

# Kapitola 15 – Vodní turbíny

**Předmět:** Stavba a provoz strojů

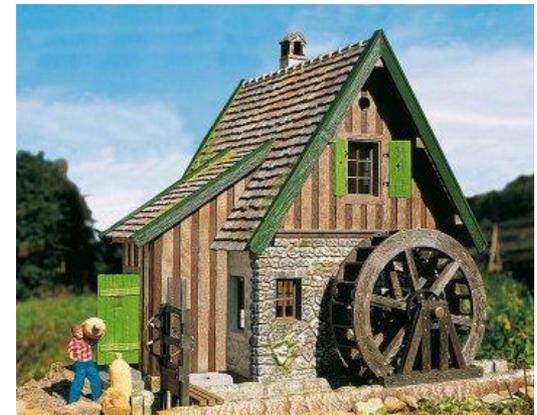
**Ročník:** 4.

**Anotace:** Tento digitální učební materiál poskytuje ucelený přehled o základních typech lopatkových strojů, v tomto díle o turbínách. Diskutovány jsou jednotlivé typy turbín. Zmíněna je také problematika vodních elektráren, a to akumuláčnických i přečerpávacích. Edukační účel posiluje řada doplňujících schématických znázornění a fotografií.

**Klíčová slova:** vodní turbína, Francoisova turbína, Kaplanova turbína, Peltonova turbína, přečerpávací vodní elektrárna

# 4) Vodní turbíny

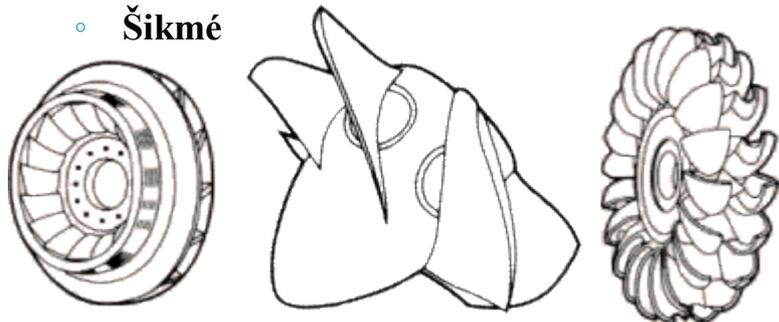
- ▶ Jde o **lopatkový vodní motor** měnící energii proudící vody na **mechanickou práci** na hřídeli.
- ▶ Mechanická práce pak slouží jako **pohon různých dalších strojů** (mlýny) nebo k výrobě **elektrické energie v generátorech**.
- ▶ Vodní turbína je nezbytnou součástí **akumulačních vodních elektráren** a **přečerpávacích vodních elektráren**.
  
- ▶ Vodní turbína se skládá z těchto součástí:
  - **Rozváděcí ústrojí**
    - rozváděcí kolo
  - **Oběžné kolo**
    - spojeno s hřídelí
  - **Zařízení pro odvod vody**
    - pouze u přetlakových turbín



*Obr. 1: Mlýnské kolo jako jednoduchá turbína [2].*

# Rozdělení

- ▶ Podle přeměny energie na:
  - Rovnotlaké
  - Přetlakové
- ▶ Podle průtoku oběžným kolem:
  - Axiální
  - Radiální
  - Radiálně axiální
  - Diagonální
  - Tangenciální
- ▶ Podle polohy hřídele:
  - Vertikální
  - Horizontální
  - Šikmé



Obr. 2: Různé typy oběžného kola dle konstrukčních znaků [3].

- ▶ Podle typických konstrukčních znaků:
  - **Běžné**
    - Francisova – radiálně axiální
    - Kaplanova – axiální
    - Peltonova – tangenciální
  - **Další typy**
    - Dériazova – diagonální (varianta Kaplana)
    - Bánkiho – tangenciální



PELTON  
5 rpm

FRANCIS I  
30 rpm

FRANCIS II  
70 rpm

KAPLAN  
113 rpm

Obr. 3: Různé typy oběžného kola dle konstrukčních znaků [4].

# Princip činnosti

- ▶ Rozváděcí ústrojí **usměrňuje průtok vody** a **přivádí** jej do **oběžného kola**.
- ▶ V oběžném kole je **energie vody** (potenciální a kinetická) **přeměněna na mechanickou energii**.
- ▶ **Zařízení pro odvod** vody **snižuje rychlost proudící vody** a přeměňuje ji na energii tlakovou (**zvyšuje se účinnost turbíny**).
- ▶ V **rovnotlaké turbíně** se veškerá potenciální tlaková energie vody přeměňuje na kinetickou energii a při výtoku z rozváděcího ústrojí má rychlost:

$$c = \varphi \cdot \sqrt{2gH}$$

- ▶ kde  $H$  je **výškový spád** [m] a  $\varphi$  **rychlostní součinitel** (vliv tření)
- ▶ Tlak na vstupu i na výstupu je stejný (přetlak je nulový)!
- ▶ **Práci konají hybnostní síly** vyvolané změnou směru proudění na lopatkách.

# Princip činnosti

- ▶ V přetlakové turbíně se v **rozváděcím ústrojí** přemění jen **část potenciální tlakové energie** na kinetickou.
- ▶ **Zbylá část se mění plynule při průtoku oběžným kolem.**
- ▶ Množství energie využitelné z vodního toku závisí striktně na výškovém rozdílu  $H$  (spádu, převýšení).
- ▶ Obvykle je nutné **uměle vytvořit převýšení** – přehrady a jezy.



Obr. 4: Hráz z litého betonu [5].

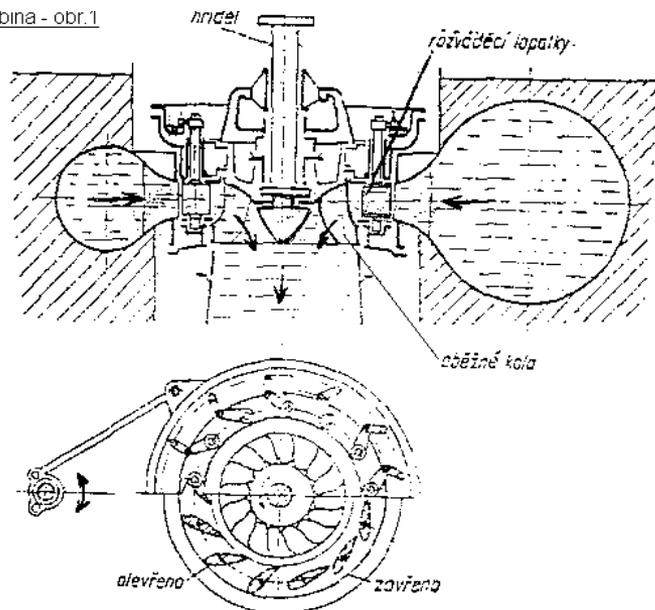


Obr. 5: Sypaná hráz [6].

