

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2018**

**MICHAL  
PROKOP**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Prokop** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **457547**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Možnosti využití nízkopotenciálních zdrojů vodní energie**

Název bakalářské práce anglicky:

**Possibilities of utilization of small water energy sources**

Pokyny pro vypracování:

- Rešerše k zadané problematice. - Přehled a bližší specifikace vhodných hydraulických strojů. - Zhodnocení současného stavu.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**prof. Ing. Jan Melichar, CSc., 12112**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **18.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **04.06.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2019**

prof. Ing. Jan Melichar, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Možnosti využití nízkopotenciálních zdrojů vodní energie“ vypracoval samostatně a s použitím uvedené literatury a pramenů.

V Praze dne 31. 5. 2018

.....

Michal Prokop

## Anotační list

---

**Jméno autora:** Michal Prokop  
**Název BP/DP:** Možnosti využití nízkopotenciálních zdrojů vodní energie

**Anglický název:** Possibilities of utilization of small water energy sources

**Akademický rok:** 2017/2018

**Ústav/Odbor:** Ústav energetiky

**Vedoucí BP/DP:** prof. Ing. Jan Melichar CSc.

**Konzultant:**

**Bibliografické údaje:** Počet stran: 32  
Počet obrázků: 25  
Počet tabulek: 4  
Počet příloh: 1

**Klíčová slova:** hydraulická energie, vodní turbíny, malý spád, účinnost  
**Keyword:** hydraulic power, water turbines, low head, efficiency

**Anotace:** Práce se zabývá možnostmi využití vodní energie z malých zdrojů, které dnes nejsou plně využívány. Hlavní náplní práce je přehled jednotlivých vodních strojů vhodných pro malé spády a posouzení vhodnosti jejich instalace do příslušných lokalit z hlediska ekonomického i ekologického.

**Abstract:** The focus of this thesis is on the use of a water power from small sources, which up till now have not been used to its full potential. The main part describes different types of water power sources suitable for low heads and evaluates the convenience of their use in specific locations from both economical and ecological points of view.

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Janu Melicharovi CSc. za poskytnutí podkladů a odborných rad při řešení dané problematiky.

# Obsah

Seznam použitých značek, veličin a jednotek .....	7
1 Úvod .....	8
1.1 Vodní energie .....	8
1.2 Hydroenergetický potenciál vodních toků .....	8
1.3 Stav hydroenergetiky v ČR .....	10
2 Hydraulické stroje .....	12
2.1 Eulerova rovnice turbíny .....	12
2.2 Současné nepoužívanější turbíny .....	13
2.3 Vodní motory pro nízké potenciály .....	16
2.3.1 Vodní kola .....	16
2.3.2 Šroubová turbína .....	18
2.3.3 Turbína Mixer .....	20
2.3.4 Vírová turbína .....	21
2.3.5 Bezlopatková turbína (Setur) .....	23
2.3.6 Very Low Head Turbine (Turbína pro velmi nízké spády) .....	25
2.3.7 Hydrodynamická čerpadla v turbínovém provozu .....	26
2.3.8 Netradiční řešení vodních motorů .....	28
3 Závěr .....	30
Použitá literatura .....	31
Přílohy .....	32

## Seznam použitých značek, veličin a jednotek

Značka	Veličina	Jednotka
E	měrná energie vody	J.kg <sup>-1</sup>
H	hrubý spád	m
M	moment síly	N.m
P	výkon, příkon	W, kW
Q	objemový průtok	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>
c	absolutní rychlost kapaliny	m.s <sup>-1</sup>
e	nevyužitá část potenciálu vodního díla před a za turbínou	W
g	tíhové zrychlení	m.s <sup>-2</sup>
n	otáčky	min <sup>-1</sup>
n <sub>q</sub>	měrné otáčky	min <sup>-1</sup>
u	unášivá rychlost kapaliny	m.s <sup>-1</sup>
w	relativní rychlost kapaliny	m.s <sup>-1</sup>
η	účinnost	1, %
ρ	hustota (měrná hmotnost)	kg.m <sup>-3</sup>
ω	úhlová rychlost	rad.s <sup>-1</sup>

### Indexy

t	turbíny
k	kroucí
c	celková
p	převodu
g	generátoru
u	užitný

# 1 Úvod

## 1.1 Vodní energie

Vodní energie je jednou z nejdéle člověkem využívaných forem energie. Již odedávna vodní energie doprovázela vývoj civilizace a v různých formách ho doprovází dodnes. Energii vody můžeme rozdělit na chemickou, tepelnou a mechanickou, z nichž pro nás, jako technicky nejlépe využitelná, bude nejpodstatnější její mechanická část. Mechanickou energii vod budeme brát hlavně jako energii vodních toků, dále sem patří mořská energie (v mořských elektrárnách se využívá přílivu a odlivu, vln a mořských proudů), energie srážek a ledovců. Energie vodních toků může být přímo použita na mechanický pohon (mlýnská kola), ale v současnosti je využívána výhradně k výrobě energie elektrické. Výroba elektrické energie ve vodních elektrárnách (hydrocentrálách) je velmi příznivá k životnímu prostředí, jednak z hlediska, že nedochází ke znečištění vodních toků, ale také se jedná za standardních podmínek o obnovitelný a stálý zdroj energie. Vodní přehrady plní též protipovodňovou ochranu pro města ležící dále po toku a v neposlední řadě se stávají estetickou dominantou krajiny, což může být vnímáno negativně, ale i pozitivně.

## 1.2 Hydroenergetický potenciál vodních toků

Mechanickou energii vody můžeme dělit na potenciální a kinetickou. Veličinou charakterizující množství potenciální energie, které můžeme v dané lokalitě využít, se nazývá hydroenergetický potenciál. Hydroenergetický potenciál může být primární nebo sekundární.

Primární hydroenergetický potenciál úseku vodního toku je charakterizován spádem, neboli výškovým rozdílem mezi začátkem a koncem, a průtokem vody. Práci, kterou koná protékající kapalina každou vteřinu, čili výkon, lze vypočítat z následujícího vztahu.

$$P = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H = Q \cdot \rho \cdot E \quad [W] \quad (1)$$

Kde

- $P [W=J \cdot s^{-1}]$  výkon protékající kapaliny
- $Q [m^3 \cdot s^{-1}]$  objemový průtok kapaliny
- $\rho [kg \cdot m^{-3}]$  hustota (měrná hmotnost) kapaliny
- $g [m \cdot s^{-2}]$  tíhové zrychlení
- $H [m]$  výškový rozdíl hladin na začátku a konci úseku (tzv. hrubý spád)
- $E [J \cdot kg^{-1} = m^2 \cdot s^{-2}]$  měrná energie vody (energie vztažená na 1 kg kapaliny)



Sekundární hydroenergetický potenciál je vytvářen v přečerpávacích vodních elektrárnách, kde je voda čerpána ze spodní nádrže do horní v době přebytku elektrické energie v síti a naopak v době špiček spotřeby je pouštěna zpět. Tím přispívají ke stabilizaci elektrické sítě a slouží jako zásobníky energie. Přečerpávací elektrárny jsou zpravidla vybaveny čerpadlovými turbínami, které jsou schopny s dobrou účinností turbínového i čerpadlového provozu.

### Účinnost

Abychom mohli porovnávat jednotlivé vodní motory, je potřeba zavést jejich schopnost zužitkovat veškerou poskytovanou energii, tedy účinnost. Účinnost můžeme chápat ve více smyslech, jako účinnost turbíny nebo celého soustrojí. Turbína převádí mechanickou energii kapaliny na rotační mechanickou energii na výstupním hřídeli s určitými ztrátami. Mechanická energie proudící kapaliny je oproti hydroenergetickému potenciálu snížena o ztráty ve vodním díle před a za turbínou. Účinnost turbíny tedy může vypočítat jako poměr výstupního výkonu na hřídeli turbíny a výkonu vstupující kapaliny (resp. hydraulického příkonu vodní turbíny).

$$\eta_t = \frac{P_t}{P} = \frac{M_k \cdot \omega}{Q \cdot \rho \cdot g \cdot H - e} \quad [* 100 \%] \quad (2)$$

Kde

- $P$  [W] výkon protékající kapaliny
- $P_t$  [W] výkon na výstupním hřídeli turbíny
- $e$  [W] nevyužitá část potenciálu ztracená v částech vodního díla před a za turbínou
- $M_k$  [N.m] krouticí moment na výstupním hřídeli turbíny
- $\omega$  [rad.s<sup>-1</sup>] úhlová rychlost hřídele turbíny

Účinnost celého soustrojí (turbína, případný převodový mechanismus a elektrický generátor) vypočítáme jako součin účinností jednotlivých částí. Účinnost mechanického převodu bývá zhruba 0,98 a účinnost generátoru přibližně 0,95.

$$\eta_c = \eta_t \cdot \eta_p \cdot \eta_g \quad [* 100 \%] \quad (3)$$

## 1.3 Stav hydroenergetiky v ČR

Česká republika ze zeměpisného hlediska nemá nejlepší předpoklady stát se hydroenergetickou velmocí, ale i přesto se zde nachází mnoho lokalit, kde se dá energie vodních toků využít. Lokality s velkým potenciálem jsou již takřka vyčerpány nebo leží v chráněných krajinných oblastech, což jejich využití znemožňuje. Nejvíce energeticky využívanou řekou u nás je Vltava, na které se nachází soustava vodních nádrží zvaná též Vltavská kaskáda.

