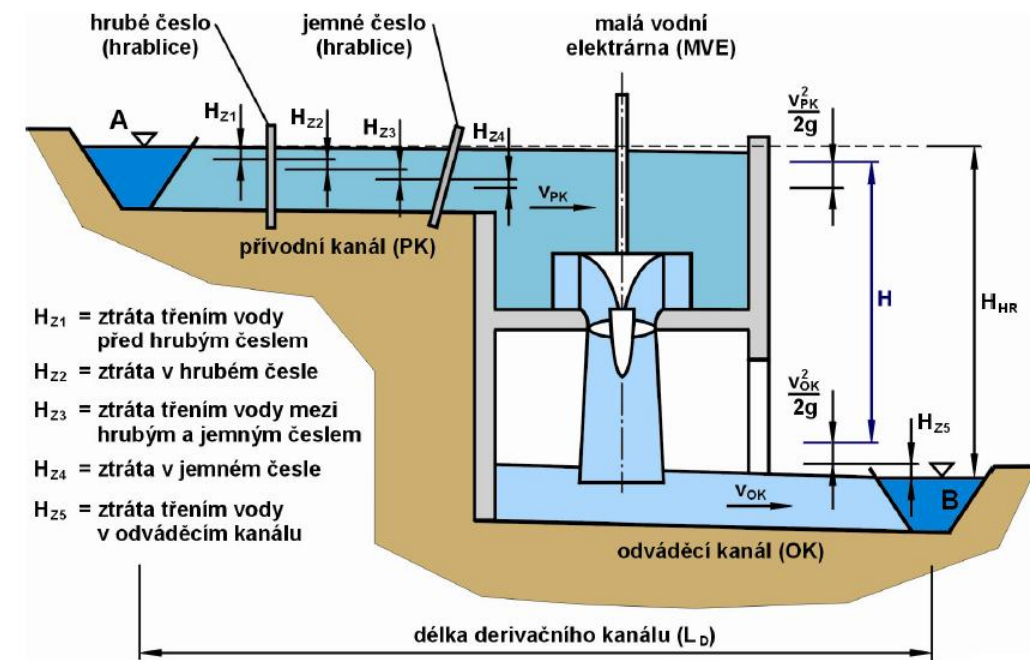
## Skutečný výkon turbíny:

$$P = \eta_o \cdot \eta_t \cdot \eta_m \cdot \rho \cdot Q_t \cdot H \cdot g = \eta_o \cdot \eta_t \cdot \eta_m \cdot \rho \cdot Q_t \cdot Y$$

$\eta_o$  [-] objemová účinnost

$\eta_t$  [-] hydraulická účinnost turbíny

$\eta_m$  [-] mechanická účinnost turbíny



- $H_{z1}$  = ztráta třením vody před hrubým česlem
- $H_{z2}$  = ztráta v hrubém česle
- $H_{z3}$  = ztráta třením vody mezi hrubým a jemným česlem
- $H_{z4}$  = ztráta v jemném česle
- $H_{z5}$  = ztráta třením vody v odváděcím kanálu

$Q_t$  [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]

průtok vody

$$\dot{m}_t = Q_t \cdot \rho$$

$Y$  [ $J \cdot kg^{-1}$ ]

měrná energie

$$Y = H \cdot g$$

# Vodní elektrárny

## Základní pojmy:

**Vodní stroj** – mění mechanickou energii vody (potenciální nebo kinetickou) na mechanickou energii tuhého tělesa (rotující hřídel, pohybující se píst) nebo naopak mechanickou energii tuhého tělesa na mechanickou energii vody

**Vodní motor** – mění mechanickou energii vody na mechanickou energii tuhého tělesa

**Vodní čerpadlo** – přeměňuje mechanickou energii hřídele nebo pístu na mechanickou energii vody

**Hydroalternátor** – přeměňuje mechanickou energii hřídele na střídavý elektrický proud

**Motorgenerátor** – schopen přeměňovat jak mechanickou energii na elektrickou, tak i opačně

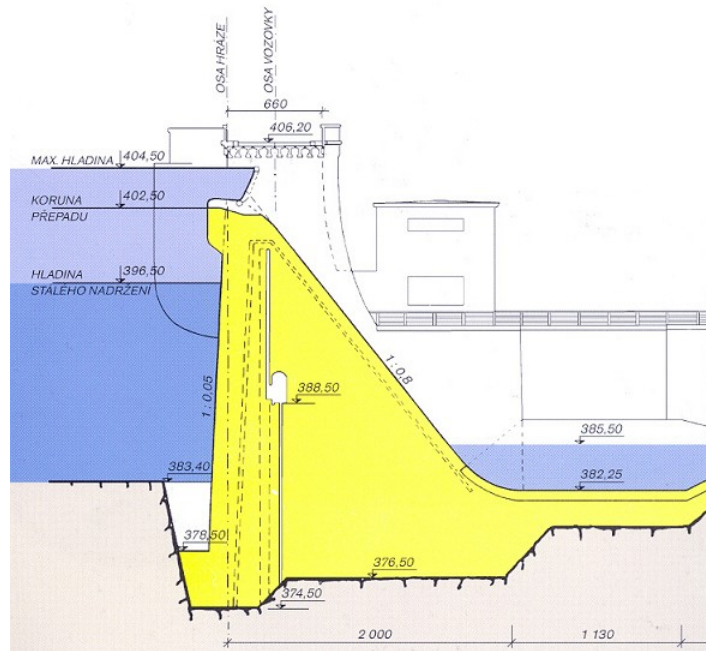
**Vodní soustrojí** – celek tvořený vodním strojem a hydroalternátorem nebo motorgenerátorem

## Součásti VE:

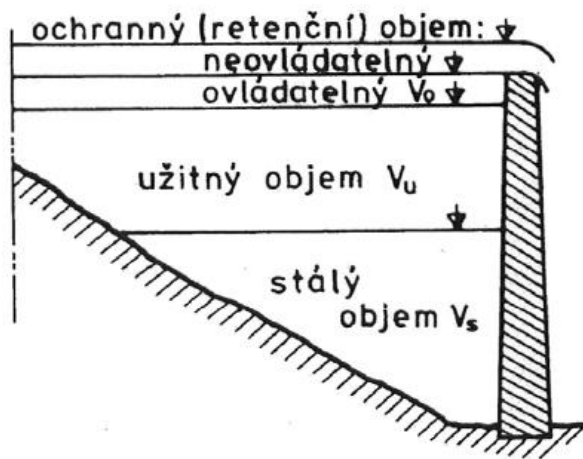
- **vtokový objekt**
- **přívodní potrubí (přivaděč)**
- **vyrovnávací věž (vyrovnávací komora)**
- **přívodní potrubí k turbíně**
- **spirála**
- **vodní turbína**
- **savka**
- **výtokový objekt (vývařiště, odváděcí kanál)**

# Prvky vodní elektrárny

Přehrada:

