

Česká zemědělská univerzita v Praze

TECHNICKÁ FAKULTA

Katedra mechaniky a strojnictví



**Využití různých typů vodních turbín v malých vodních
elektrárnách**

bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Ing. Martin Polák, Ph.D.

Autor: Lukáš Pertl

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra mechaniky a strojnictví

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Lukáš Pertl

Technologická zařízení staveb

Název práce

Využití různých typů turbín v malých vodních elektrárnách

Název anglicky

The use of different types of turbines in small hydro power plants

Cíle práce

Na základě literární rešerše zmapovat historický vývoj, současný stav a výhledy ve využívání různých typů turbín v malých vodních elektrárnách. Provést technicko-ekonomické hodnocení vybrané instalace.

Metodika

Zpracovat literární rešerši na dané téma. Popsat a zhodnotit vybranou malou vodní elektrárnu.

Doporučený rozsah práce

40 stran textu včetně obrázků, grafů a tabulek

Doporučené zdroje informací

Bednář, J.: Turbíny – malé vodní elektrárny, Nakladatelství Marcela Bednářová 2013, ISBN 978-80-905437-0-6

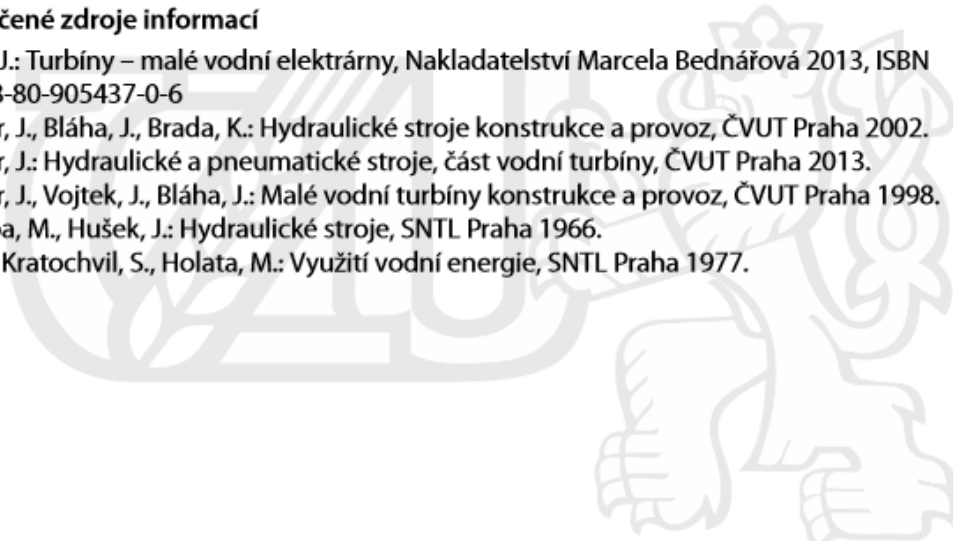
Melichar, J., Bláha, J., Brada, K.: Hydraulické stroje konstrukce a provoz, ČVUT Praha 2002.

Melichar, J.: Hydraulické a pneumatické stroje, část vodní turbíny, ČVUT Praha 2013.

Melichar, J., Vojtek, J., Bláha, J.: Malé vodní turbíny konstrukce a provoz, ČVUT Praha 1998.

Nechleba, M., Hušek, J.: Hydraulické stroje, SNTL Praha 1966.

Štoll, Č., Kratochvíl, S., Holata, M.: Využití vodní energie, SNTL Praha 1977.



Předběžný termín obhajoby

2015/05 (květen)

Vedoucí práce

doc. Ing. Martin Polák, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 18. 2. 2015

doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 2. 4. 2015

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 04. 04. 2015

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci „Využití různých typů turbín v malých vodních elektrárnách“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 4.4.2015

.....

Lukáš Pertl

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Doc. Ing. Martinu Polákovi, Ph.D. za vstřícný přístup, cenné rady, podnětné připomínky a metodické vedení. Dále děkuji panu Jaroslavu Kubešovi za poskytnutí času a informací ke studované problematice MVE Perknov.

Využití různých typů turbín v malých vodních elektrárnách

Souhrn

Bakalářská práce se v úvodu zabývá problematikou energetického využití malých vodních zdrojů. Dále je doplněn historický přehled vývoje vodních děl s poukazem na problematiku použití jednotlivých typů turbín.

Druhá část je zaměřena na popis hydroenergetického řešení zvolené lokality – vodního díla Perknov. Součástí je ověření konstrukčních rozměrů současné turbíny s výpočtem a porovnání výsledků s návrhem jiného typu turbíny.

Závěr je věnován ekonomické rentabilitě provozu malé vodní elektrárny (MVE).

Klíčová slova

malá vodní elektrárna (MVE), vodní dílo (VD), vodní turbína, hydroenergetika, spád, průtok, měrné otáčky, kavitace

Summary

The bachelor thesis starts with the theory of small hydro power plants. It is complemented by a historical overview of waterworks development with reference to the uses of various turbine types.

The second part focuses on the description of the selected location waterwork Perknov of the hydropower project. Specifications of the existing turbine are validated and compared to the specifications of another turbine type.

Finally an economic evaluation and project profitability is calculated.