Vodní elektrárny podle instalovaného výkonu můžeme dělit na:

- velké (VVE)                    nad 200 MW
- střední (SVE)                10 – 200 MW
- malé (MVE)                  do 10 MW
  - průmyslové                    nad 65 kW
  - drobné
    - minielektrárny                nad 35 kW
    - mikro zdroje                  do 35 kW
    - mobilní zdroje                pod 2 kW

Seznam nejvýznamnějších vodních elektráren u nás je sepsán v následující tabulce (Tab. 1).

Tab. 1.: Přehled nejvýznamnějších vodních elektráren u nás [1]

Vodní elektrárna	Instalovaný výkon (MW)	Turbíny
Dlouhé stráně (přečerpávací)	650 (2 x 325)	Francisovy reversní
Dalešice (přečerpávací)	450 (4 x 112,5)	Francisovy reversní
Orlík	364 (4 x 91)	Kaplanovy
Slapy	144 (3 x 48)	Kaplanovy
Lipno I	120 (2 x 60)	Francisovy
Štěchovice II (přečerpávací)	45	Francisova reversní
Kamýk	40 (4 x 10)	Kaplanovy
Štěchovice I	22,5 (2 x 11,25)	Kaplanovy
Vrané	13,88 (2 x 6,94)	Kaplanovy

Množství elektrické energie vyrobené v roce 2016 ve vodních elektrárnách, dle Energetického regulačního úřadu, je zobrazeno v tabulce (Tab. 2).

Tab. 2.: Výroba elektřiny ve vodních elektrárnách v roce 2016

Vodní elektrárny	Celkový instalovaný výkon [MW <sub>el.</sub> ]	Výroba elektřiny brutto [GWh]
do 1 MW	155,9	482,6
od 1 MW včetně do 10 MW	181,5	570,5
od 10 MW včetně	752,8	947,4
přečerpávací	1 171,5	1 201,5
<b>celkem</b>	<b>2261,7</b>	<b>3202</b>

Zdroj: [http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni\\_zprava\\_provoz\\_ES\\_2016.pdf](http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2016.pdf)

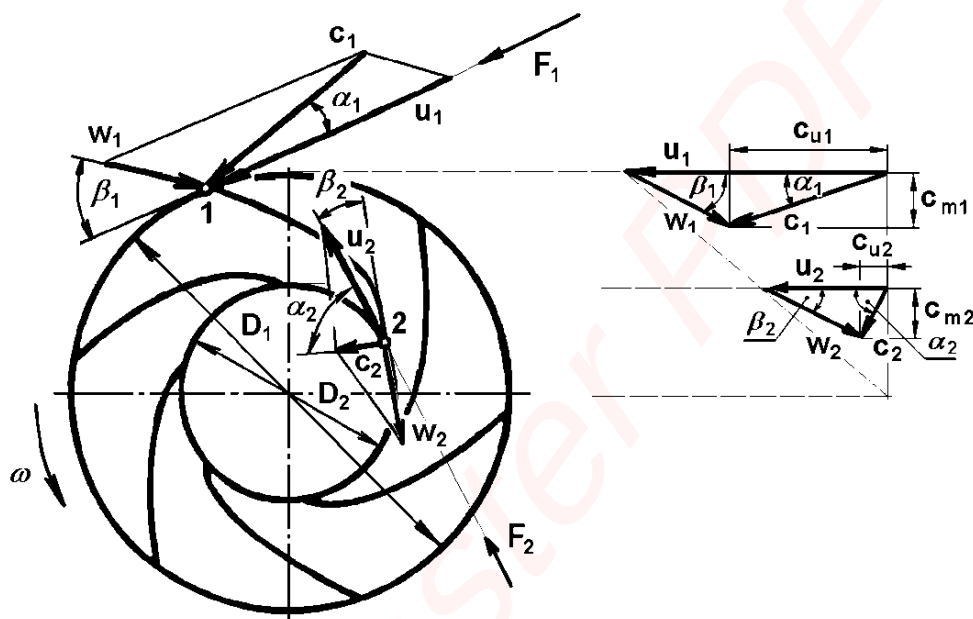
Celkové množství vyrobené elektřiny v roce 2016 bylo 83 310,4 GWh. Vodní elektrárny se tedy podílely 3,84 %. Podíl obnovitelných zdrojů na celkové výrobě byl 12,97 %.

Možným dalším využitím vodní energie tedy může být instalování vodních strojů do lokalit s menším potenciálem. Takovýchto lokalit u nás najdeme velké množství. Ve 30. letech 20. století bylo na území tehdejšího Československa téměř 15 000 lokalit, kde byla využívána vodní energie. Převážná většina sloužila přímo k mechanickým pohonům mlýnů, pil, hamrů, textilních továren nebo malých vodních elektráren místního významu. Časem kvůli zániku podniků nebo přechodu na jiný zdroj energie tato vodní díla chátrala a zanikala. V 80. letech se začala některá díla obnovovat do podoby malých vodních elektráren. Jak již bylo řečeno, tak lokalit s malým spádem je u nás hodně a byla by škoda jich nadále nevyužívat. Náklady na rekonstrukci stávajících a na výstavbu nových malých vodních elektráren nejsou až tak vysoké a jejich následná údržba není náročná. Malé vodní elektrárny a mikroelektrárny s velmi malým potenciálem nemohou nahradit stávající velké zdroje energie, ale mohou ovlivnit podíl obnovitelných zdrojů na celkové výrobě elektrické energie v ČR.

## 2 Hydraulické stroje

### 2.1 Eulerova rovnice turbíny

Ve vodních elektrárnách se většinou používají klasické typy lopatkových turbín, jejichž návrh vychází z Eulerovy rovnice turbíny, resp. z geometrické podobnosti rychlostních trojúhelníků.



Obr. 1.: Schéma oběžného kola s rychlostními trojúhelníky [2]

- $c$  ... absolutní rychlost kapaliny
  - $c_u$  ... unášivá složka absolutní rychlosti
  - $c_m$  ... meridiánová složka absolutní rychlosti
- $u$  ... unášivá rychlost kapaliny (obvodová rychlost oběžného kola)
- $w$  ... relativní rychlost kapaliny vůči lopatce oběžného kola

Pro uvedené rychlosti platí:

$$\vec{c} = \vec{u} + \vec{w} \quad (4)$$

$$c = \sqrt{c_u^2 + c_m^2} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (5)$$

Pro převedení daného typu turbíny na požadovanou velikost a výkon se využívá teorie podobnosti hydraulických strojů, podle níž jsou si dvě turbíny hydraulicky podobné, jsou-li si podobné jejich odpovídající rychlostní trojúhelníky – na vstupu a na výstupu. Kritériem, které uvede rychlostní trojúhelníky do souvislosti s veličinami potřebnými pro konstrukci turbíny, jsou tzv. měrné otáčky, viz následující rovnice.

$$n_q = n \frac{Q^{0,5}}{H_u^{0,75}} \quad [min^{-1}] \quad (6)$$

kam dosazujeme:

- otáčky turbíny  $n \text{ (min}^{-1}\text{)}$
- objemový průtok vody turbínou  $Q \text{ (m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$ ,
- užitný spád turbíny  $H_u \text{ (m)}$

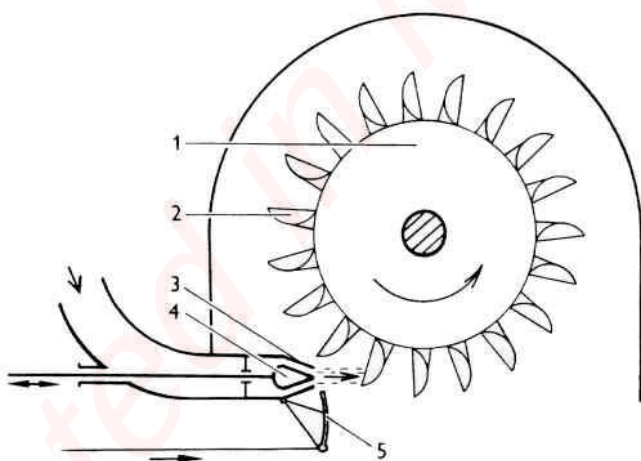
S jejich pomocí pak u daného vodního díla zvolíme vhodný typ turbíny a následně její rozměry, přepočtem z modelové turbíny.