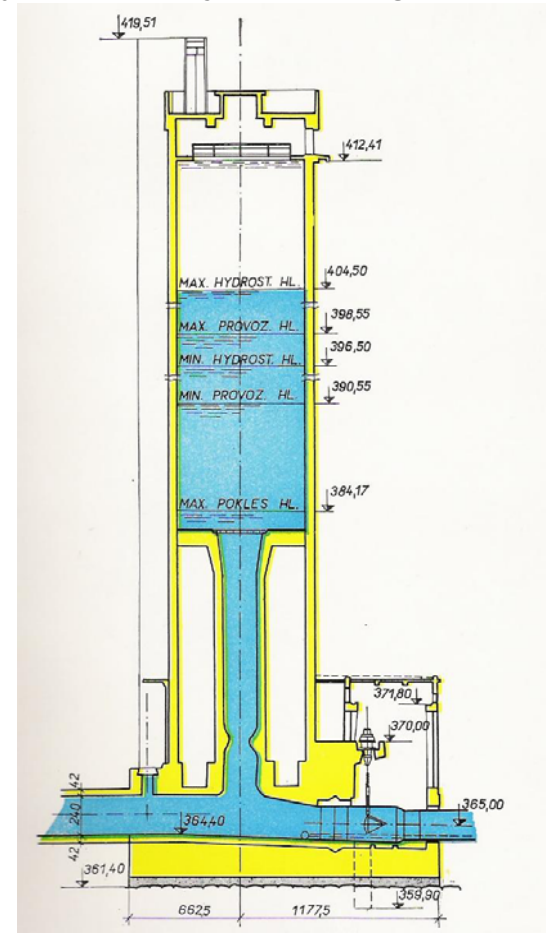


Přehrada Křižanovice I (VE Práčov)



Vyrovnávací komora:

Má za úkol vyrovnat rázové hydrodynamické jevy související s uzavíráním armatur případně přechodnými elektrodynamickými jevy v soustrojí turbína-generátor

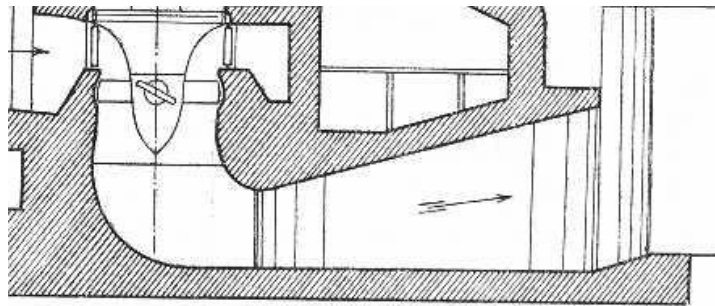


Vyrovnávací komora v přivaděči k VE Práčov

# Prvky vodní elektrárny

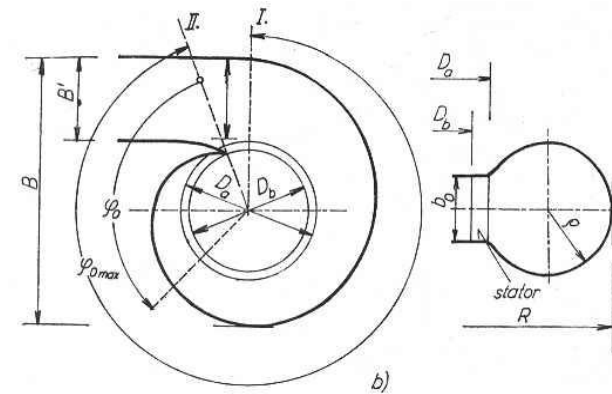
## Savka:

Kónicky se rozšiřující potrubí vedoucí pod hladinu vývařiště. Vytváří podtlak na spodních částech lopatek turbíny (u přetlakových turbín). Tím dochází ke zvyšování relativní rychlosti v oběžném kole rotoru turbíny. Výsledná absolutní výtoková rychlost tak poklesne a turbíně je předána větší energie. Turbína tak může využít, jinak ztracený, zbytkový spád, který zaujímá výškový rozdíl mezi turbínou a vývařištěm

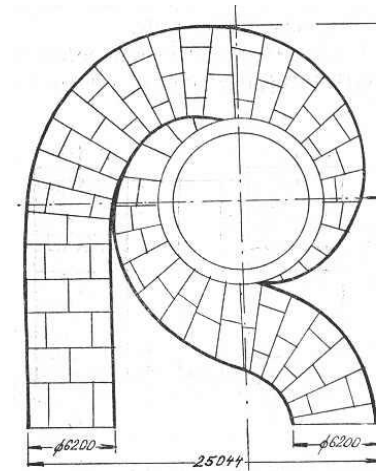


## Spirála:

Zajišťuje rovnoměrný přítok do rozváděcích lopatek turbíny



jednoduchá spirála



dvojitá spirála



# Vodní turbíny - teorie

## Idealizovaná Peltonova turbína:

Voda vtéká do turbíny rychlostí  $c_1$ . Vzhledem k lopatce otáčející se rychlostí  $u$  se voda pohybuje rychlostí  $v$  tak, že při opuštění lopatky změni směr o  $180^\circ$ . Objemový průtok vody  $Q$  je konstantní a ztráty třením se zanedbávají.

Z bilance relativních rychlostí je reakční síla na lopatku:

$$2 \cdot Q \cdot (c_1 - u) = R$$

Výkon turbíny:

$$P = R \cdot u = 2 \cdot Q \cdot (c_1 - u) \cdot u$$

Maximum výkonu nastane pro:

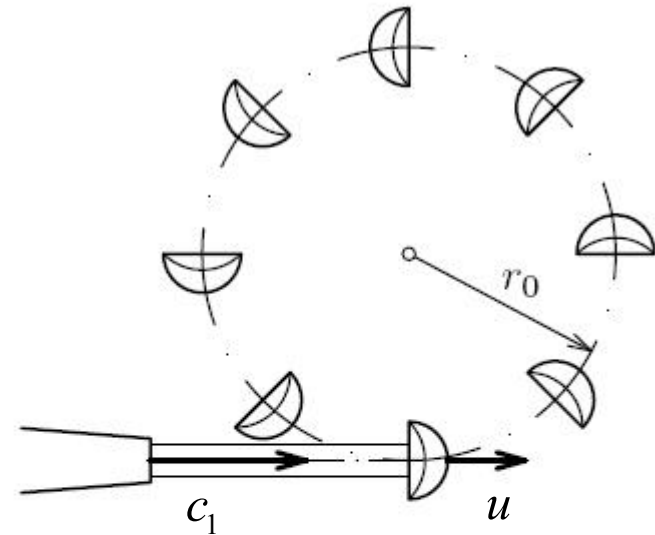
$$\frac{dP}{du} = 0 \Rightarrow u_{max} = \frac{c_1}{2}$$

Absolutní výtoková rychlost je:

$$c_2 = v_2 + u = -(c_1 - u) + u = -(c_1 - 2 \cdot u)$$

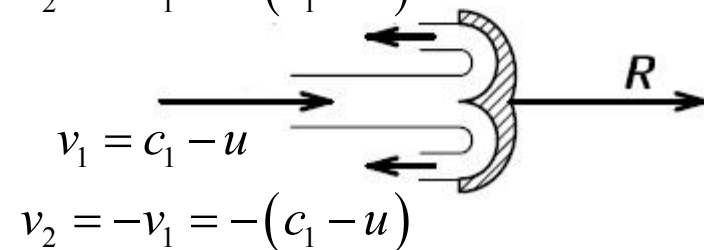
Hydraulická účinnost turbíny je:

$$\eta_t = 1 - \frac{P_{ztr}}{P_{přiv}} = 1 - \frac{(c_1 - 2 \cdot u)^2}{c_1^2} \quad \text{a pro } c_2 \Big|_{P=P_{max}} = -\left(c_1 - 2 \cdot \frac{c_1}{2}\right) = 0 \quad \text{je } \eta_t = 1$$