# Francisova turbína (1848)

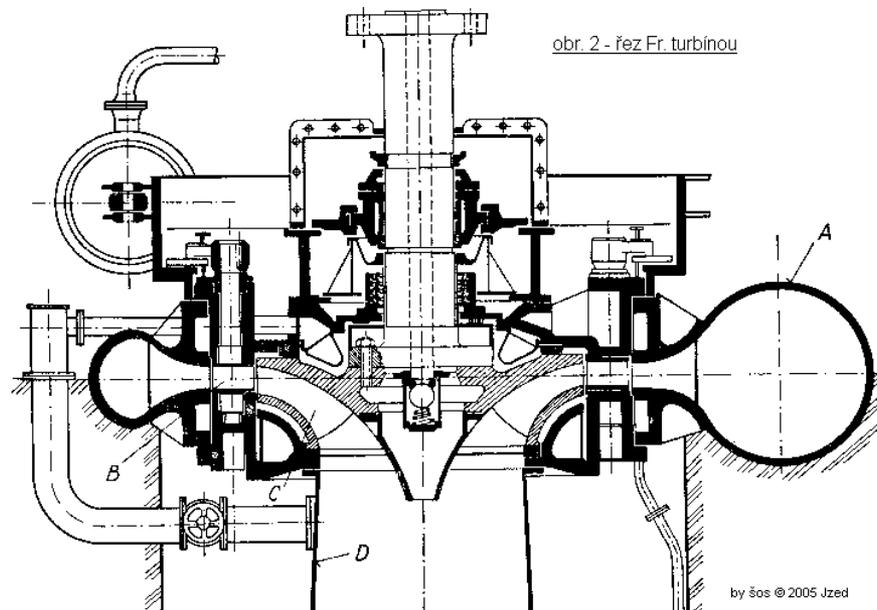
- ▶ Vyvinuta britsko-americkým inženýrem **Jamesem B. Francisem** v roce 1848.
- ▶ **Nejpoužívanější** typ turbíny.
- ▶ Jde o turbínu **přetlakovou** (reakční)
- ▶ Je **univerzální** a **dobře regulovatelná**, použitelná pro spády **2 - 200 m** a pro velké průtoky.
- ▶ Je možné ji použít také jako **reverzní** v přečerpávacích elektrárnách.

turbína - obr.1



Obr. 6: Francisova turbína [3].

obr. 2 - řez Fr. turbínou

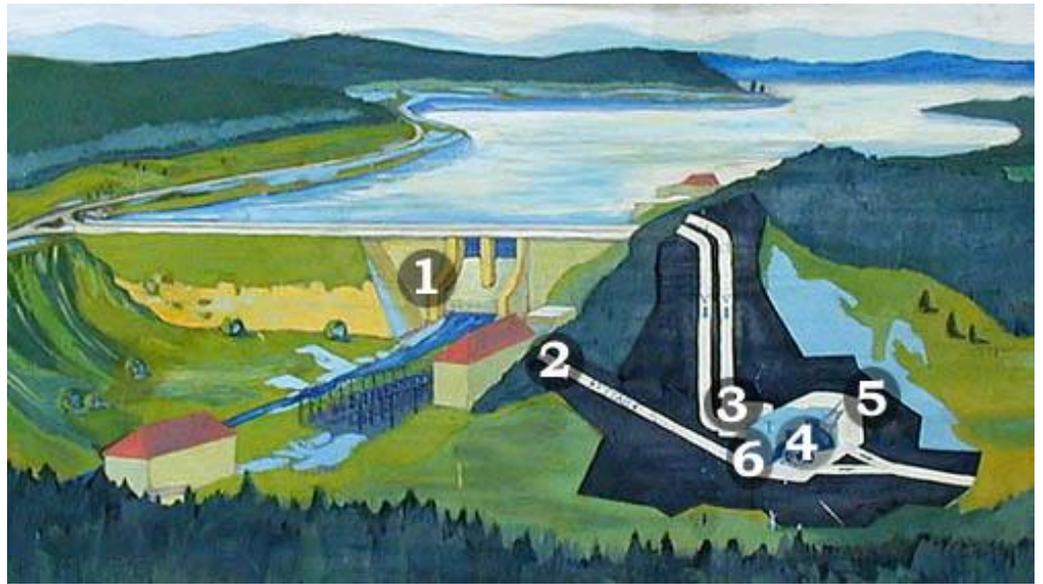


by šos © 2005 Jzed

Obr. 7: Francisova turbína [3].



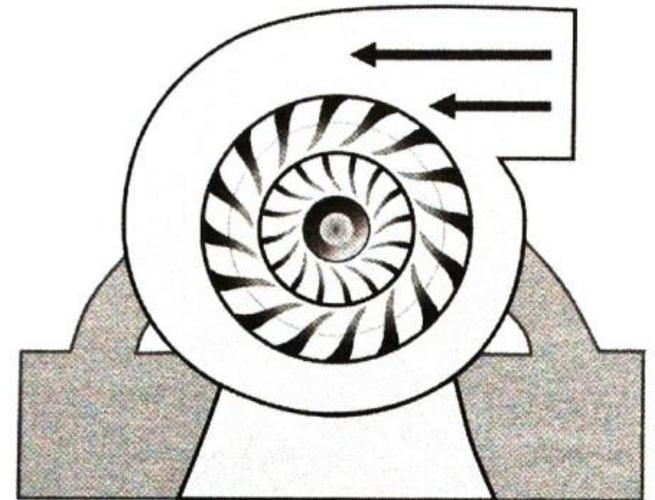
Obr. 8: Ukázka rotoru Francisovy turbíny pro Tři Soutěšky, Čína  $\varnothing \sim 9.5\text{m}$ , výkon  $\sim 710\text{ MW}$  při 75 ot./min. [3].



Obr. 9: Schéma elektrárny Lipno I [7].