## 2.2 Současné nejpoužívanější turbíny

Vodní motory můžeme dělit podle hodnoty měrných otáček na pomaloběžné, střední a rychloběžné. Ve vodních elektrárnách jsou nejčastěji pro přeměnu mechanické vodní energie na elektrickou využívány hydrodynamické hydromotory – turbíny. V současnosti nejpoužívanějšími rovnotlakými (na vstupu a výstupu z oběžného kola je stejný tlak) turbínami jsou Peltonova a Bánkiho. Z přetlakových to jsou Francisova a Kaplanova. Tyto turbíny jsou používány ve velkých, středních i malých vodních elektrárnách, ale pro aplikaci na malých tocích nejsou příliš vhodné.

### **Peltonova turbína**

je rovnotlaká turbína, jejíž oběžné kolo tvoří lopatky ve tvaru dvojitého pohárku, které jsou ostříkovány jednou či více dýzami. Je vhodná pouze pro velké spády (200 m a vyšší) a malé průtoky, proto je hojně využívána hlavně v horských oblastech a v ČR jen zřídka.



- 1 – oběžné kolo
- 2 – lopatka
- 3 – dýza (tryska)
- 4 – regulační jehla
- 5 – deflektor

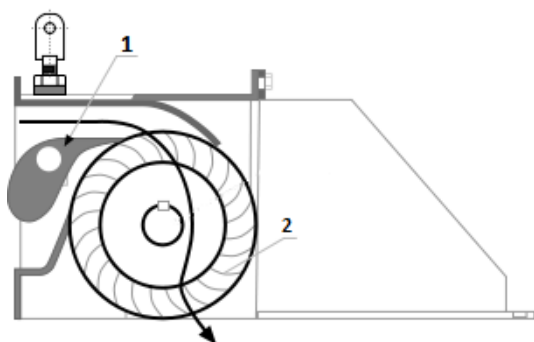
Obr. 2.: Schéma Peltonovy turbíny

Zdroj:

[http://www.energyweb.cz/web/index.php?display\\_page=2&subitem=2&sl\\_mode=hrch&slovník\\_page=pelton\\_turb.html](http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=2&sl_mode=hrch&slovník_page=pelton_turb.html)

### **Bánkiho turbína**

Je rovnotlaká turbína s dvojitým ostřikem lopatek. Oběžné kolo je tvořeno ocelovou klecí s válcovými lopatkami. Voda vstupuje do oběžného kola dostředivě přes lopatky, kterým předává část své kinetické energie a poté kolo opouští odstředivě opět přes lopatky, jimž předá zbytek své energie. Průtok se reguluje klapkou nebo regulačním segmentovým uzávěrem. Je vhodná pro malé a střední spády s malými průtoky vody. Účinnost Bánkiho turbíny není velká (75 – 80 %), ale její konstrukční jednoduchost a snadná údržba ji řadí mezi nejpoužívanější turbíny v malých elektrárnách.



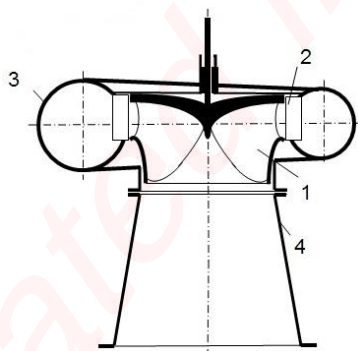
- 1 – regulační klapka
- 2 – lopatka oběžného kola

Obr. 3.: Schéma Bánkiho turbíny

Zdroj: <http://enacademic.com/dic.nsf/enwiki/11590409>

### **Francisova turbína**

Patří mezi přetlakové turbíny, tedy tlak před vstupem do oběžného kola je větší než za kolem. Voda je přiváděna spirálou do rozvaděče s natáčecími rozváděcími lopatkami umístěnými po obvodu celého oběžného kola. Oběžné kolo je vybaveno neregulovatelnými lopatkami pevně spojenými s věncem kola. Francisova turbína je vhodná pro vyšší a střední toky, v historii byla nejpoužívanějším typem turbíny u nás, dnes je ale nahrazována, pro místní podmínky vhodnější, turbínou Kaplanovou. Díky její stavbě je vhodná i na reverzibilní použití v přečerpávacích elektrárnách.



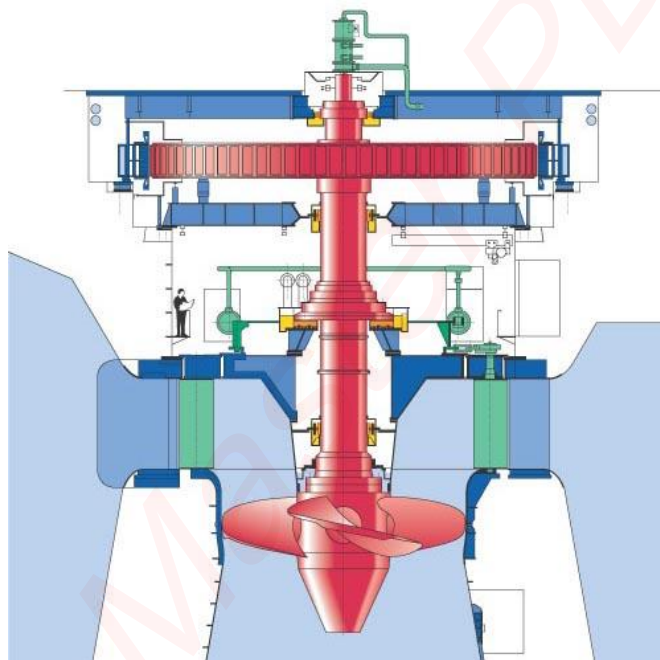
- 1 – oběžné kolo
- 2 – rozváděcí lopatky
- 3 – spirála
- 4 – sací trouba

Obr. 4.: Schéma Francisovy turbíny (vlevo), oběžné kolo (vpravo)

Zdroj: <http://www.spssol.cz/rsimages/DIGI1/html/cad/Vodn%C3%AD%20turb%C3%ADny/Modul.html>

## **Kaplanova turbína**

je přetlaková turbína, tedy s úplným ostřikem oběžného kola. Podobně jako Francisova turbína má naklápěcí rozváděcí lopatky, ale Kaplanova má navíc natáčecí ještě lopatky oběžného kola, což umožňuje regulaci v mnohem větším rozsahu za udržení vysoké účinnosti. Její použití je převážně na středních a dolních tocích řek, tedy pro nižší spády a větší průtoky. Provedení může být se spirální skříní nebo přímoproudé. Možnou levnější variantou je Propelerova turbína, která vychází z Kaplanovy turbíny, ale má pevné lopatky oběžného kola a většinou i rozvaděče, tím jsou výrazně zlevněny pořizovací náklady, ale zhoršená regulovatelnost a účinnost v různém rozsahu průtoků. Další modifikací je tzv. Semi-Kaplan s pevnými rozváděcími lopatkami a natáčecími lopatkami oběžného kola.



*Obr. 5.: Schéma Kaplanovy turbíny*

Zdroj: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Kaplanova\\_turbína](https://cs.wikipedia.org/wiki/Kaplanova_turbína)

## 2.3 Vodní motory pro nízké potenciály

Vodní díla s velkým potenciálem jsou u nás už využívána a další takové lokality se u nás nenacházejí, proto se oblast hydroenergetiky v současnosti ubírá směrem k malým vodním zdrojům. V době rozkvětu hydroenergetiky mezi válkami byly na mnoha lokalitách zřizovány malé vodní elektrárny, které byly osazovány většinou ne nejvhodnějšími, ale v té době nejpoužívanějšími Francisovými turbínami (Kaplanova turbína byla zatím ve fázi rozvoje). Tyto malé vodní elektrárny a další vhodné lokality využívající vodní energii například na mechanický pohon, jsou v dnešní době renovovány a namísto starých turbín jsou osazovány novými typy, vhodnějšími pro danou lokalitu. Tím je docíleno vyšší účinnosti využití vodní energie. Přehled a porovnání jednotlivých typů vodních turbín vhodných zejména pro nízkopotenciální zdroje je obsahem následujících kapitol.

### 2.3.1 Vodní kola

Vodní kola jsou nejstarším typem vodních motorů. Jejich využití je datováno již od 2. století p.n.l. do vrcholu jejich rozvoje koncem 18. století. V současné době je však jejich využití ve vyspělých zemích pouze ojedinělé, v provozu slouží spíše jako historická památka nebo technická zajímavost.

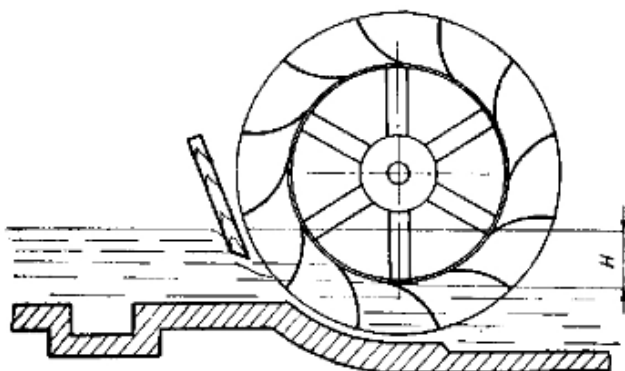
Vodní kola využívají převážně potenciální energii vodních toků, přitékající voda plní tzv. korečky (uzavřené lopatky) a tíha vody uvádí kolo do pohybu. To platí pro kola s horním a středním nátokem. Kola se spodním nátokem využívají naopak kinetickou energii toku vody. Vodní kola můžeme tedy dělit na kola s horním nátokem, středním nátokem a spodním nátokem, kde z principu kola s horním nátokem dosahují vyšších účinností než kola se středním nebo spodním nátokem.