Relativní rychlosti na lopatce:

$$v_2 = -v_1 = -(c_1 - u)$$



# Vodní turbíny - teorie

Ve skutečnosti je děj složitější: jednotlivé rychlosti se musí sčítat vektorově v závislosti na vtokovém a výtokovém úhlu, obvodová rychlost se vlivem změny poloměru může měnit, relativní rychlost vody na oběžném kole se vlivem tlakových změn také mění

Obecně platí Eulerova turbínová věta:

$$Y = c_{1(u1)} \cdot u_1 - c_{2(u2)} \cdot u_2$$

přidáme-li ještě měrnou energii zmařenou průchodem turbínou na teplo:

$$Y_{id} = c_{1(u1)} \cdot u_1 - c_{2(u2)} \cdot u_2 + Y_{ztr}$$

Hydraulická účinnost je potom:

$$\eta_t = \frac{Y}{Y_{id}}$$

# Vodní turbíny - teorie

Z hlediska přeměny energie dělíme turbíny na:

- **rovnotlaké**
- **reakční**

U rovnotlakých turbín:

Voda vstupuje do *rozdávěcích lopatek*, kde se její tlaková energie mění na kinetickou. Správným zakřivením lopatek získává voda optimální směr pro vstup do opačně zakřivených *oběžných lopatek* turbíny. Voda vtéká do oběžného kola už za atmosférického tlaku. Tlak vody je tak po celé dráze oběžného kola konstantní a *relativní rychlost vzhledem k rotoru mění pouze svůj směr, ale nikoli velikost*. Po předání značné části své kinetické energie vytéká voda se zbytkovou rychlostí.

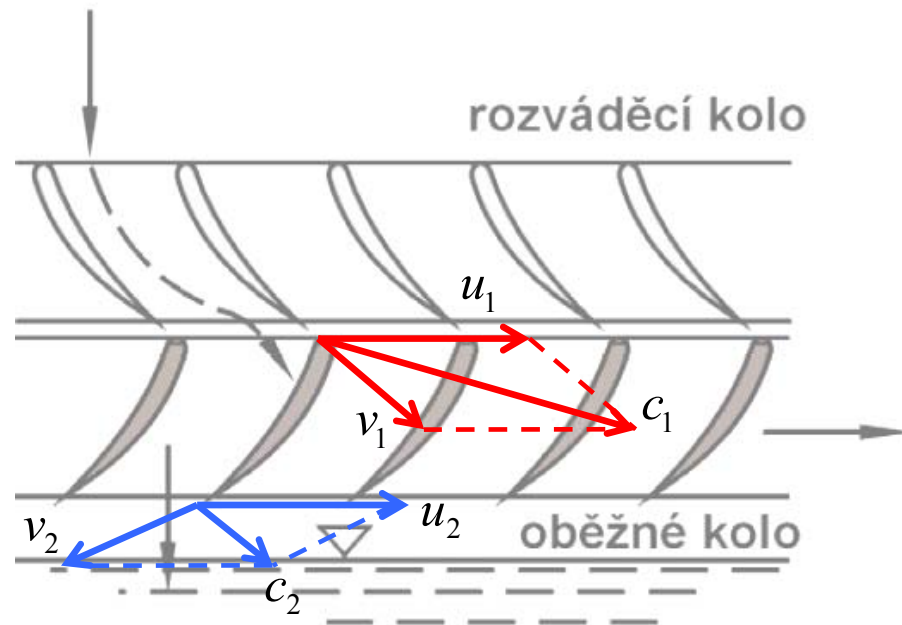
U reakčních turbín:

Voda vstupuje do *rozdávěcích lopatek*, kde se její tlaková energie mění na kinetickou a vstupuje do oběžných lopatek. Díky použití savky vzniká ale rozdílový tlak před a za oběžnými lopatkami. To se projeví tím, že vlivem postupného úbytku tlaku vody *na oběžném kole roste její relativní rychlost* (tlaková energie se mění na kinetickou). Tím se sníží výsledná absolutní výtoková rychlost a zužitkuje se spád od lopatek turbíny k vývařišti.

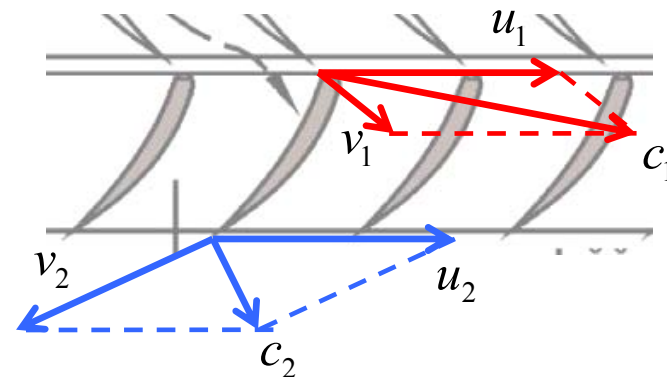
Pozn. Rozdělení na rovnotlaké a reakční turbíny je tedy stejný jako u parních turbín. Voda je ale na rozdíl od páry (téměř) nestlačitelná a platí pro ni rovnice kontinuity

# Vodní turbíny - teorie

Rovnotlaká turbína:



Reakční turbína:



$c_1$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] vtoková absolutní rychlost vody  
 $v_1$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] vtoková relativní rychlost vody  
 $u$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] obvodová rychlost rotoru

$c_2$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] výtoková absolutní rychlost vody  
 $v_2$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] výtoková relativní rychlost vody

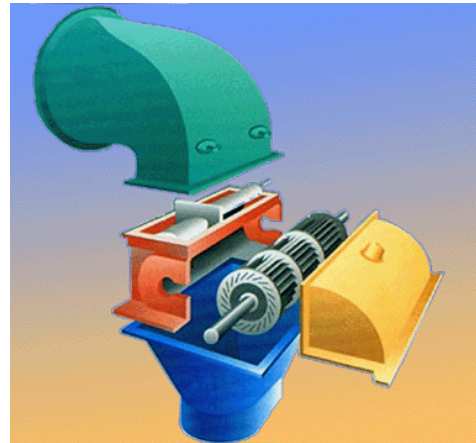
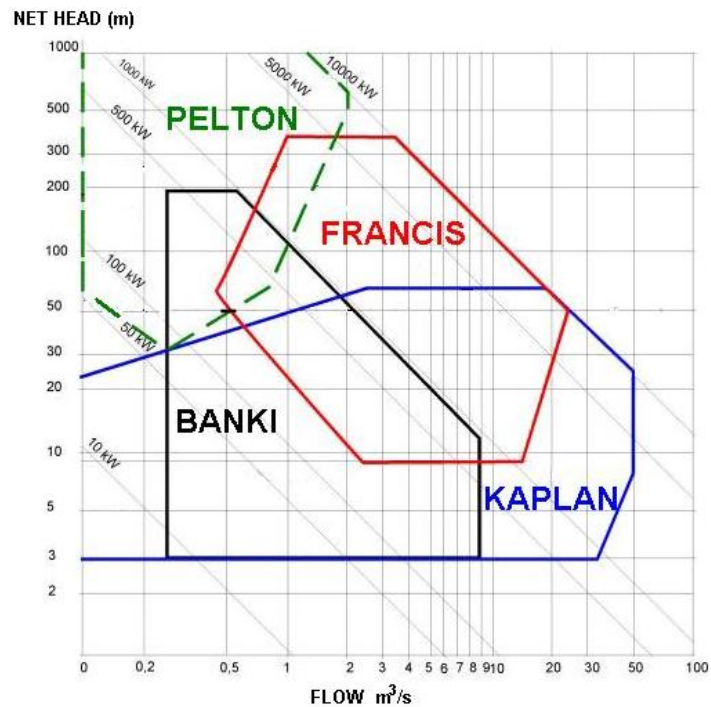
Pozn. "relativní" = vzhledem k poloze rotoru