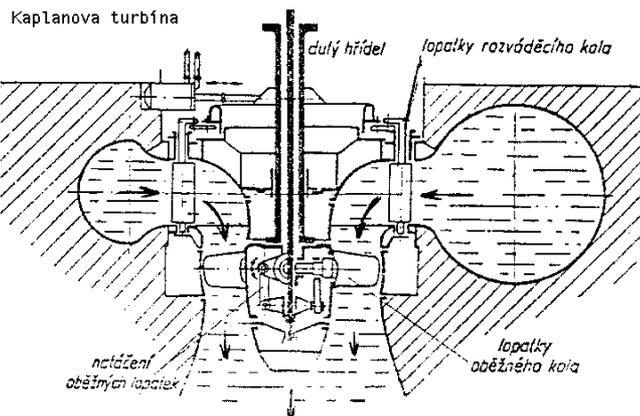
Obr. 10 a 11: Strojovna elektrárny Lipno I [7].



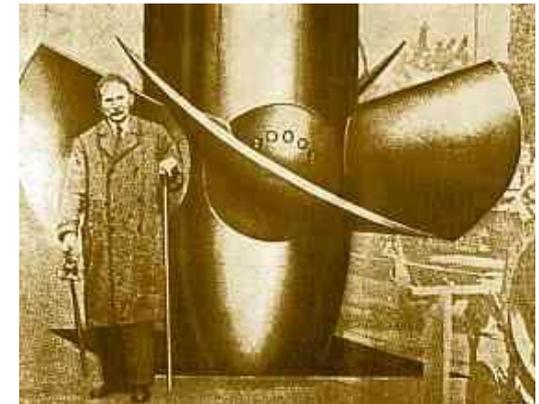
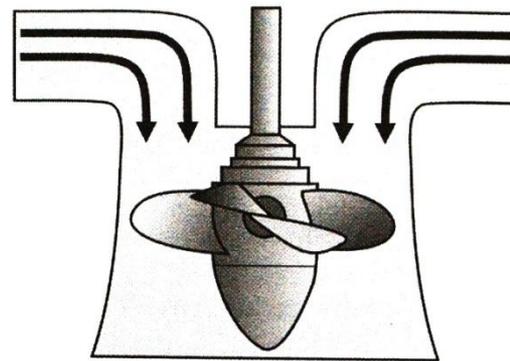
Obr. 12: Schéma Francisovy turbíny [1].

# Kaplanova turbína (1912)

- ▶ Vynalezena profesorem brněnské techniky **Viktorem Kaplanem** roku 1912.
- ▶ **Reakční přetlaková** turbína pro použití na **malých spádech**, s velkou rychloběžností a možností přímého spojení s generátorem.
- ▶ Voda se přivádí do **spirálovité skříně** a proudí mezi lopatky rozváděcího kola, kde se zrychluje a v určitém směru vtéká na lopatky oběžného kola, které dosahuje několikrát vyšší obvodové rychlosti než je rychlost proudu vody. Oběžné kolo má obvykle **4 - 8 lopatek** a je tvarem podobné **lodnímu šroubu**.
- ▶ Voda, která prošla přes turbínu odtéká sací rourou do tzv. vývaru pod hrází.
- ▶ Pro regulaci výkonu se **průtok řídí natáčením lopatek obou kol**.
- ▶ **Dériazova turbína** je variantou Kaplanovi turbíny, kdy je proudění **diagonální**.



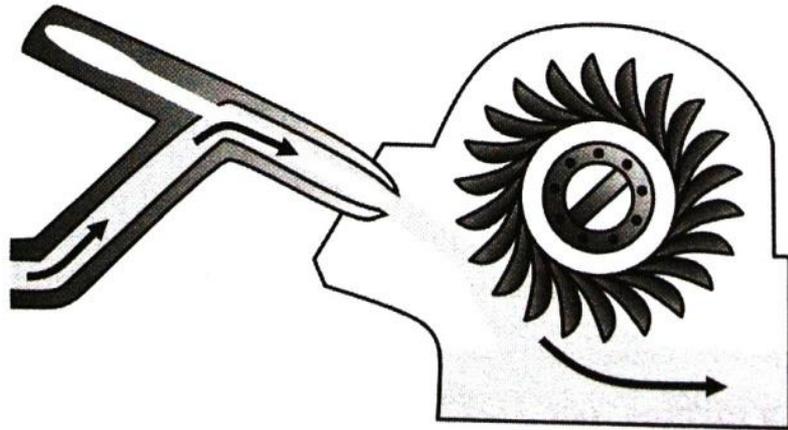
Obr. 13: Schéma Kaplanovy turbíny [3].



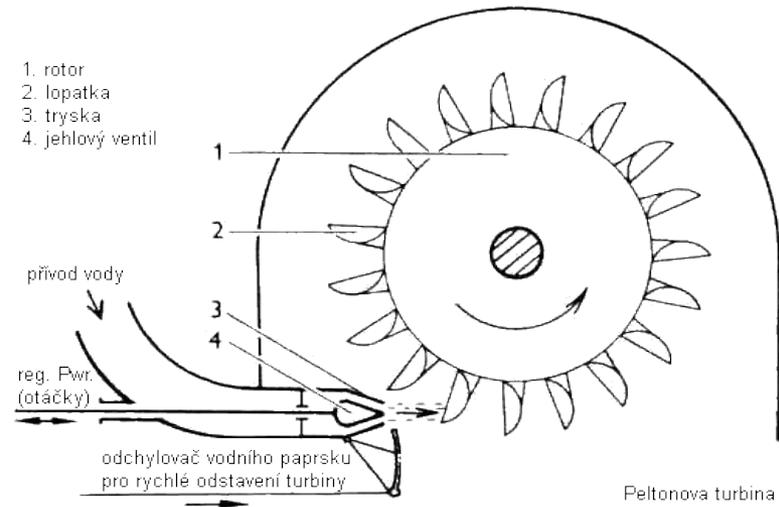
Obr. 14 a 15: Kaplanova turbína a Prof. Viktor Kaplan [1,3].

# Peltonova turbína (1880)

- ▶ **Vynalezena Lesterem Allanem Peltonem roku 1880.**
- ▶ **Označuje se také Peltonovo kolo.**
- ▶ Jde o **rovnotlaký** stroj, jehož obvodová rychlost otáčení je nižší než rychlost proudu vody přiváděné z trysky (nebo více trysek) na lopatky rotoru.
- ▶ Využívá se ve **vysokotlakých spádech** (nad 100 m) a pro **velké průtoky** nad 10 l/s.
- ▶ Využívá **tangenciálního průtoku** a reguluje se **změnou průřezu trysky (trysek).**



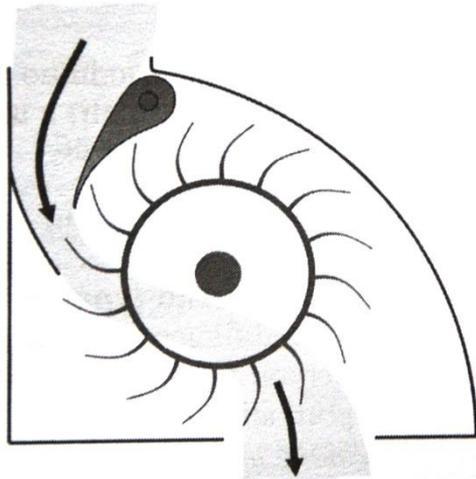
Obr. 16: Schéma Peltonovy turbíny [1].