Využití vodních kol v historii bylo přímo na mechanický pohon mlýnů, pil, apod. avšak pro výrobu elektrické energie jejich použitelnost rapidně klesá. Jednak z důvodu omezeného využití spádu a průtoku, ale také kvůli velmi nízkým provozním otáčkám, vyplývajícím z malé obvodové rychlosti kola (řádově metry za sekundu). Pro výrobu elektrické energie by bylo nutné zařadit mechanický převod, který zvyšuje ztráty soustrojí. Další nevýhodou je možnost částečného nebo úplného zamrznutí kola v zimním období.

Použitelnost vodních kol je tedy v lokalitách s malými průtoky s nízkými spády, kde hrozí nebezpečí opotřebení vodního motoru abrazivními částicemi [2].



### Spodní nátok



Obr. 6.: Vodní kolo se spodním nátokem

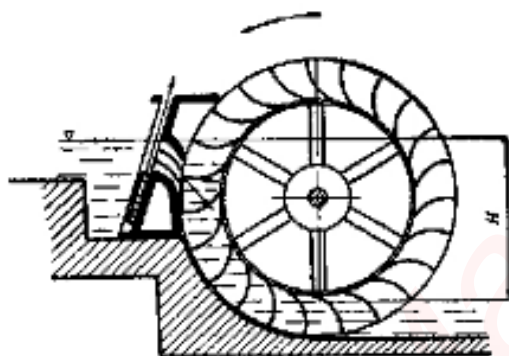
Typy kol: Ponceletovo, Sagabienovo, Zuppingerovo ...

Hltnost  $Q = 0,1$  až  $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Spád  $H = 0,6$  až  $2,5 \text{ m}$

Účinnost  $\eta = 30$  až  $70 \%$

### Střední nátok



Obr. 7.: Vodní kolo se středním nátokem

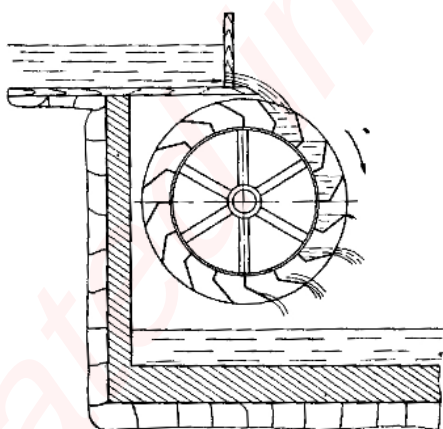
Například Bachovo kolo

Hltnost  $Q = 0,3$  až  $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Spád  $H = 1,5$  až  $4,5 \text{ m}$

Účinnost  $\eta = 60$  až  $75 \%$

### Horní nátok



Obr. 8.: Vodní kolo s horním nátokem

Zdroj: <https://publi.cz/books/90/10.html>

Hltnost  $Q = 0,1$  až  $0,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

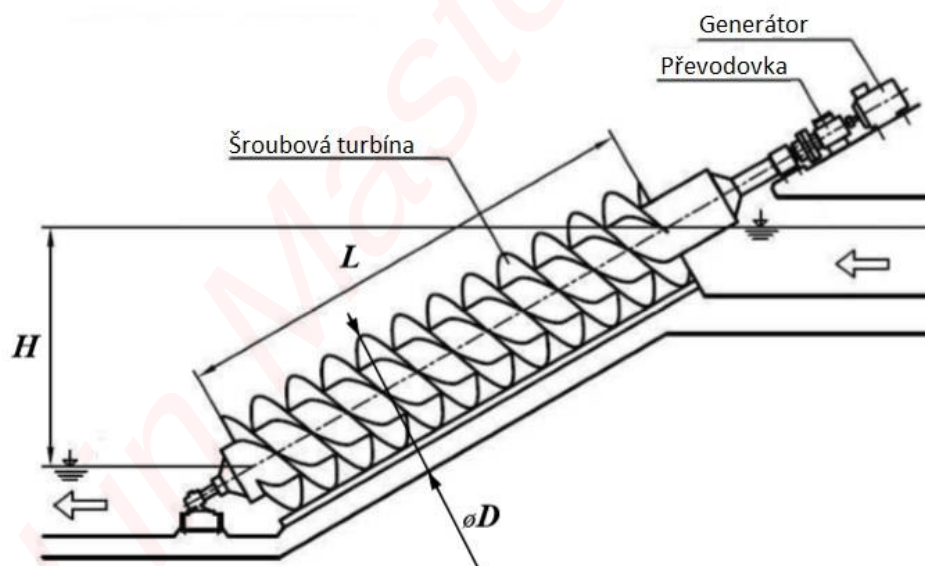
Spád  $H > 2,5 \text{ m}$

Účinnost  $\eta = 70$  až  $85 \%$

## 2.3.2 Šroubová turbína

Funkce šroubové turbíny (někdy také nazývané Archimédova turbína) vychází z reverzního chodu Archimédova šroubu, který byl již ve starověku používán jako čerpadlo. Jedná se tedy, hned po vodním kolu, o druhý nejstarší vodní motor.

Stavba šroubové turbíny je velmi jednoduchá, jedná se o dutý hřídel uložený ve válcovém korytu skloněném o určitý úhel, na kterém je navinuta dvouchodá (v případě malého sklonu i vícechodá) šroubovice. Voda vtéká z vstupního kanálu do závitů šroubovice, kde působí svou potenciální energií po celé délce šneku a tím roztáčí rotor. Jedná se tedy v podstatě o rovnotlakou turbínu, využívající pouze potenciální složku vodní energie. Vyniká svojí konstrukční a technologickou jednoduchostí, spolehlivostí, jednoduchostí stavebních úprav, údržbovou nenáročností a možností využívání vody obsahující velké částice (listí, kamení, ...). Z ekologického hlediska se také jedná o dobrou variantu, při provozu dochází k okysličování vody a turbína také nebrání poproudě migraci ryb. Nevýhodou může být, jako u vodních kol, částečné nebo úplné zamrznutí v zimním období nebo poměrně vysoká hlučnost.



Obr. 9.: Schéma šroubové turbíny

Turbína je určena pro spády od 0,8 do 10 m a průtoky od 0,2 do 18 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Úhel sklonu se obvykle pohybuje mezi 17° a 36° a vnější průměr šroubovice bývá 0,6 až 5 m [3], [4]. Výhodou je, že turbína může využívat široké pásmo průtoku při zachování poměrně vysoké účinnosti oproti jiným vodním motorům (viz Tab. 3).

Tab. 3.: Závislost účinnosti na plnění stroje

Typ vodního motoru	Plnění stroje – hltnost Q									
	10 %	20 %	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Šroubová turbína	25	74	77	79	82	82	83	83	84	85
Kaplanova turbína	15	70	85	88	90	90	90	90	88	85
Francisova turbína	-	-	15	58	72	78	82	82	82	80
Bánkiho turbína	-	40	60	68	72	74	75	74	72	70
	Účinnost [%]									

Zdroj: <http://www.gess.cz/cz/male-vodni-elektrany.html>

Jako praktickou aplikaci můžeme uvést MVE Planá u Českých Budějovic, uvedenou do provozu koncem roku 2015. Zde byly instalovány tři Archimédovy turbíny o celkovém výkonu 600 kW. Průměrný průtok v dané lokalitě je  $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , při jarních povodních až  $25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a spád činí 3,5 m. Turbíny jsou tvořeny čtyřchodými šroubovými rotory dlouhými 14 m o průměru 4,1 m, uloženými pod sklonem  $22^\circ$ . Stavbu prováděla společnost MAS-Hydro a.s. ze Sezimova ústí [5].