# Vodní turbíny

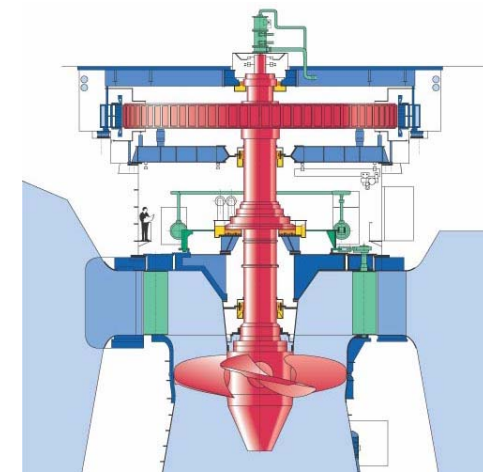
Typy turbín používaných ve VE:

- **Bánkiho**
- **Kaplanova**
- **Francisova**
- **Peltonova**

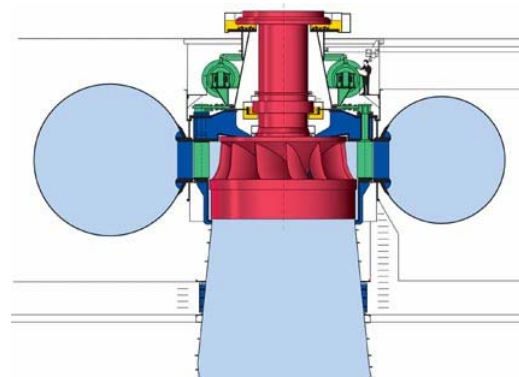
Volba turbín dle rozsahu průtoku a spádu:



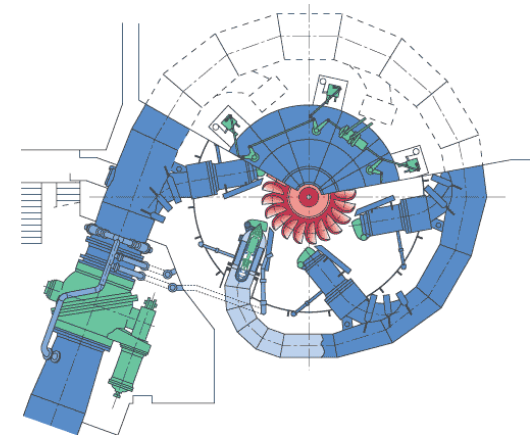
Bánkiho turbína



Kaplanova turbína



Francisova turbína

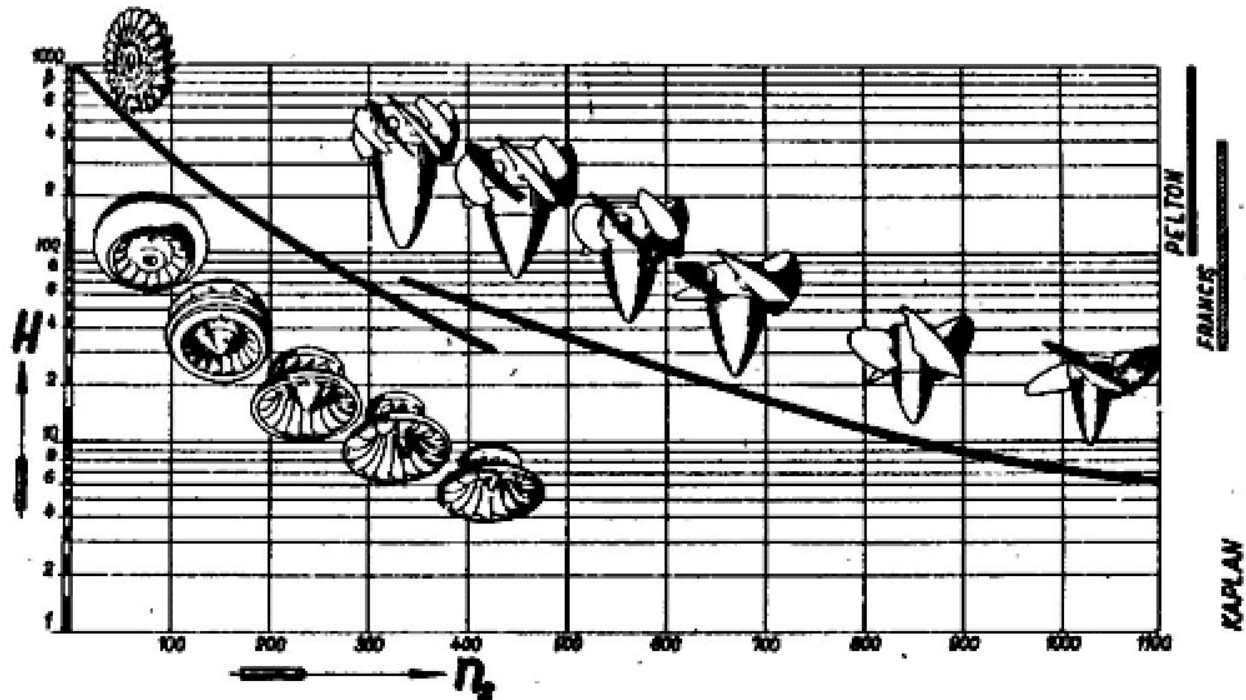


Peltonova turbína

# Vodní turbíny

Volba turbín dle rozsahu  
otáček a spádu:

Typ turbíny	provedení	$n_s$
Peltonova	s jednou dýzou	4 - 35
	s dvěma dýzami	17 - 50
	se čtyřmi dýzami	24 - 70
Francisova	pomalubežná	80 - 120
	normální	120 - 220
	rychlobežná	220 - 350
	expresní	350 - 450
Kaplanova		450 - 1000



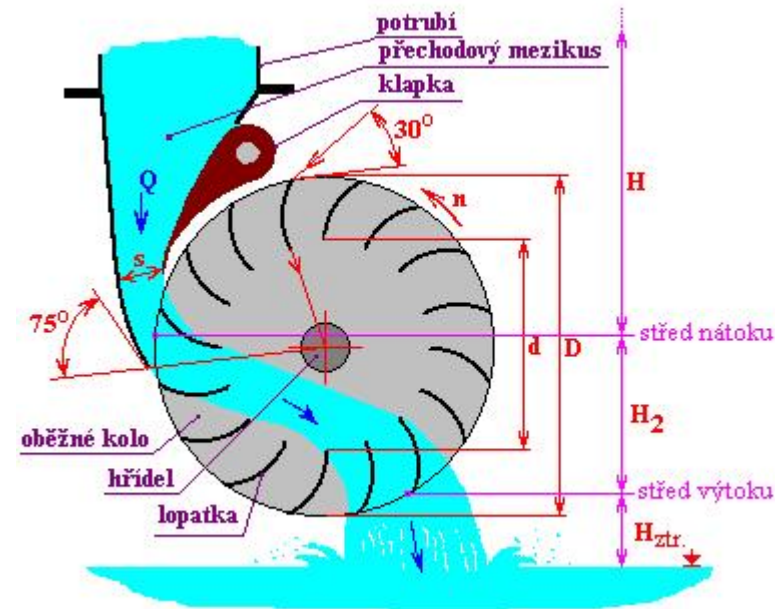
# Bánkiho turbína

## Popis:

- **rovnotlaká** turbína
- A.G.M. Mitchel (1903), pro praktické použití ji dopracoval maďarský profesor D. Banki v r.1918
- voda přiváděna k turbíně potrubím kruhového průřezu
- před turbínou mezikus měnící kruhový průřez na obdélný, na jeho konci klapka (regulace)
- voda předává lopatkám turbíny energii ve dvou místech
- při prvním průtoku lopatkami se turbíně předává asi **79%**, při druhém asi **21%** z celkového výkonu turbíny
- plně je využitý spád  $H$ , částečně i spád  $H_2$ , výškový rozdíl mezi oběžným kolem a spodní hladinou  $H_{ztr}$  je spád ztracený