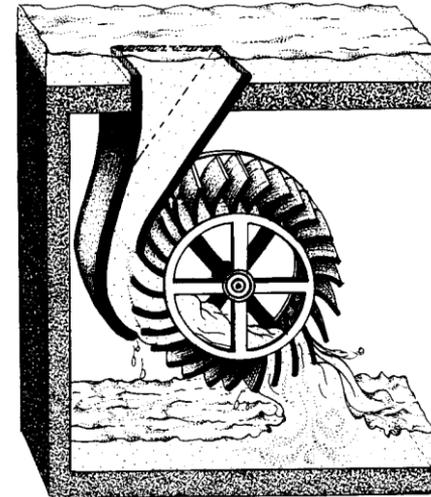
Obr. 17: Schéma Peltonovy turbíny [3].

# Bánkiho turbína (1917)

- ▶ Vynalezena **Donátem Bánkym** v roce **1917**.
- ▶ **Jednoduchá rovnotlaká turbína.**
- ▶ Oběžné kolo je tvořeno dvěma kruhovými deskami, mezi nimiž jsou jednoduché lopatky (připomíná mlýnské kolo).
- ▶ Kolo je uloženo ve skříni, kde z jedné strany přitéká usměrněný proud, voda protéká přes lopatky dovnitř kola a pak zase ven (lopatky jsou obtékány v obou směrech).
- ▶ Pro svou jednoduchost **používána v malých elektrárnách.**



Obr. 18: Schéma Bánkiho turbíny [1].



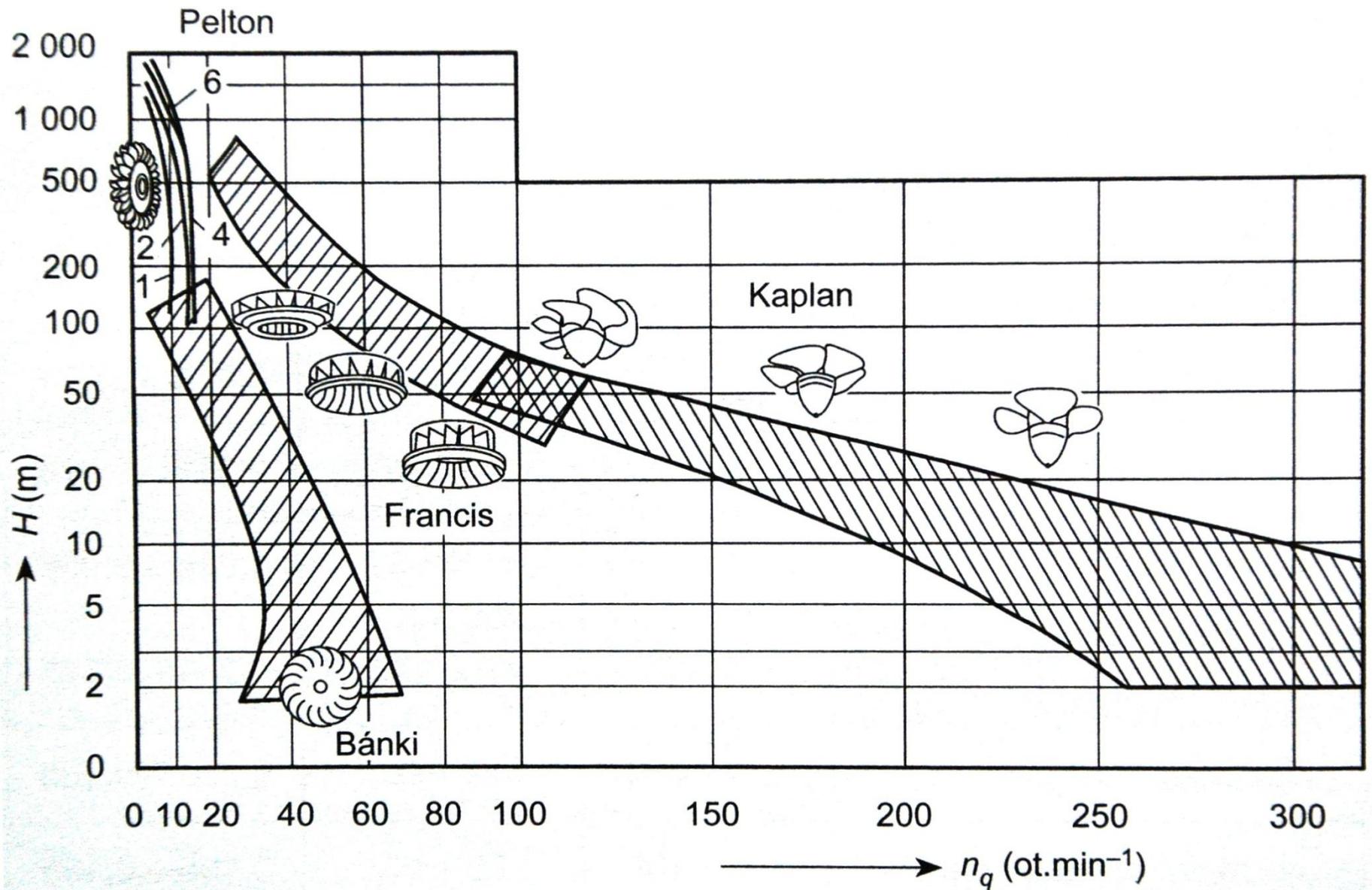
Obr. 19: Schéma Bánkiho turbíny [8].