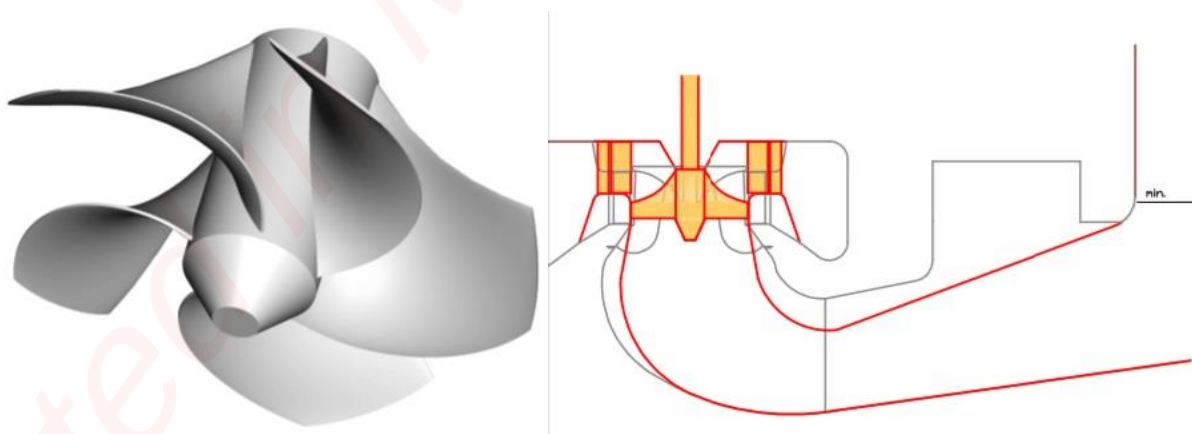
Obr. 10.: Vodní elektrárna Planá

Zdroj: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/obnovitelne-zdroje/1915-na-vltave-pribyla-unikatni-elektrarna-s-archimedovymi-srouby>

### 2.3.3 Turbína Mixer

Tato vodní turbína byla vyvinuta pro náhradu již zmíněných Francisových turbín v starších malých vodních elektrárnách. Staré typy turbín nejsou většinou optimální volbou pro danou lokalitu a tím pádem nepracují s očekávanou účinností, otáčkami (většinou jsou pomaluběžné a je potřeba ještě před generátor přidat převodovku) a někdy nejsou schopny ani využít veškerý průtok, který jim daná řeka poskytuje. Proto se stávající stroje postupně nahrazují novými. Aplikace Kaplanových turbín by byla přijatelným řešením, avšak k tomu by byla zapotřebí poměrně razantní stavební úprava celé elektrárny, což by bylo finančně nákladné. Turbína Mixer byla navržena tak aby nahradila stávající oběžná kola Francisových turbín a s drobnými stavebními úpravami zvýšila účinnost a hltnost celé malé vodní elektrárny.

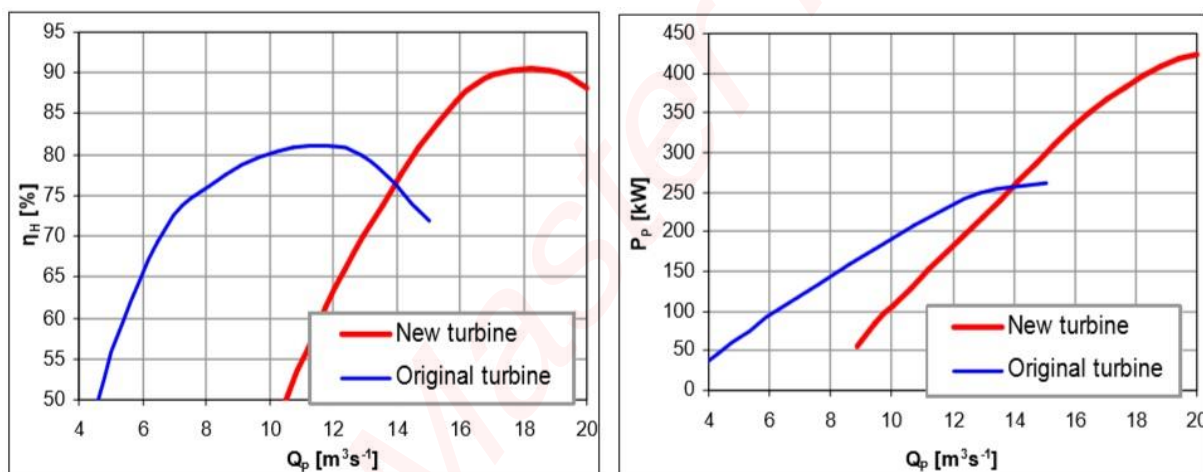
V rámci přestavby vodní elektrárny je potřeba zajistit dostatečný průtok rozváděcím ústrojím, aby bylo možné pokrýt hltnost nové turbíny. Spirály starších elektráren bývají dostatečně dimenzovány, takže nevyžadují další stavební úpravy. V rozvaděči je také potřeba zajistit dostatečné rozevření regulačních lopatek, aby dovolili potřebný průtok, což většinou staré rozvaděče neumožňují a musí být nahrazeny novými. Největší vliv na výslednou účinnost však mají tvary oběžného kola a savky. Nejdříve byla navržena savka, tak aby nemuselo dojít k bouracím pracím v budově staré elektrárny. U savky byl za pomoci numerických výpočtů optimalizován tvar kužele a kolena tak, aby byla co nejlépe využita kinetická energie vody vystupující z oběžného kola a aby nedošlo k odtržení proudu vody od stěny. Tvar oběžného kola byl navržen pomocí automatické optimalizace v sestavě s již navrženou savkou. Tím bylo dosaženo optimálního tvaru oběžného kola. Oběžné kolo je navrženo jako svařenec odlitých nebo lisovaných lopatek s nábojem [6].



Obr. 11.: Oběžné kolo (vlevo), nový tvar savky (vpravo) [6]

Jako konkrétní případ můžeme uvést rekonstrukci malé vodní elektrárny Mradice, kterou provedla v roce 2013 firma ČKD Blansko Engineering. Zde byla nahrazena stávající kašnová Francisova turbína uvedeným typem turbíny Mixer. Parametry původního soustrojí: při spádu 2 m a průtoku  $10\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  měl generátor dávat výkon 140 kW. Průměrně dosahovaný výkon podle řídicího panelu byl však pouze 90 – 110 kW. Maximální hltnost turbíny byla  $11\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , přitom možné množství odebrané vody z řeky je  $14\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ . Parametry nového soustrojí: předpokládaný spád 1,8 až 2,2 m, průtok 10 až  $13,5\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  a výkon na spojce při dodržení parametrů díla 130 až 235 kW.

Rekonstrukcí byla zvýšena účinnost celé elektrárny v oblasti vyšších průtoků a také byl navýšen celkový dodávaný výkon až na dvojnásobek. Vyšší rychloběžnost turbíny umožňuje přímé napojení turbíny na generátor, tedy vyloučení ztrát převodem. Celková rekonstrukce v tomto rozsahu není finančně příliš nákladná a díky výraznému zvýšení výkonu je doba návratnosti kratší.



Obr. 12.: Závislost účinnosti (vlevo) a výkonu (vpravo) na průtoku staré a nové turbíny [6]

### 2.3.4 Vírová turbína

Vírová turbína je poměrně novým typem vodního motoru. Byla vyvinuta na VUT v Brně na Odboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana, pod vedením prof. F. Pochylého. Je tedy chráněna českým patentem z roku 2003.

Její stavba je poměrně jednoduchá, skládá se ze dvou nebo více lopatek ve tvaru zborcené šroubovice připevněných k válcovému náboji. Jedná se o přetlakovou turbínu, ale voda v ní proudí v opačném smyslu než u klasické turbíny. Do klasických turbíny typu Francis nebo Kaplan vstupuje voda s rotační složkou rychlosti a vystupuje bez rotace, zatímco u vírové turbíny vstupuje voda do prostoru oběžného kola bez rotace a vystupuje s rotací, která je opačného smyslu než rotace oběžného kola. Výhodou této turbíny je konstrukční

jednoduchost, větší hltnost, vyšší rychloběžnost (možnost přímého pohonu generátoru), vyšší hydraulická účinnost pro vysoký rozsah otáček a průtoků a lepší kavitační odolnost oběžného kola. Turbína je vhodná pro nízké spády 1 až 5 m a poměrně vysoké průtoky [2].



Obr. 13.: Oběžné kolo vírové turbíny [7]

Nejnovější aplikací vírové turbíny je instalace dvou turbín o celkovém výkonu 29 kW na malé vodní elektrárně Želina. Tam doplnili dvojici stávajících Francisových turbín a zužitkovali tak zbytkový nevyužívaný průtok. Parametry turbíny jsou sepsány v následující tabulce (Tab. 4.) [8]. Z dalších instalací lze jmenovat MVE Podhradí ( $P = 43 \text{ kW}$ ) a MVE Krásněves ( $P = 10 \text{ kW}$ ).