## Použití

- pro malé průtoky a malé a středně velké spády
- cenově příznivé řešení



$H$	činný spád
$H_2$	spád v kole
$H_{ztr}$	výška nad spod. vodou (ztrátová)
$D$	vnější průměr kola
$d$	průměr, kde končí lopatky

# Francisova turbína

## Popis:

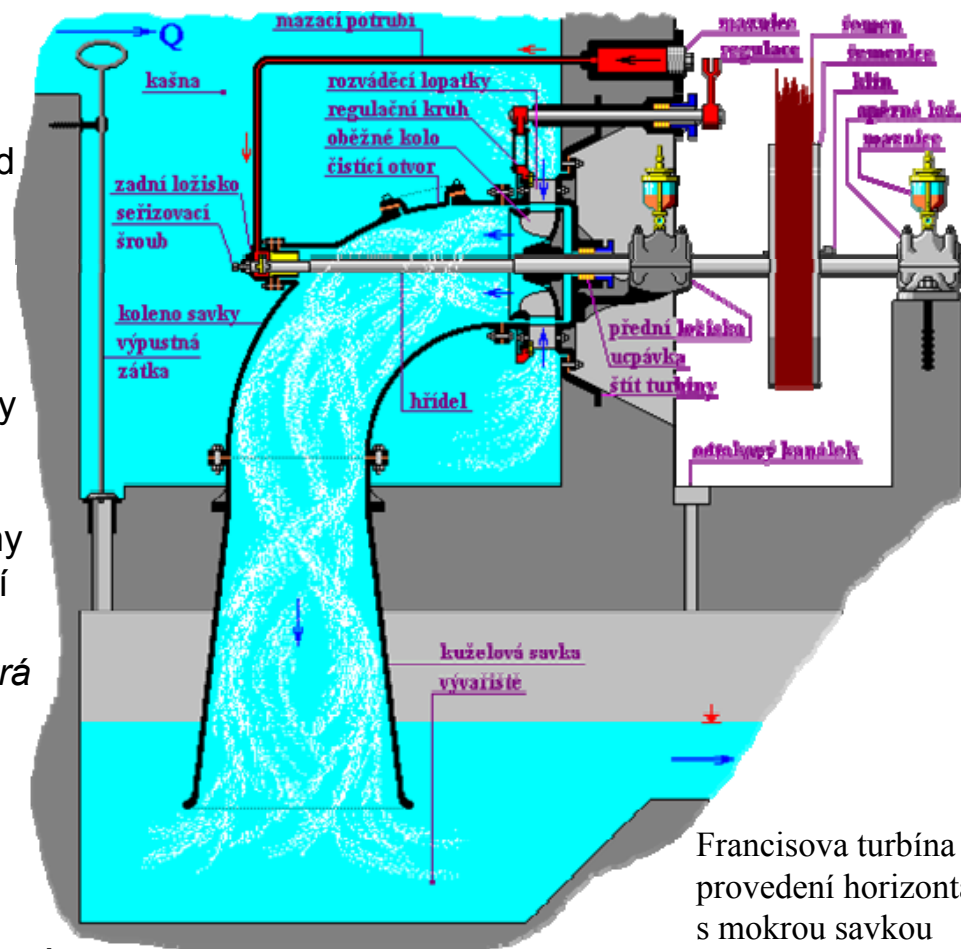
- **reakční turbína**
- J. B. Francis (1848)
- díky *sacímu efektu* využívá turbína celý spád i když je oběžné kolo nad hladinou vývařiště
- dvě varianty uložení hřídele: vertikální a horizontální

## Horizontální provedení

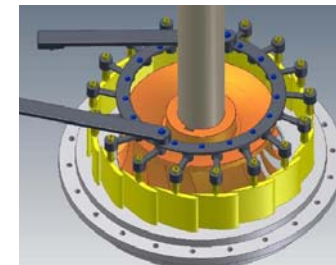
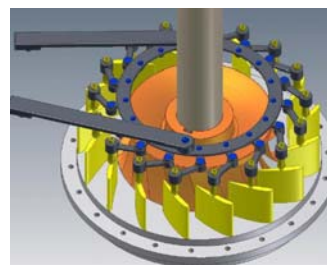
- turbína je umístěna ve stěně turbínové kašny naplněné vodou
- voda vniká z kašny do regulovatelných rozváděcích lopatek po celém obvodu turbíny
- turbína ve stěně kašny je vysoko nad spodní hladinou -> *kolenová savka*
- koleno může být vedeno uvnitř kašny – *mokrá savka*
- nebo strojovnou – *suchá savka*

## Vertikální provedení

- turbína je umístěna na dně turbínové kašny naplněné vodou
- hřídel vede svisle vzhůru do strojovny - nehrozí její zaplavení
- voda vniká z kašny do regulovatelných rozváděcích lopatek po celém obvodu turbíny
- voda je z turbíny odváděna savkou, která vytváří podtlak přenášející se na odtokovou stranu oběžného kola



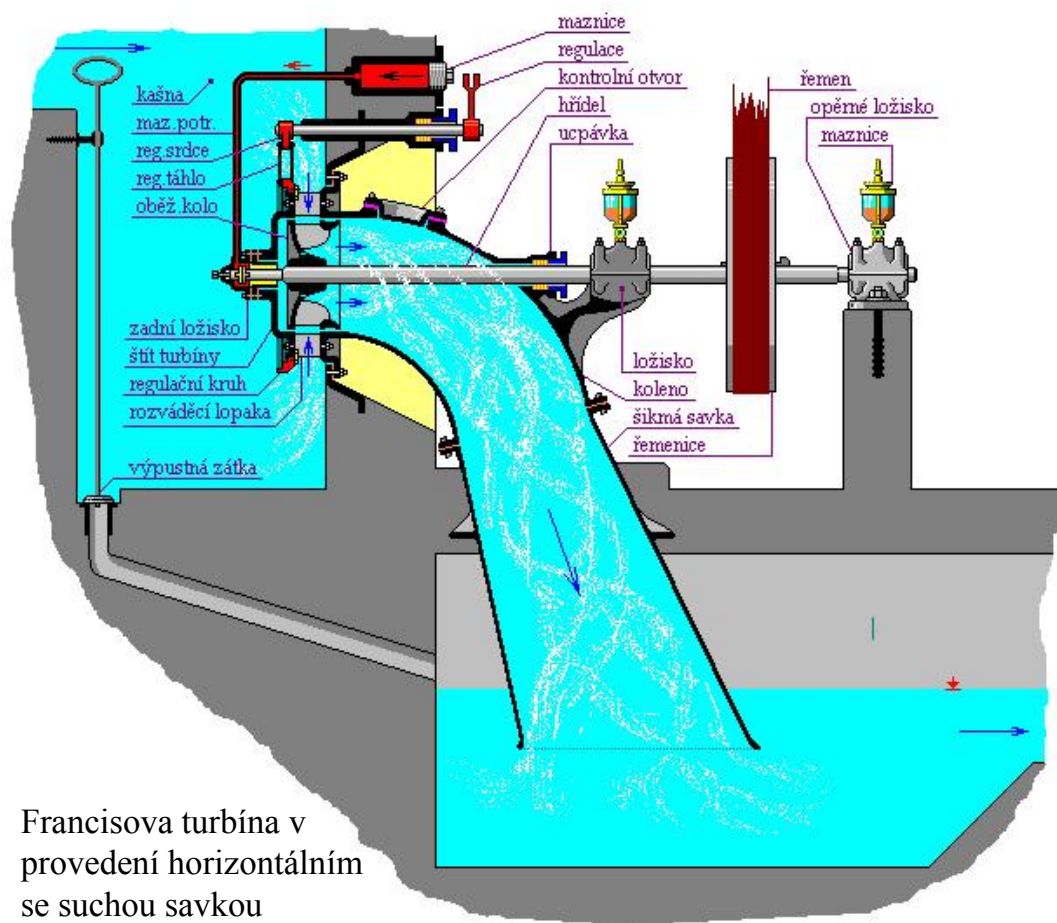
Francisova turbína v provedení horizontálním s mokrou savkou