# Základní parametry

- ▶ **Objemový průtok ( $Q$ )** – proteklý objem za 1s [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- ▶ **Hltnost ( $Q_{max}$ )** – maximální množství průtoky při určitém spádu [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- ▶ **Teoretický výkon ( $P_t$ )** – výkon na základě průtoku a spádu  $P = \rho Q g H$  [W]
- ▶ **Skutečný výkon ( $P$ )** – skutečná hodnota výkonu [W]
- ▶ **Účinnost ( $\eta$ )** – účinnost turbíny  $\eta = \frac{P}{P_t}$
- ▶ **Spád ( $H$ )** – výška vodní hladiny nad turbínou [m]
- ▶ **Objemové měrné otáčky ( $n_q$ )** – počet otáček  $n_q = \frac{60n\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H^3}}$

Tab. 1: Přehled základních typů turbín a jejich použitelnosti [1].

Druh turbíny	Spád (m)	$n_g$ (min <sup>-1</sup> )	$n_{OE}$ (min <sup>-1</sup> )
<b>Peltonova turbína (rovnotlaká)</b>	<b>1 700 – 200</b>	<b>4,75 – 32</b>	<b>0,014 – 0,096</b>
– s jednou dýzou		4,75 – 13	0,014 – 0,039
– se čtyřmi dýzami		9,5 – 26	0,028 – 0,078
– se šesti dýzami		11,5 – 32	0,034 – 0,096
<b>Francisova turbína (přetlaková)</b>	<b>700 – 35</b>	<b>18 – 125</b>	<b>0,054 – 0,375</b>
– volnoběžné oběžné kolo	700 – 250	18 – 35	0,054 – 0,105
– normální oběžné kolo	250 – 100	35 – 65	0,105 – 0,195
– rychloběžné oběžné kolo	100 – 50	65 – 100	0,195 – 0,300
– expresní oběžné kolo	50 – 35	100 – 125	0,300 – 0,375
<b>Kaplanova turbína (axiální přetlaková)</b>	<b>70 – 2</b>	<b>100 – 560</b>	<b>0,300 – 1,685</b>
– oběžné kolo s deseti lopatkami	70 – 60	100 – 110	0,300 – 0,330
– oběžné kolo s osmi lopatkami	70 – 50	110 – 120	0,330 – 0,360
– oběžné kolo se šesti lopatkami	50 – 40	120 – 130	0,360 – 0,390
– oběžné kolo se čtyřmi lopatkami	20 – 10	185 – 260	0,560 – 0,780
– oběžné kolo se třemi lopatkami	10 – 2	260 – 560	0,780 – 1,685



Obr. 20: Pracovní oblast jednotlivých typů turbín [1].

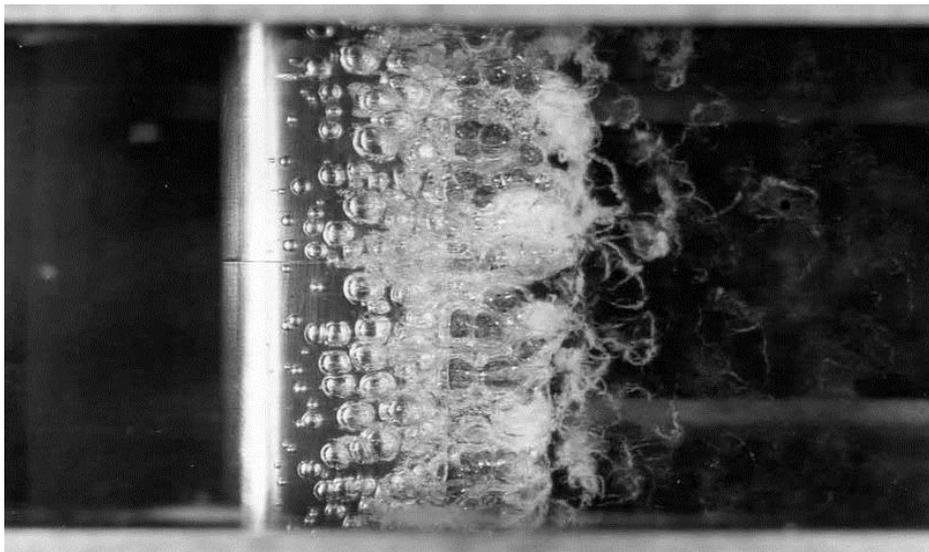
# Nebezpečí pro turbíny - kavitace

## ▶ Jde o tvorbu dutin (kavit) v kapalině při lokálním poklesu tlaku!

- Název odvozen z latinského *cavitas* = dutina.

## ▶ Princip:

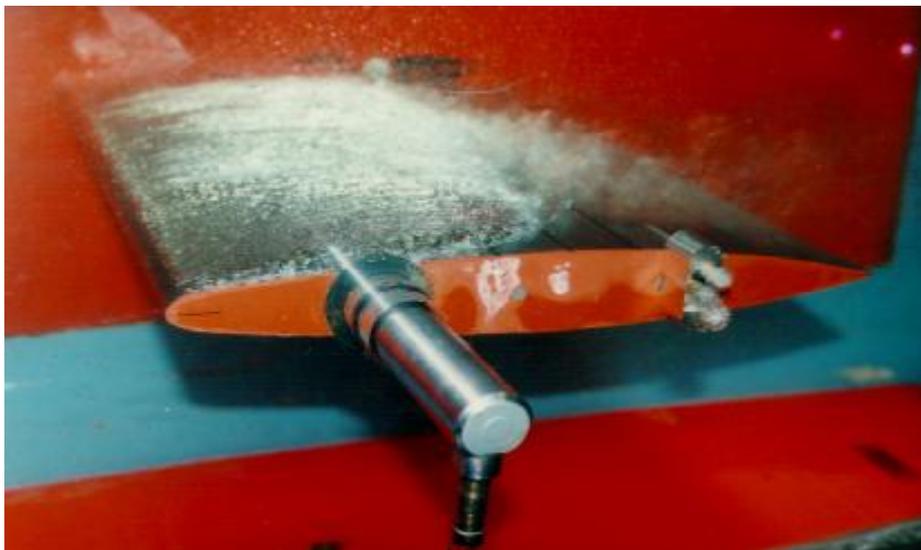
- Každá kapalina se spontánně **vypařuje**, tzn. vře v závislosti na tlaku a teplotě kapaliny.
- V případě **výrazného lokálního poklesu tlaku** dojde při stejné teplotě k vypaření části kapaliny a **ke tvorbě dutin (bublinek)** naplněných parou a výduchem původně rozpuštěným ve vodě.
- Tyto bubliny jsou **proudem strhávány do míst s vyšším tlakem**, kde **pára rychle kondenzuje** a bubliny zanikají, vzduch v bublině je pohlcován kapalinou a bubliny se plní okolní kapalinou (**implodují**).
- Zanikající bubliny vytváří **výrazný hluk a způsobují kavitační korozi** (poškození materiálu silnými rázy imploze a vylučovaným kyslíkem).
- Takto namáhanými materiály jsou např. **lopatky turbín, lodních šroubů a čerpadel**.
- **Čím nižší je teplota, tím nižší je kavitace!**
- **Technologická ochrana** spočívá nejčastěji v **použití odolnějších materiálů** exponovaných částí.