Tab. 4.: Parametry turbíny [8]

Typ turbíny	Vírová násosková
Instalovaný výkon	2 x 14,5 kW
Spád	1,9 až 2,4 m
Kapacita celkového průtoku oběma turbínami	$2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Účinnost	až 85 %

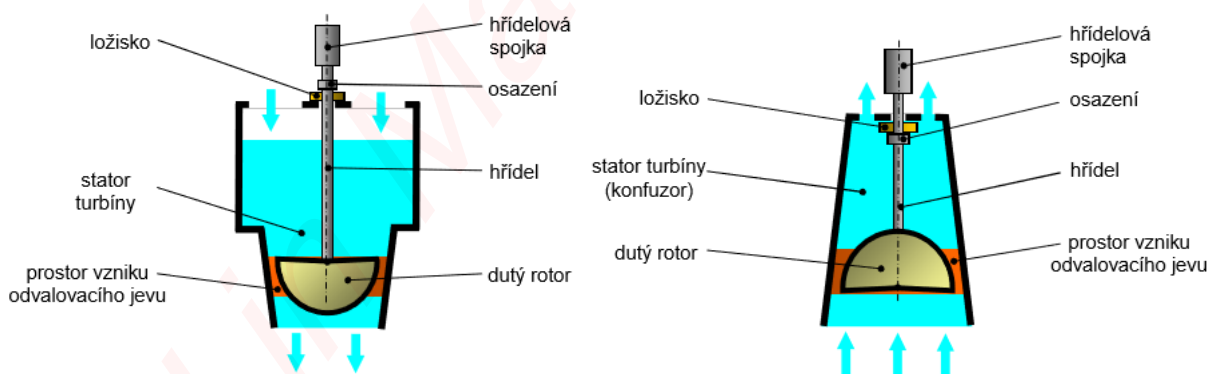


Obr. 14.: Vodní elektrárna Želina [8]

### 2.3.5 Bezlopatková turbína (Setur)

Bezlopatková turbína je dalším novým vodním motorem s českým původem. Za jejím vynálezem tentokrát stojí Ing. Miroslav Sedláček ze Stavební fakulty ČVUT (podle toho také jiný název Setur - „Sedláčkova turbína“).

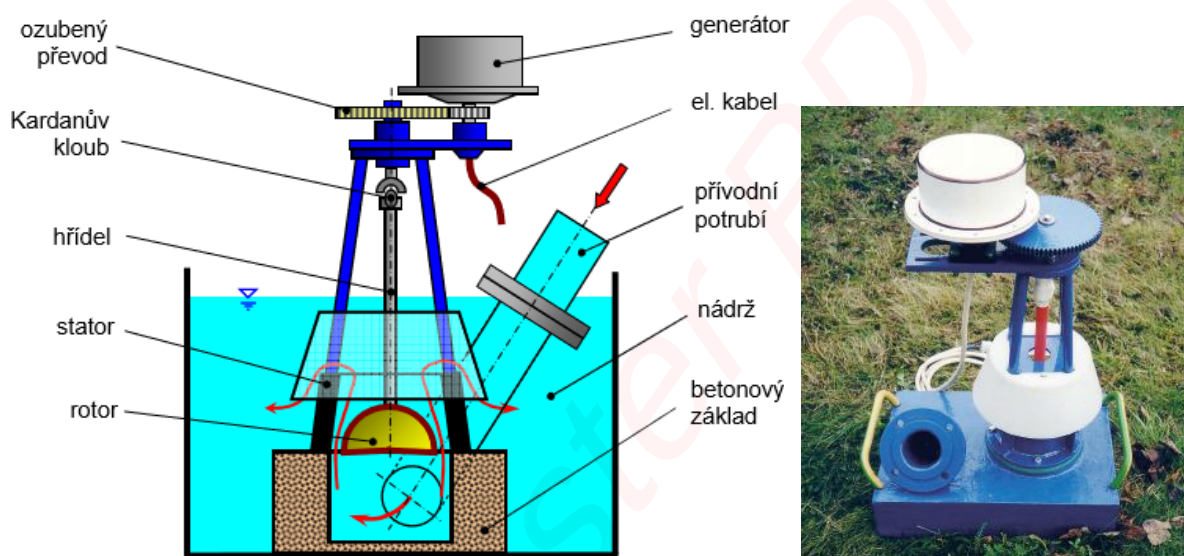
Bezlopatková turbína funguje na zcela jiném principu než klasické lopatkové turbíny. Proces jejího fungování není doposud fyzikálně zcela objasněn, ačkoli je konstrukčně velmi jednoduchá. Silové působení mezi tekutinou a rotorem turbíny se obvykle formuluje na základě cirkulace rychlosti, jako tomu je například při řešení dynamického vztlaku na křídle. V podstatě jde o kuželový nebo kulový rotor, jehož průměr není o moc menší než průměr kuželového statoru. Rotor se díky proudění kapaliny, mezerou mezi rotorem a statorem, spolu s hřídelí odvaluje po stěně statoru a tím konají tzv. precesní pohyb, kdy jednak rotují kolem podélné osy a zároveň tato osa v prostoru opisuje povrch kužele s vrcholem v opěrném nebo závěsném ložisku. Každý oběh rotoru má díky rozdílným průměrům odvalovacích kružnic za následek pootočení hřídele o určitý úhel vycházející z poměru průměrů rotoru a statoru. Tím pádem musí rotor několikrát oběhnout stator, aby se hřídel otočila jednou kolem své osy. Směr rotace závisí na počátečním impulsu, který bývá zajištěn tangenciálním přívodem kapaliny do přívodního potrubí. Konstrukční provedení může být buď s podepřeným rotorem, nebo se zavěšeným rotorem, vždy však musí být zajištěno správné ukotvení a možnost odvalování (viz obrázek 15).



Obr. 15.: Konstrukční provedení se zavěšeným (vlevo) a podepřeným rotorem (vpravo) [2]

Jako příklad můžeme uvést, dnes již běžně používanou a sériově vyráběnou, turbínu DVE 120 („Domácí vodní elektrárna“). Konstrukce turbíny DVE 120 vychází z koncepce podepřeného rotoru. Voda natéká přívodním potrubím do prostoru pod turbínou, kde tangenciálně vstupuje do statoru, což napomáhá rozběhu turbíny a odvalovacímu jevu. Styčné plochy rotoru se statorem jsou opatřeny ozubením, které zamezuje prokluzu obou částí po sobě, čímž by bylo zapříčinilo snížení účinnosti. Po průtoku vody statorem a přeměně části

hydraulické energie na mechanickou, voda vytéká volně do nádrže, ve které je umístěno soustrojí. Precesní pohyb hřídele je zajištěn buď pružným materiálem hřídele nebo pomocí Kardanova kloubu. Turbína DVE 120 je určena pro následující rozsah provozních parametrů: spád  $H = 3$  až  $20$  m a průtok  $Q = 4$  až  $20$  l.s<sup>-1</sup>. Praktická aplikace DVE 120 proběhla například při rekonstrukci starého mlýna v Dolních Počernicích v Praze. Byla zde použita dvojice turbín navržených na provozní parametry: průtok  $Q = 6,5$  až  $8,5$  l.s<sup>-1</sup> a spád  $H = 3,8$  m. Každá miniturbína byla připojena ke generátoru 120 W, 3 x 24 V AC. Vyrobená elektrická energie z obou turbín sloužila jako zdroj energie pro noční osvětlení mlýna.

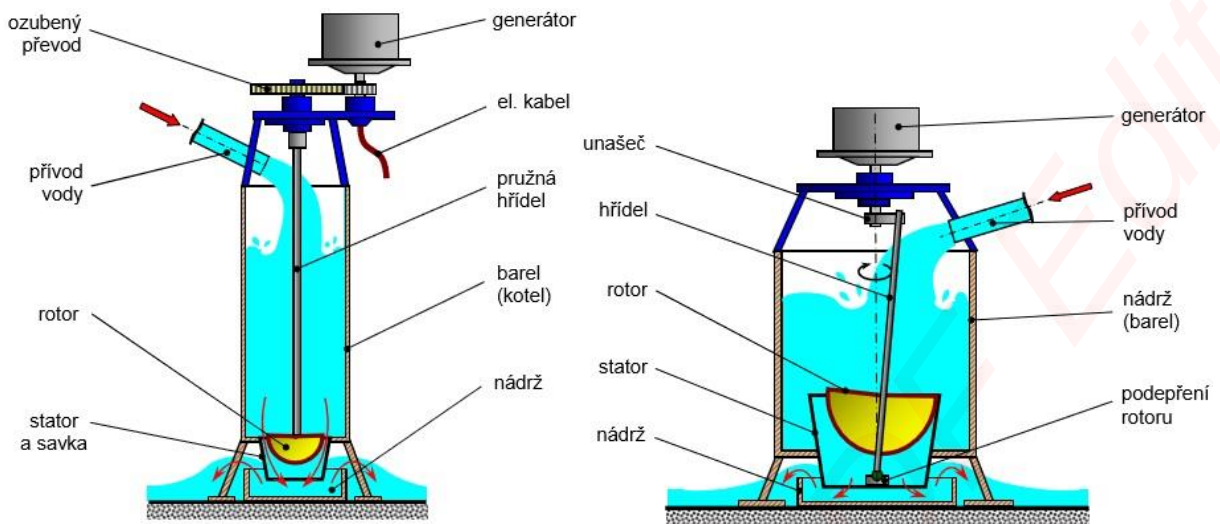


Obr. 16.: Turbína DVE 120 [2]

Jiným konstrukčním řešením je tzv. Barelová turbína. Konstrukce se sestává z rotoru zavěšeného na pružném hřídeli umístěném ve vysokém přívodním barelu, do kterého je přiváděna kapalina, čímž je zajištěn dostatečný spád pro turbínu. Stator je umístěn na spodní části barelu a je vybaven krátkou savkou, která je vyústěna pod hladinu spodní nádrže, což umožňuje lepší využití spádu. Výhoda tohoto řešení je především v možnosti případné jednoduché demontovatelnosti rotoru i statoru.