Regulační věnec Francisovy turbíny



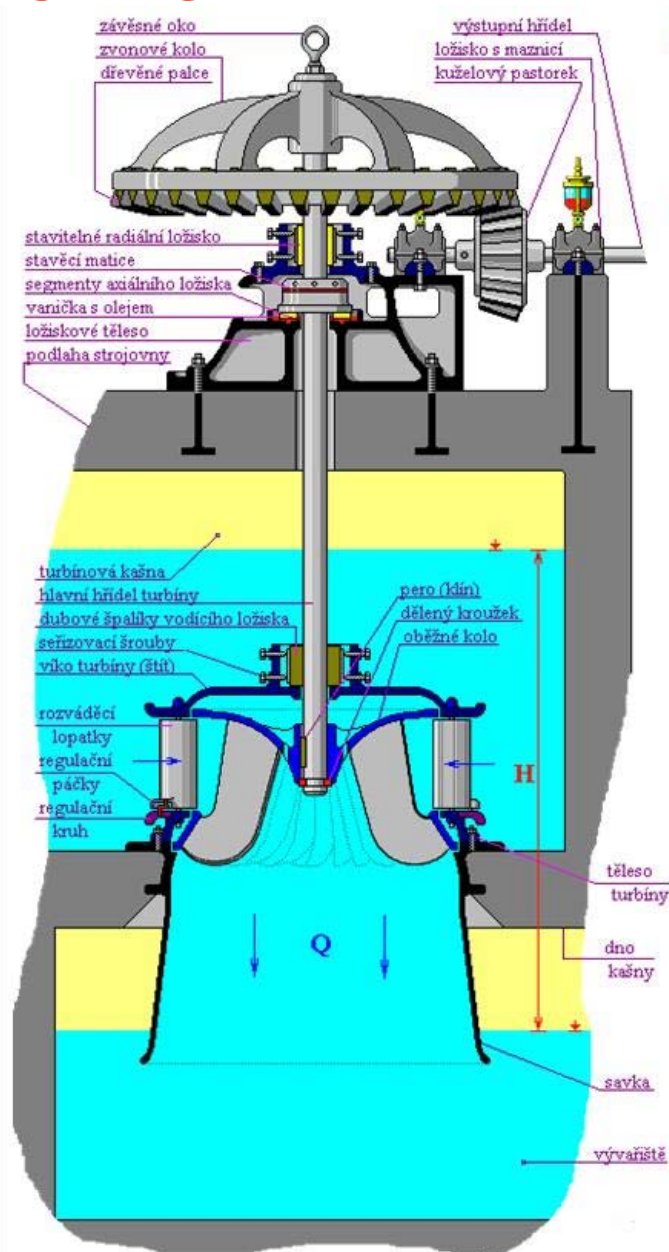
# Francisova turbína



Francisova turbína v provedení horizontálním se suchou savkou

## Použití

- pro středně velké spády a větší množství protékající vody
- Francisova reverzibilní turbína – vhodná do PVE
- dosahované účinnosti 75 – 90%

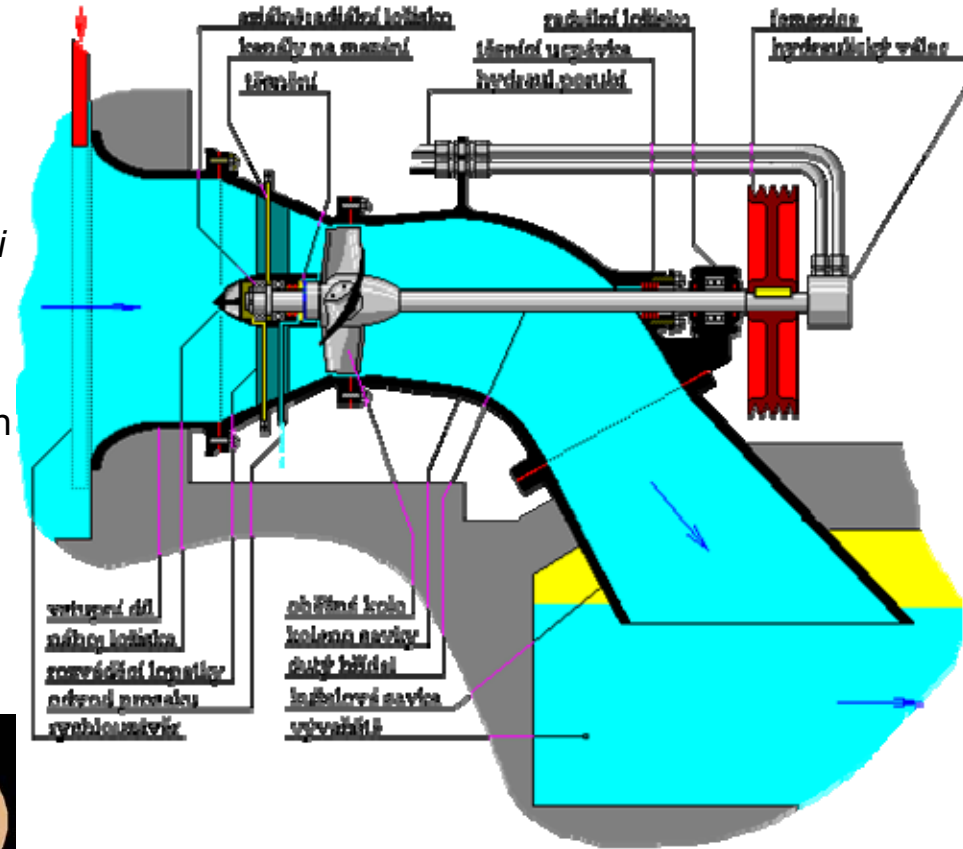


Francisova turbína v provedení vertikálním

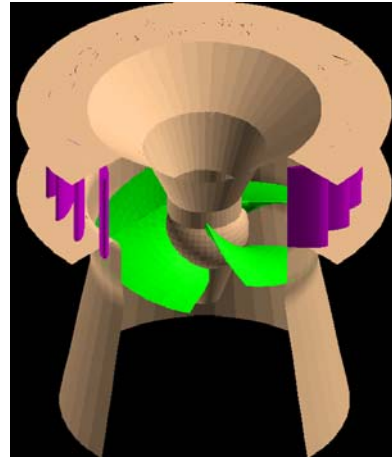
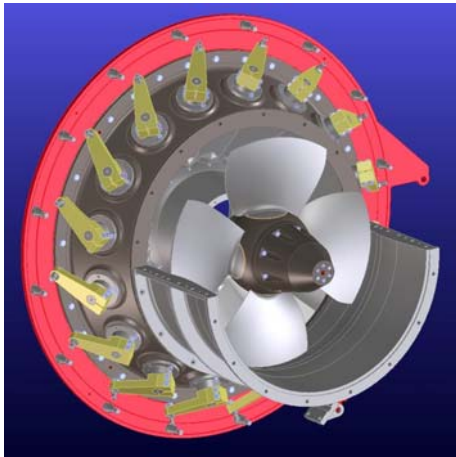
# Kaplanova turbína