*Obr. 21: Kavítace [9].*



*Obr. 22: Kavítace na lopatkách lodního šroubu [11].*



*Obr. 23: Varianta Mrakové kavítace (Cloud) na křídle [10].*



*Obr. 24: Kavitační poškození materiálu lodního šroubu [9].*

# Vodní elektrárna

- ▶ Elektrárna produkující **elektrickou energii** získanou **přeměnou energie padající vody na turbíně**.
- ▶ Může být klasická **akumulační** nebo **přečerpávací**.

## Výhody:

- ▶ **Neznečišťuje okolí**
  - Nevypouští škodlivé produkty spalování jako tepelné elektrárny, ani neobsahuje nebezpečný materiál jako jaderná elektrárna.
- ▶ **Nepotřebuje palivo**
  - Potřebuje pouze vodu, která je díky koloběhu vody v přírodě nevyčerpatelná.
- ▶ **Jednoduchá obsluha a údržba**
- ▶ **Jednoduché řízení**
  - Lze řídit na dálku z dispečinku na základě různé poptávky po elektřině.

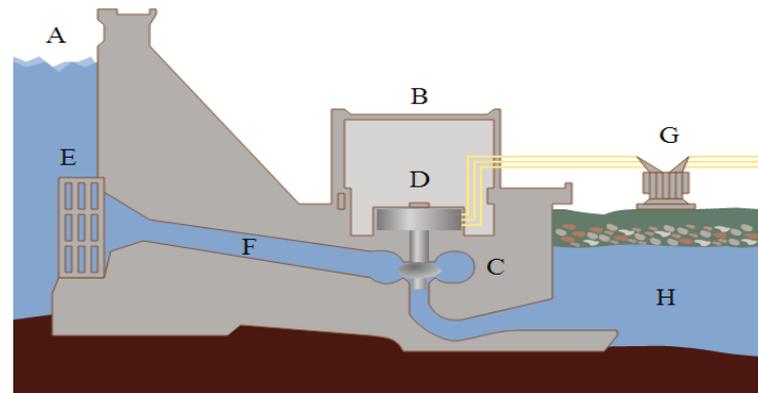
## Nevýhody:

- ▶ **Vysoké investiční náklady a nutnost obvykle zatopit část přírody (vzácné říční nivy) a nezřídka i města.**

# Akumulační elektrárny

- ▶ Jsou vybaveny **přehradou (vlastní hrází)**, která může hladinu zvýšit (vzdout) až o stovky metrů.
- ▶ **Do 100 m** jde o **středotlaké** a **nad 100 m** jde o **vysokotlaké**.
- ▶ **Hráz** je obvykle tvořena **litým betonem**, pro malé přehrady však mohou být i **hráze sypané**.
- ▶ Uvnitř se nachází **revizní, větrací a drenážní chodby** (odvádí prosakující vodu).
- ▶ Vodu k turbínám rozvádí **ocelové potrubí**.
- ▶ Vstup vody do potrubí je **chráněn tzv. česlem** pro zamezení vniknutí nečistot.
- ▶ Přehrada dokáže držet velké množství vody (**regulace toku – povodně**).

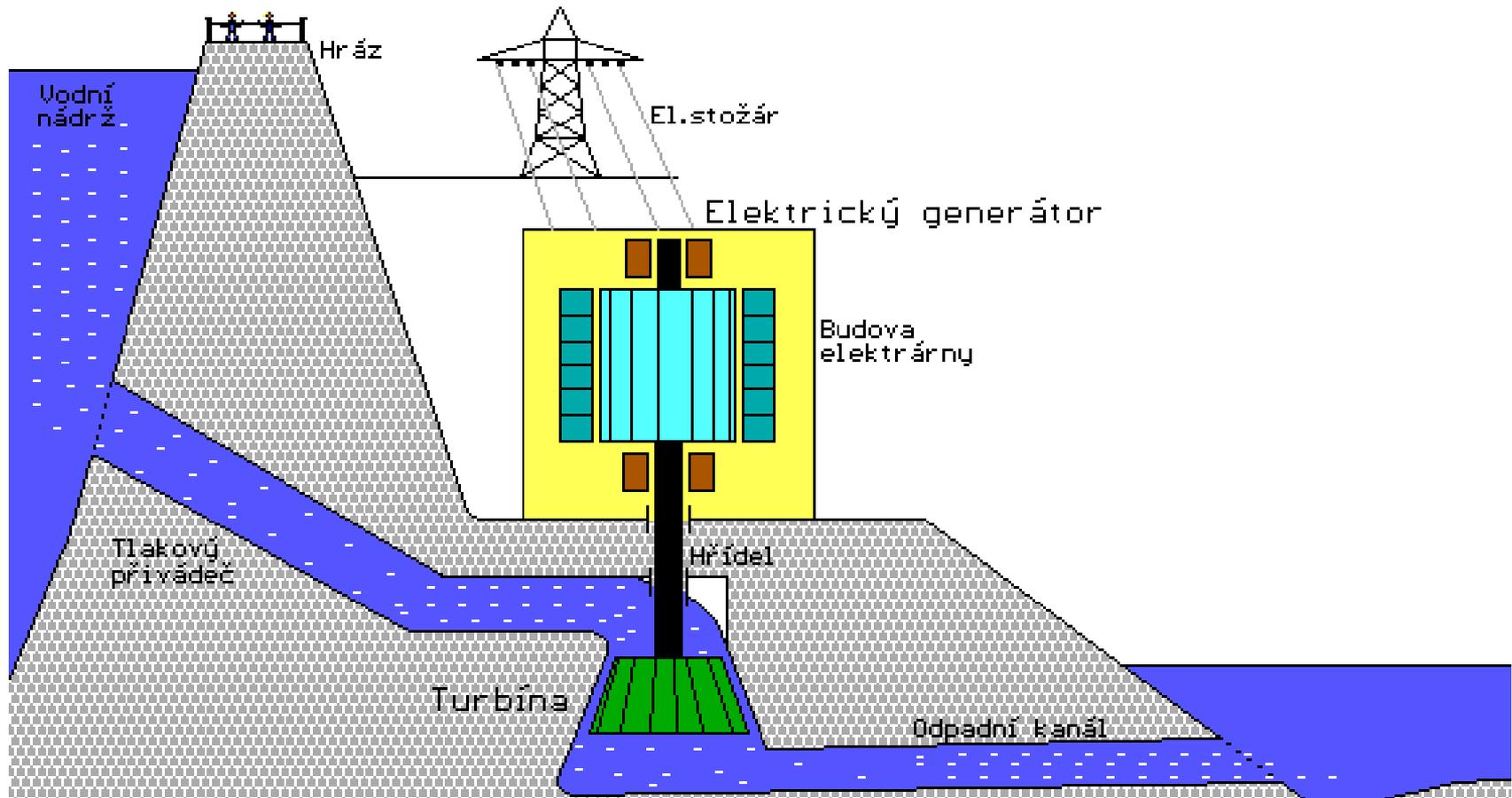
A – zásoba vody  
B – strojovna  
C – turbína  
D – generátor  
E – česlo  
F – ocelové potrubí (vtok)  
G – rozvodna  
H – výpusť do řeky