Dalším možným řešením, chráněným českým patentem, je Precesní turbína. Zde je rotor zesponu podepřen kulovým ložiskem, které nese tíhu rotoru i zatížení od proudící kapaliny. Z opačného konce hřídele jsou pomocí unašeče odebírány otáčky, nikoliv však samotné hřídele ale každého odvalu, jejichž frekvence je mnohem vyšší. Protože hřídel není namáhána velkým momentem, nemusí být povrch rotoru a statoru opatřen ozubením, stačí, aby byly styčné plochy z pryže. Hlavní výhodou této konstrukce je vyšší počet otáček a tedy možnost přímého napojení bez převodu na generátor [2].





Obr. 17.: Barelové (vlevo) a precesní (vpravo) provedení turbíny Setur. [2]

### 2.3.6 Very Low Head Turbine (Turbína pro velmi nízké spády)

Tento typ turbíny byl vyvinut ve Francii a v Severní Americe pro potřebu pokrytí lokalit s velmi nízkými spády (do 5 m), které do té doby byly energeticky nevyužívány. Konstrukce vychází z regulované Kaplanovy turbíny s 8 lopatkami oběžného kola. Rotace oběžného kola je poměrně pomalá, optimálně mezi 140 až 200 otáčkami za minutu. Nízké otáčky jsou výhodou hlavně z ekologického hlediska, kdy umožňují migraci ryb, při průplavu turbínou nedochází k usmrcení a k poranění jen velmi zřídka. Pomalé otáčky též zajišťují nízkou hlučnost při provozu. Další výhodou je jednoduchá instalace a nenáročnost na stavební úpravy. Turbína se pouze umístí do přívodního kanálu obdélníkového průřezu, čímž nevyžaduje stavbu speciální budovy hydrocentrály. Je možné ji tedy umístit do již existujících objektů [9].

Za vývojem a výrobou VLH turbín stojí kanadská firma Coastal Hydropower. Turbíny jsou stavěné pro spády 1,4 – 5 m a průtoky  $10 - 30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Vyráběny jsou s průměry oběžných kol od 3,5 až do 5 m s výkonem od 100 do 500 kW, přičemž účinnost se pohybuje v průměru okolo 80% [10]. Svými parametry jsou vhodné pro velmi malé spády, ale poměrně velké průtoky. Jejich aplikace se prosadila hlavně v severní Francii a v Ontariu v Kanadě.



Obr. 18.: Turbína VLH ve Francii

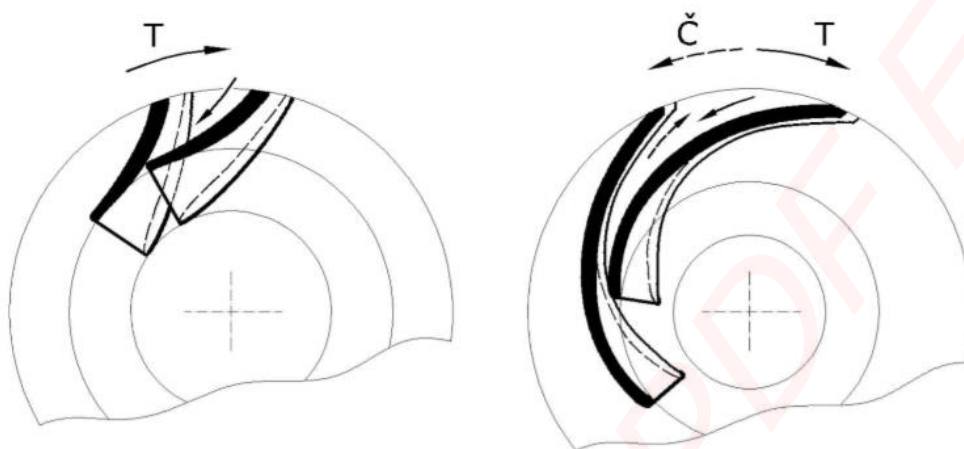
Zdroj: <http://ite.org.pl/en/5.php?subcat=25>

### 2.3.7 Hydrodynamická čerpadla v turbínovém provozu

Ve vodních turbínách se mění hydraulická energie na mechanickou, v hydrodynamických čerpadlech se mění energie mechanická na hydraulickou. U hydrodynamických strojů je volný mezilopatkový prostor v oběžném kole, který umožňuje reverzibilní přeměnu energie, tedy přeměnu v turbínovém i v čerpadlovém režimu. Tím přichází v úvahu ekonomicky příznivé řešení, a to použití sériově vyráběných hydrodynamických čerpadel ve funkci malých turbín. Příklad reverzibilního chodu může nastat například při výpadku proudu při čerpání, voda proudí následně v opačném směru než při čerpání a roztáčí lopatky oběžného kola. Vědomé využití tohoto reverzibilního chodu se začalo využívat na sklonku 30. let minulého století. Například roku 1934 v elektrárně Baldeney na řece Ruhr byla provozována Kaplanova turbína v čerpadlovém chodu, kdy účinnost oproti turbínovému chodu klesla z 90% na 78%. Obdobný pokus proběhl na čerpací stanici moskevského plavebního kanálu, kde bylo zkušebně provozováno axiální čerpadlo jako turbína, v tomto případě klesla účinnost z 85% na 80%.

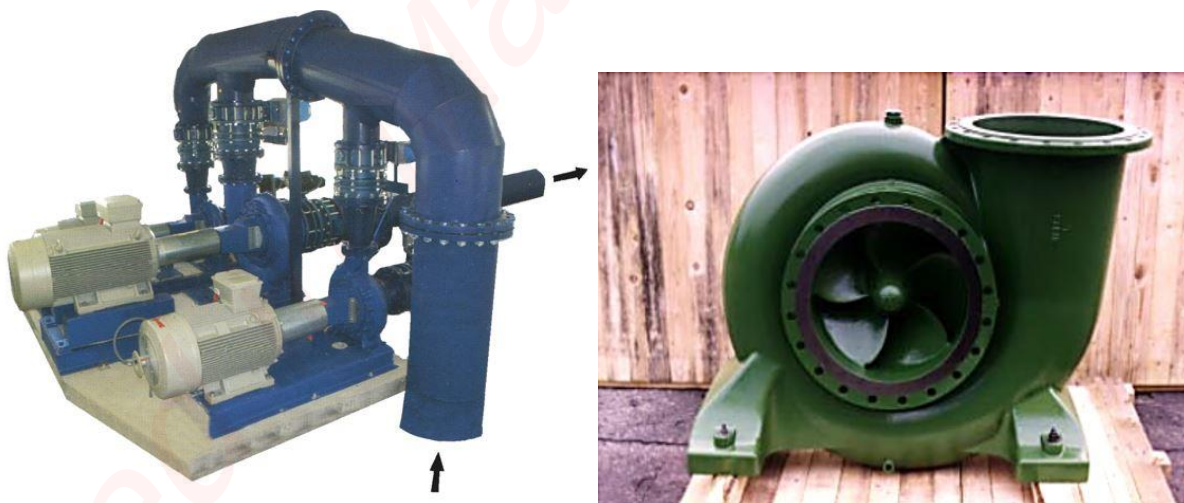
Hlavním důvodem ztrát je, že hydraulicky funkční části turbín jsou konstruovány jako konfuzory, zatímco u čerpadel jako difuzory. Provozování difuzorů ve funkci konfuzorů se zdá být z hlediska účinnosti přijatelné, ale používat konfuzory ve funkci difuzorů už znamená větší hydraulické ztráty. Dalším důležitým parametrem je konstrukce lopatek oběžného kola. Ostrá výstupní hrana lopatek oběžného kola čerpadla je vstupní hranou při turbínovém provozu,

což má za následek výrazné navýšení hydraulických ztrát. Proto je u konstrukce soudobých čerpadlových turbín dáván důraz na tvarování oběžných lopatek, zejména jejich vstupních částí [11].



Obr. 19.: Odlišnost geometrie lopatkování oběžných kol turbíny (T) a čerpadla (Č) [11].

Hydrodynamická čerpadla jsou ekonomicky příznivou alternativou na místo malých turbín v malých vodních elektrárnách. Výrobci axiálních čerpadel nabízejí typizované řady s možnou volbou čerpadlových nebo turbínových oběžných lopatek. Obecně je provozování radiálních čerpadel v turbínovém režimu lepší pro nižší průtoky a větší spády, axiální čerpadla jsou lepší pro větší průtoky.