## Popis:

- **reakční turbína**
- V. Kaplan (1912-13)
- vylepšená Francisova turbína, liší se tím, že oběžné kolo má vrtulový tvar s *nastavitelnými lopatkami*
- typická účinnost nad 90% v širokém rozmezí průtoků (max. až 95%)
- ze všech turbín dosahuje nejvyšších jmenovitých otáček
- **Kaplan-S:** regulace natočení rozváděcích i oběžných lopatek
- **Semi-Kaplan:** regulace natočení pouze oběžných lopatek



Turbína typu Semi-Kaplan

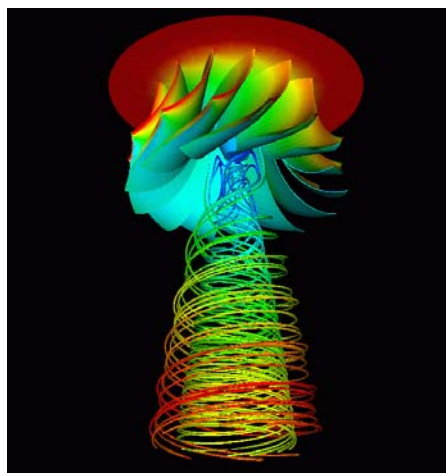
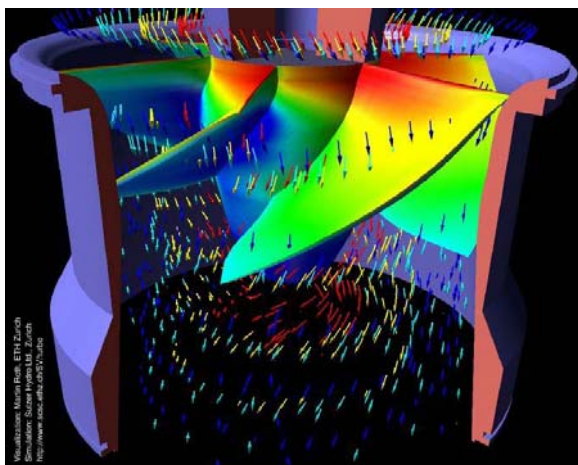
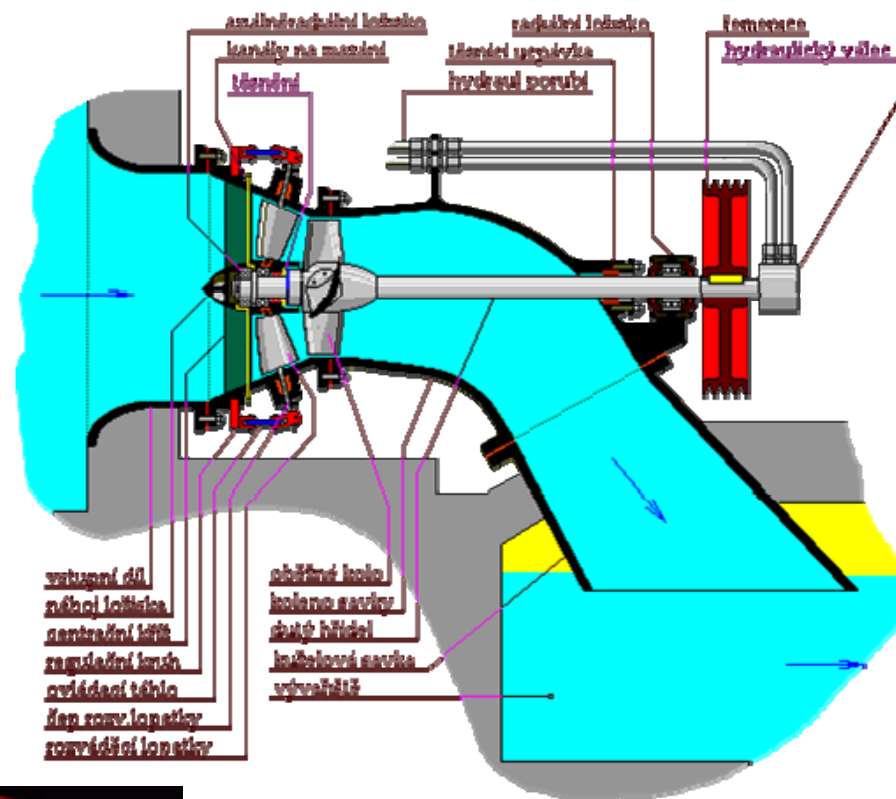


Regulační prvky Kaplanovy turbíny

# Kaplanova turbína

## Použití:

- vodní toky s proměnlivým průtokem (výhoda dvojité regulace)
- větší pořizovací náklady a nákladnější údržba (nevýhoda dvojité regulace)
- vhodné pro velké průtoky a menší spády



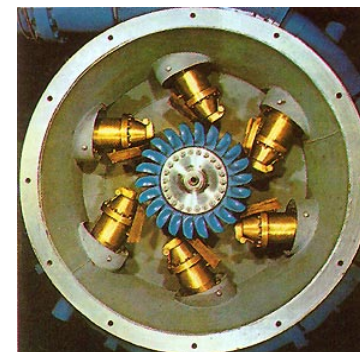
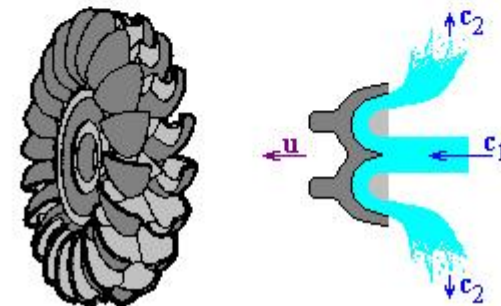
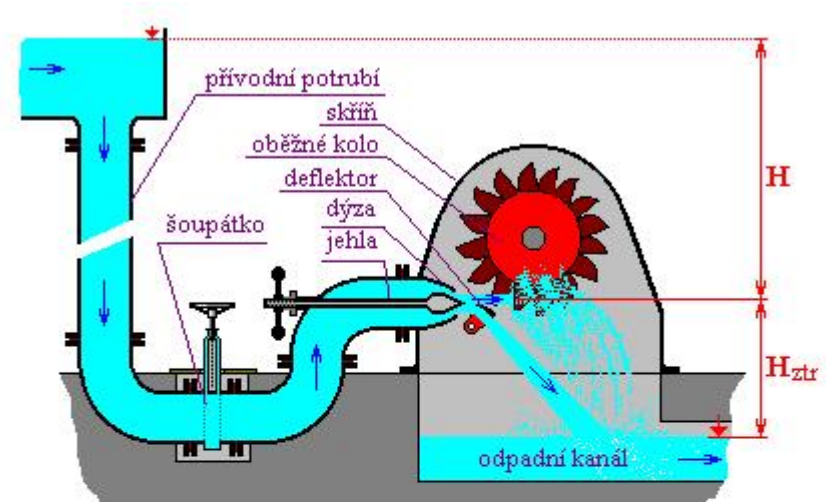
Turbína typu Kaplan-S