Obr. 25: Akumulační elektrárna [12].

# Akumulační elektrárny

## ▶ Akumulační elektrárna:



Obr. 26: Akumulační elektrárna [3].

# Průtočné a akumulční elektrárny

- ▶ Srovnání největších světových akumulčních elektráren s největšími v ČR (Orlík a Lipno) – obě na řece Vltava.

Tab. 2: Porovnání největších elektráren na světě a v ČR [1].

Název díla	Stát	Výkon	Další parametry
Tři soutěsky (Three Gorges)	Čína	18 200 MW (26 turbín)	přehradní hráz má výšku 182 m, délku 2 309 m, zaplavená plocha je 1 084 km <sup>2</sup>
Itaipu	Brazílie Paraguay	14 000 MW (20 Francisových turbín)	přehradní hráz má výšku 220 m, délku více než 7 000 m, zaplavená plocha je 1 350 km <sup>2</sup>
Orlík	ČR	378 MW (4 Kaplanovy turbíny)	přehradní hráz má výšku 91m, délku 450 m, zaplavená plocha je 27,3 km <sup>2</sup>
Lipno	ČR	120 MW (2 Francisovy turbíny)	přehradní hráz má výšku 25m, délku 296 m, zaplavená plocha je 48,7 km <sup>2</sup>

# Přečerpávací elektrárny

- ▶ Základním prvkem jsou **dvě jezera** (dolní a horní), které si dle energetických požadavků, **předávají vodu**.
- ▶ **Základní princip: skladování energie** ve formě vody na vyvýšeném místě, tzv. **konverze levné noční energie** z jaderných elektráren na **dražší denní energii!**
  - **NOC** – voda se čerpá (turbínami poháněnými elektromotory) do horní nádrže (proti samospádu):
    - Poptávka po elektrické energii je **nejmenší**.
    - Spotřeba elektrické energie je **velmi malá**.
    - Jaderné elektrárny pouští do sítě **nadbytečné** množství energie.
    - Cena energie je **nižší**.
  - **DEN** – voda se pouští z horní do dolní nádrže přes turbíny vyrábějící proud:
    - Poptávka po elektrické energii je **nejvyšší**.
    - Spotřeba elektrické energie je **velmi velká**.
    - Jaderné elektrárny pouští do sítě **nedostatečné** množství energie.
    - Cena energie je **vyšší**.
- ▶ Elektrárna také dokáže **rychle reagovat** na **případné výkyvy v energetické soustavě** a dokáže **regulovat napětí v síti**.

# Elektrárna Dlouhé stráně

- ▶ Leží v katastru obce **Loučná nad Desnou**, v okrese Šumperk (Pohoří Hrubý Jeseník)

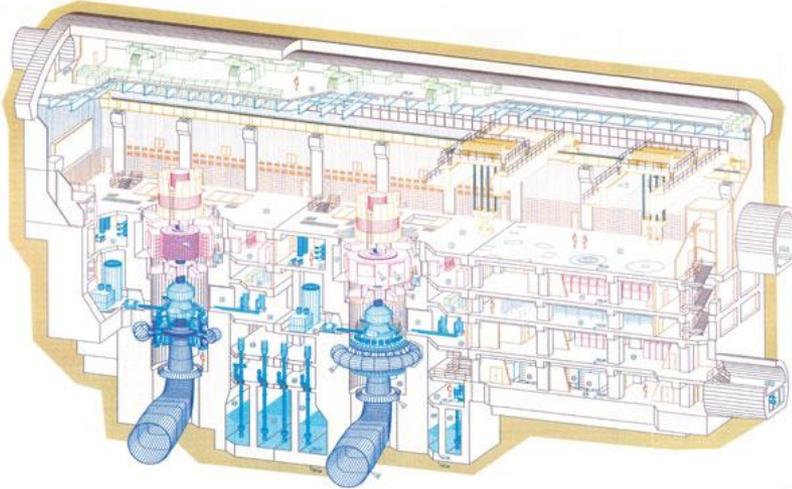
**Jde o největší reverzní vodní turbínu v Evropě - 325 MW**

**Jde o elektrárnu s největším spádem v České republice - 510,7 m**

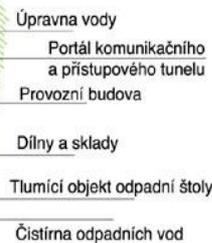
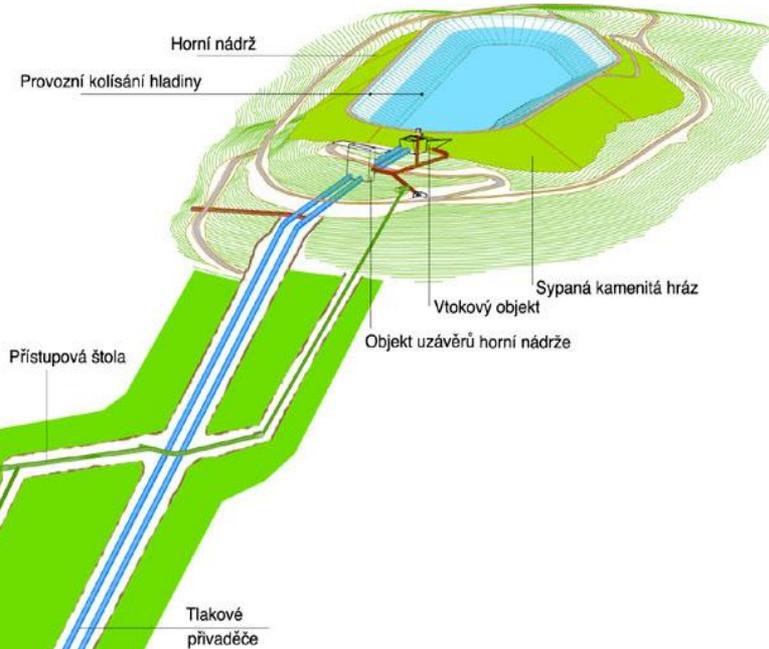
**Má největší instalovaný výkon v ČR - 2 x 325 MW.**