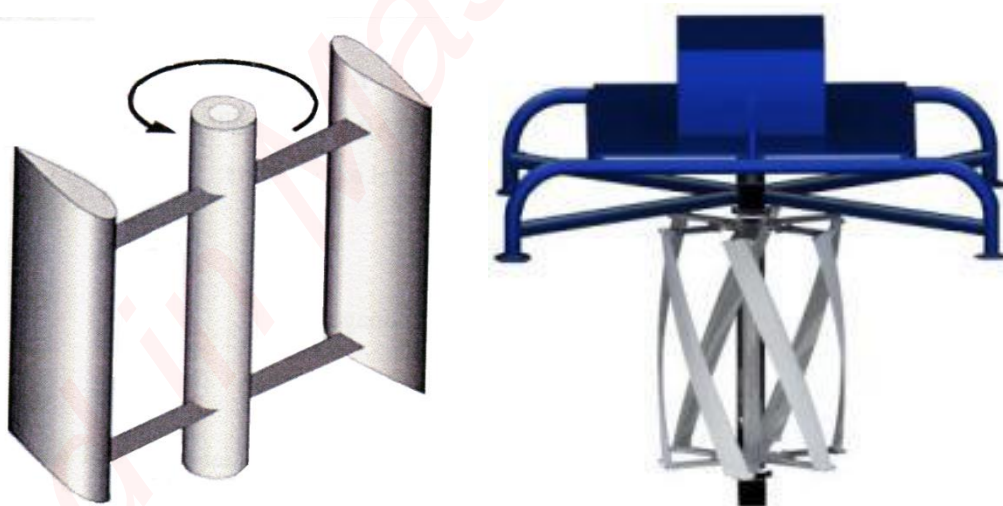
Obr. 20.: Hydrodynamická čerpadla použitá ve funkci vodní turbíny

### 2.3.8 Netradiční řešení vodních motorů

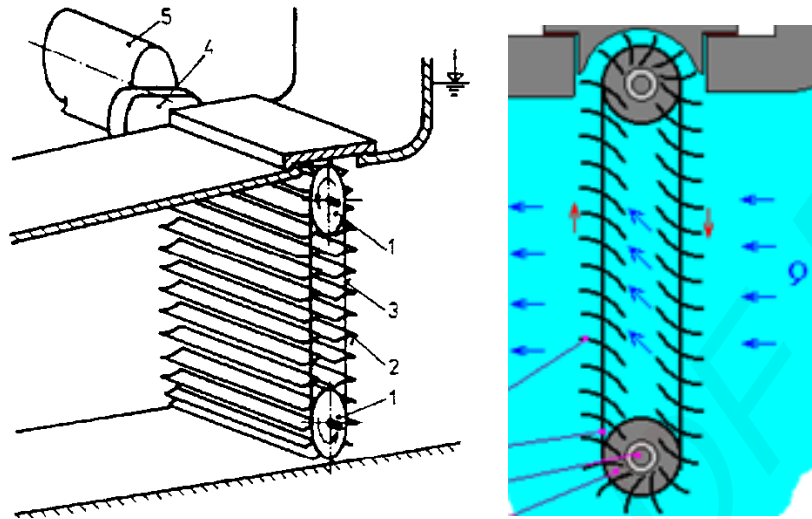
Zde pro úplnost uvádím několik dalších typů vodních motorů, které je možné využít pro získávání elektrické energie v lokalitách s nízkým spádem. Jejich využití není časté, ale mohou být pro dané vodní dílo možnou alternativou.



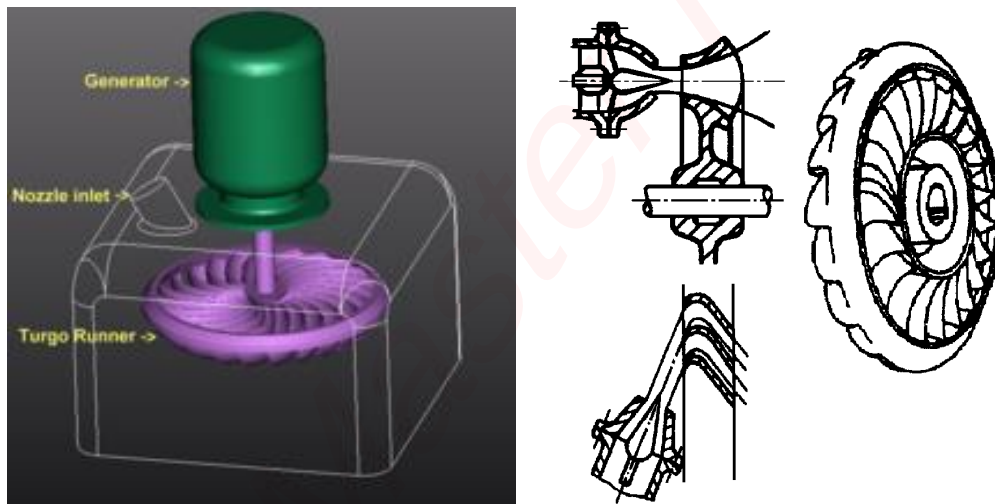
Obr. 21.: Zolötererova turbína – vířivá



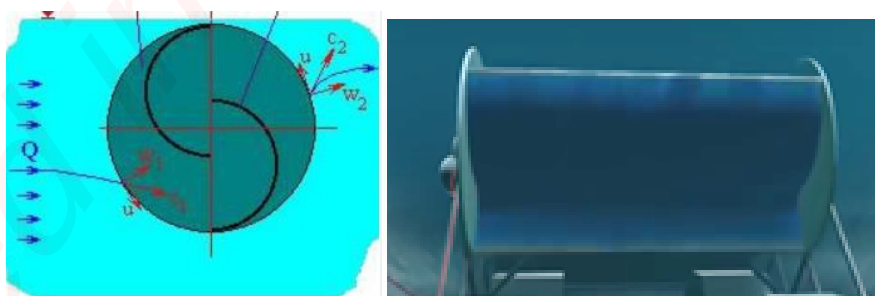
Obr. 22.: Turbína Hydro - Kinetik



Obr. 23.: Schneiderova turbína



Obr. 24.: Turbína Turgo



Obr. 25.: Savoniusova turbína

### 3 Závěr

Hydroenergetika je jednou z nejčistších metod získávání elektrické energie a je proto škoda nevyužívat jí co nejvíce. Současný trend se ubírá směrem k využívání malých zdrojů a nízkých spádů, kterých je v republice velké množství. V této práci je souhrn alespoň několika základních typů vodních motorů, které je možné instalovat do malých vodních elektráren. Vhodnost jednotlivých strojů pro lokality podle průtoků a spádů je zobrazena v oblastním diagramu (příloha 1). Z diagramu též vyplývá, že takřka pro každou lokalitu je možné použít alespoň jeden typ vodního motoru. Investice do obnovy nebo výstavby malých vodních elektráren mají dobu návratnosti v řádu let. Hydroenergetika je jako obnovitelný zdroj energie také dotován ze státních peněz, čímž ještě klesnou náklady na zprovoznění. Do budoucna je potenciál malých vodních zdrojů velmi zajímavý a jeho využívání bude dozajista stoupat.

## Použitá literatura

- [1] MELICHAR, Jan. *Hydraulické a pneumatické stroje, část vodní turbíny*. V Praze: České vysoké učení technické, 2013.
- [2] POLÁK, Martin. *Problematika energetického využití nízkopotenciálních vodních zdrojů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2013.
- [3] KOVOSVIT MAS, a.s., *Archymédova šroubová turbína - produktový katalog*. <https://www.kovosvit.cz/hydroenergetika.html>
- [4] LYONS, M. W. K. *Lab Testing and Modeling of Archimedes Screw Turbines*. Guelph, Ontario, Canada, 2014.
- [5] TŮMA, Jan. *Na Vltavě přibyla unikátní elektrárna s Archymédovými šrouby*. <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/obnovitelne-zdroje/1915-na-vltave-pribyla-unikatni-elektrarna-s-archimedovymi-srouby>. 3. 10. 2016.
- [6] SKOTÁK, A., MIKULÁŠEK, J., ŠTEGNER, P., OBROVSKÝ, J., *Vývoj turbíny Mixer pro rekonstrukce nízkospádových MVE typu Francis*. ČKD Blansko Engineering, a.s. 2014.
- [7] HALUZA, M.; POCHLÝ, F.; RUDOLF, P.: *The swirl turbine*. In: IOP Science - 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, IOP Publishing, Conf. Series: Earth and Environmental Science 15, 2012.
- [8] SCHREIER, M., SCHNEPP, O., *Češi dávají světu unikátní vynález, vírová turbína je v provozu na vodní elektrárně Želina!*. <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/5604.html> 2016.
- [9] SUTIKNO, P., ADAM, I. K., Design, Simulation and Experimental of the Very Low Head Turbine with Minimum Pressure and Free Vortex Criteria, *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS*, 2011 Vol: 11 No: 01.
- [10] COASTAL HYDROPOWER, *Very Low Head (VLH) Turbine*, OWA 11th Annual Power of Water Conference, October 2011.
- [11] BLÁHA, J.; MELICHAR, J.; MOSLER, P.: Příspěvek k použití hydrodynamických čerpadel jako turbín. In: *Energetika 5/2012*. ISSN 0375-8842, s. 1 – 5.

# Přílohy

Příloha 1.: Diagram oblastí použitelnosti jednotlivých vodních strojů, v závislosti na průtoku a spádu