Srovnání tlakových a rychlostních poměrů u Kaplanovy a Francisovy turbíny

# Peltonova turbína

## Popis:

- **rovnotlaká** turbína
- L. A. Pelton (1880)
- voda je přiváděna k turbíně potrubím kruhového průřezu, které vede k jedné nebo více dýzám
- z dýzy vytéká voda rychlostí  $c_1$ , voda vstoupí tangenciálně do oběžného kola osazeného lžícovitými lopatkami (parciální tangenciální ostřík)
- břit uprostřed lopatek rozdělí paprsek na dvě poloviny a lžícovitý tvar lopatky se snaží otočit směr tekoucí vody zpět
- vzájemným souběhem rychlosti vody tekoucí po lopatce při současném otáčení oběžného kola obvodovou rychlostí  $u$  dojde k tomu, že voda opouští lopatky na vnější straně s minimální zbytkovou rychlostí  $c_2$
- Účinnost u malé turbíny **80 až 85%**, u velké **85 až 95%**
- Plně je využitý spád  $H$ , Výškový rozdíl  $H_{ztr}$  je ztracený a energeticky nevyužitý



Regulační dýzy  
Peltonovy turbíny

## Použití:

- Pro malé množství vody ve velkých spádech
- není náchylná ke kavitaci, odolná proti otěru pískem
- na menších spádech dává příliš malý počet otáček a vyžaduje převodovku

# Kavitace

## Vznik kavitace:

**Kavitace** (z latinského *cavitas* - dutina) je vznik dutin v kapalině při lokálním poklesu tlaku, následovaný jejich implozí. Pokles tlaku může být důsledkem lokálního zvýšení rychlosti (tzv. hydrodynamická kavitace), případně průchodu intenzivní akustické vlny v periodách zředění (akustická kavitace). Kavitace je zpočátku vyplněna vakuem, později se vyplní párou okolní kapaliny nebo do ní mohou difundovat plyny z okolní kapaliny. Při vymizení podtlaku, který kavitaci vytvořil její bublina kolabuje za vzniku rázové vlny s *destruktivním účinkem na okolní materiál*.

Projevuje se zejména u **přetlakových turbín**, nejčastěji se vyskytuje v oběžném kole, u něhož dochází až k poruše materiálu. Kavitaci doprovází *místní ohřátí, akustické jevy, vibrace a luminiscence*. Při zanikání bublin se kavitační dutiny vysokou rychlostí (až  $300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) vyplňují okolní kapalinou. Tento implozivní zánik dutin vyvolává tlakové vlny a hydrodynamické rázy, dosahující hodnoty až  $10^3 \text{ MPa}$  příčina hluku a kavitační koroze. Vznik dutin (bublin) při poklesu tlaku pod tlak syté páry může vést až ke zničení turbíny.



Ukázka působení kavitace

# Kavitace

## Faktory ovlivňující kavitaci:

### **obsah plynů v kapalině**

Při snížení tlaku dochází k vylučování vzduchu z kapaliny do vzduchových bublin. V kapalinách, ve kterých při normálním tlaku nejsou bubliny viditelné, vznikají kavitační dutiny až při poklesu místního tlaku přibližně na hodnotu tlaku syté páry při dané teplotě. Tyto dutiny jsou vyplněny převážně sytou párou kapaliny.

### **teplota a tlakové poměry**

Se vzrůstající teplotou kapaliny se zvětšuje počet vznikajících kavitačních dutin a zároveň se zvyšuje tlak nasycených par, takže vznikající dutiny mají menší objem. Tyto jevy působí na intenzitu kavitačního opotřebení protichůdně. Průběh kavitačního poškození v závislosti na teplotě má lokální maximum při určité teplotě, u vody je to v rozmezí asi 45 až 50 °C, asi při 80 °C je již intenzita poškození prakticky nulová. Důležitým faktorem je také rozdíl mezi vnějším tlakem a tlakem nasycených par. Čím je tento rozdíl větší, tím intenzivnější je kavitační opotřebení.

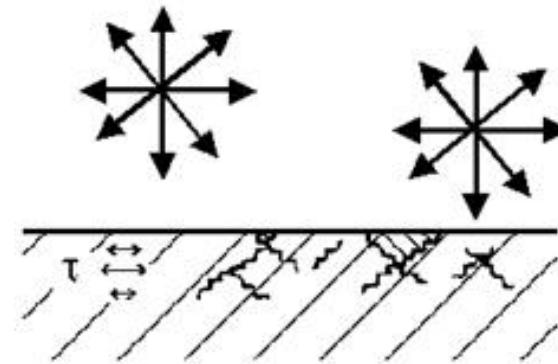
### **povrchové napětí a viskozita kapaliny**

Povrchové napětí kapaliny má výrazný vliv na velikost kavitačních dutin. Čím je větší povrchové napětí, tím větší dutiny vznikají za jinak stejných podmínek. Větší dutiny znamenají větší intenzitu kavitačního opotřebení.

Viskozita kapaliny má vliv na rychlost růstu kavitačních dutin. Podle současných představ však se vliv viskozity uplatňuje především těsně před zánikem kavitační dutiny a to tak, že snižuje rychlost, s jakou kapalina vniká do dutiny při její implozi

## Předcházení kavitaci:

zvyšování tlaku nad tlak nasycených par = řízené pouštění vzduchu (Pa) do kavitačních oblastí, vhodné tvary a materiály.



Mechanismus kavitačního opotřebení

# Přehled největších VE v ČR

Název	Vodní tok	Rok	Typ	Výkon [MW]	Výroba [GWh/rok]	Počet soustrojí /typ turbín	Celková hltnost [m <sup>3</sup> /s]	Spád [m]
Dlouhé Stráně	Divoká Desná	1996	PŠ	650	*)	2/FR	137,2	510,7-547,5
Dalešice	Jihlava	1978	PŠ	450	*)	4/FR	600	60,5-90,7
Orlík	Vltava	1961-2	Š	364	400	4/K	600	44-70,5
Slapy	Vltava	1954-55	Š	144	280	3/K	300	27-56
Lipno I	Vltava	1959	Š	120	168	2/F	92	148-162
Štěchovice II	Vltava	1947/1996	PŠ	45	*)	1/FR	27	209,8-219,5
Kamýk	Vltava	1961	Š	40	76	4/K	360	10,5-15,5
Štěchovice I	Vltava	1943-4	PR	22,5	89,6	2/K	150	14,5-20
Střekov	Labe	1936	PR	19,5	80	3/K	300	6-8,7
Vranov	Dyje	1934	Š	18,9	30	3/F	45	25-42
Vrané	Vltava	1936	PR	13,9	57,3	2/K	180	8-11
Vír I	Svratka	1958	Š	12	15,5	2/F	24	max. 64
Nechranice	Ohře	1968	PR	12	55	2/F	32	17-44
Křižanovice – Práčov	Chrudimka	1952	Š	8,9	14	1/F	12	88,5
Fláje – Meziboří	Flájský potok – Divoký potok	1961	Š	7,6	0,9	2/F	3,6	236,7-261,2

Š – špičková, PŠ – pološpičková, PR – průtočná

F – Francisova turbína, K – Kaplanova turbína, FR – Francisova reverzní turbína