- ▶ **Výstavba elektrárny byla zahájena v květnu 1978.** Na počátku osmdesátých let však byla z rozhodnutí centrálních orgánů převedena do útlumového programu. V roce **1985** došlo k modernizaci projektu a po roce **1989** bylo rozhodnuto stavbu dokončit. **Do provozu byla elektrárna uvedena v roce 1996.**
- ▶ Jde o **podzemní dílo**, kdy obě soustrojí (**Francisovy turbíny**) jsou umístěna v podzemní **kaverně** o rozměrech **87,5 x 25,5 x 50 m**.
- ▶ Souběžně s kavernou turbín se v podzemí nachází **komora transformátorů**, která má rozměry **115 x 16 x 21,7 m**. V této komoře jsou dva blokové trojfázové transformátory, rozvodny **22 kV** a další zařízení.
- ▶ Provoz je řízen dálkově z **centrálního dispečinku ČEZ v Praze**.
- ▶ Horní nádrž je izolována 180 mm přírodního **albánského asfaltu** pro teploty **-30 až +60 °C**.

# Schéma elektrárny Dlouhé stráně

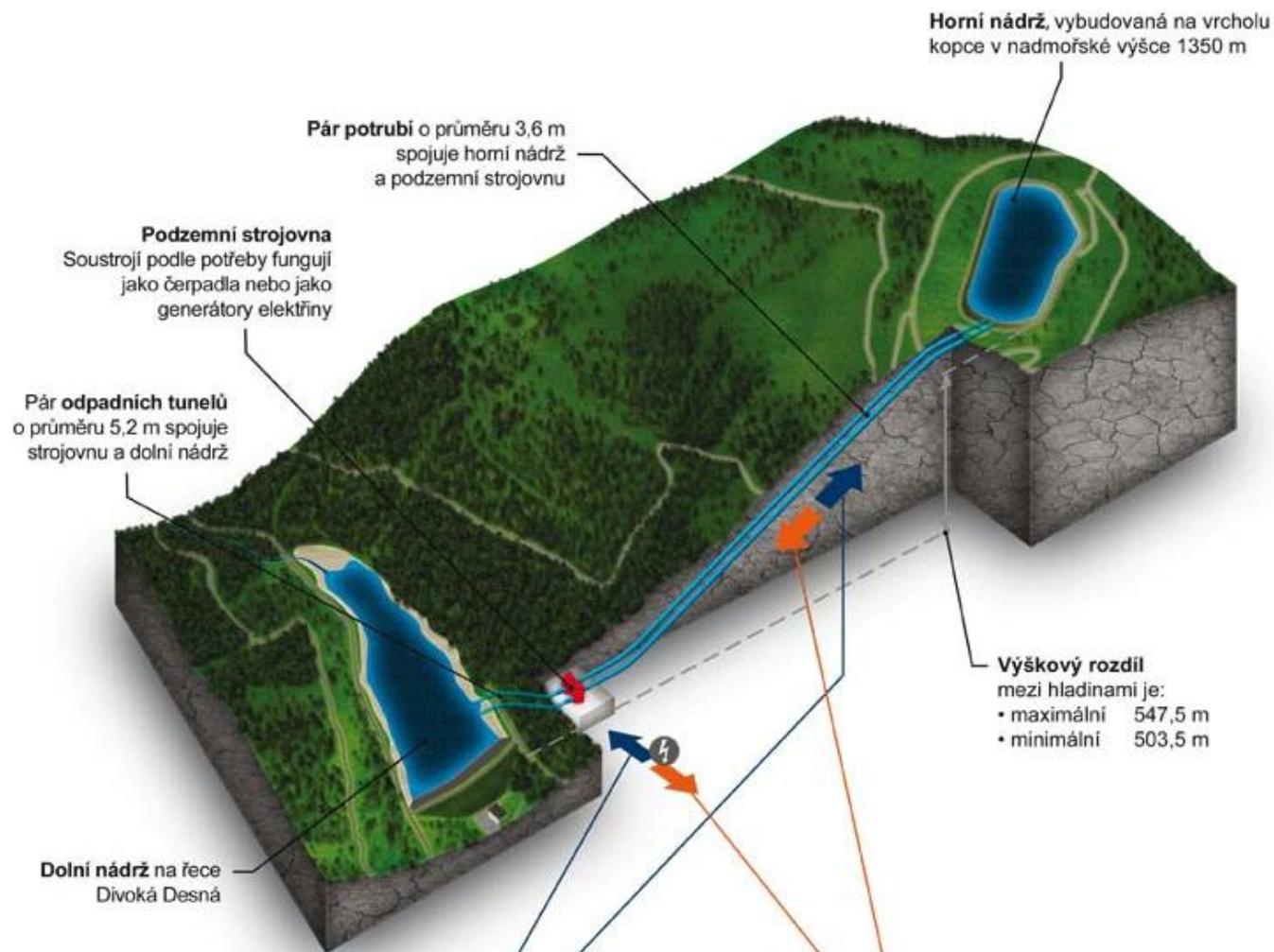


Obr. 27: Schéma strojovny elektrárny [13].



Obr. 28: Schéma přečerpávací elektrárny Dlouhé stráně [13].

# Řízení provozu Dlouhé stráně



V době přebytku energie v síti (např. v noci) se voda přečerpává z dolní nádrže do horní. Elektrárna v tuto chvíli spotřebovává levnější „přebytečnou“ elektřinu a



Ve špičce, kdy je potřeba do sítě dodat energii, se začne voda z horní nádrže pouštět do dolní nádrže přes soustrojí (turbína + generátor), které vyrábí elektřinu.

Obr. 29: Schéma přečerpávací elektrárny Dlouhé Stráně [14].

# Dlouhé stráně



Obr. 30-37: Převážně letecké snímky elektrárny Dlouhé Stráně (vlevo a uprostřed nahoře), fotografie z výstavby (vpravo) a strojovna (uprostřed dole) [15, 16].