Keywords

small hydro power, waterwork, water turbine, hydropower, declivity, flow rate, measuring rev, cavitation

Obsah

1.	Úvod	3
1.1	Vodní dílo	3
1.2	Vymezení pojmu MVE	4
1.3	Historický přehled vodních děl, motorů (vodních kol, turbín)	5
2.	Typy vodních motorů	6
2.1	Základní rozdělení	7
2.2	Charakteristiky	7
2.2.1	Spád	8
2.2.2	Eulerova turbínová věta	9
2.2.3	Teorie podobnosti hydraulických strojů (měrné otáčky turbíny)	10
2.2.4	Kavitace	12
3.	Popis turbín používaných pro MVE	13
3.1	Bánkiho turbína	13
3.1.1	Použití Bánkiho turbíny	14
3.2	Francisova turbína	15
3.2.1	Použití Francisovy turbíny	16
3.2.2	Francisova turbína horizontální (s kašnou)	16
3.2.3	Francisova turbína vertikální (s kašnou)	17
3.3	Kaplanova turbína	18
3.3.1	Semi Kaplanova turbína	18
3.3.2	Použití Semi Kaplanovy turbíny	19
4.	MVE Perknov	21
4.1	Lokalita	21
4.1.1	Popis lokality	21
4.1.2	Hydrologické poměry	23

4.1.3	Koncepční řešení MVE.....	23
4.1.4	Manipulace s vodou	27
4.2	Řešení strojní části Francisovy turbíny MVE	27
4.2.1	Hydroenergetické řešení MVE.....	27
4.2.2	Francisova turbína – výpočet hlavních rozměrů	28
4.2.3	Francisova turbína – porovnání výpočtu hlavních rozměrů se skutečností.....	32
4.3	Modifikace strojní části MVE Kaplanovou turbínou.....	33
4.3.1	Hydroenergetické řešení MVE.....	33
4.3.2	Kaplanova turbína – výpočet hlavních rozměrů.....	33
4.4	Porovnání výsledků výpočtu celkového výkonu obou typů turbín	37
5.	Ekonomické zhodnocení	38
5.1	Náklady na realizaci díla	38
5.2	Předpokládané vyrobené množství elektrické energie	39
5.3	Výkupní ceny a zelené bonusy elektřiny pro MVE v roce 2015	39
5.4	Výnos MVE	40
6.	Závěr.....	40
7.	Použitá literatura.....	41
7.1	Knižní publikace.....	41
7.2	Internetové zdroje.....	41
8.	Seznam zkratk	42
9.	Seznam příloh.....	42

1. Úvod

Pro zmapování historického vývoje, současného stavu a výhledů ve využívání různých typů turbín v malých vodních elektrárnách, bude třeba nejdříve vymezit a následně popsat základní terminologii včetně charakteristických rysů vodních děl a vodních motorů (turbín).

1.1 Vodní dílo

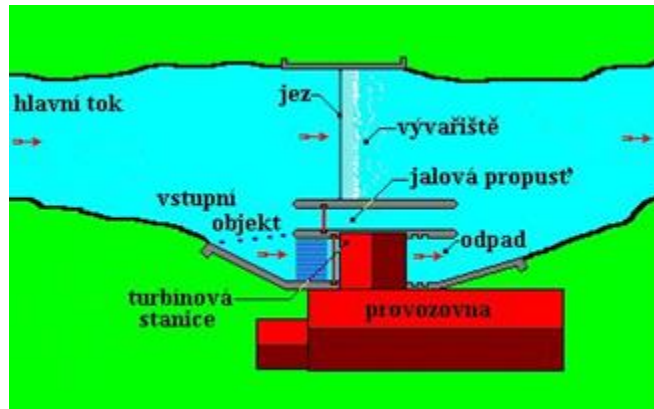
Souhrnem všeho stavebního a strojního zařízení k využití vodní energie na daném toku rozumíme vodní dílo. Z pohledu energetického lze jej posuzovat následovně:

- Dle velikosti instalovaného výkonu viz ČSN 750128 (nově nahrazená ČSN 750120)
 - Velké elektrárny (nad 200 MW)
 - Střední elektrárny (v rozpětí 10 až 200 MW)
 - Malé elektrárny (pod 10 MW)
 - Průmyslové elektrárny (1-10 MW)
 - Mini elektrárny (100 kW-1 MW)
 - Mikro elektrárny (35 kW - 100 kW)
 - Domácí elektrárny (do 35 kW) [1] [8] [9]
- Dle pracovního režimu
 - Průtočné
 - Akumulační (přečerpávací, špičkové) [2]
- Dle využitého spádu viz ČSN 750128 (nově nahrazená ČSN 750120)
 - Nízkotlaké (do 20 m)
 - Středotlaké (20 – 100 m)
 - Vysokotlaké (nad 100 m) [1] [8] [9]
- Dle umístění, stavebního uspořádání a způsobu nakládání s vodou
 - Elektrárny potoční (viz. obr. 1.1) - většinou nedodávají elektrickou energii do rozvodné sítě. Vyrobená energie je používána pro osobní potřebu a obvykle slouží k napájení místních generátorů. MVE potoční jsou provozně nenáročné. [11]



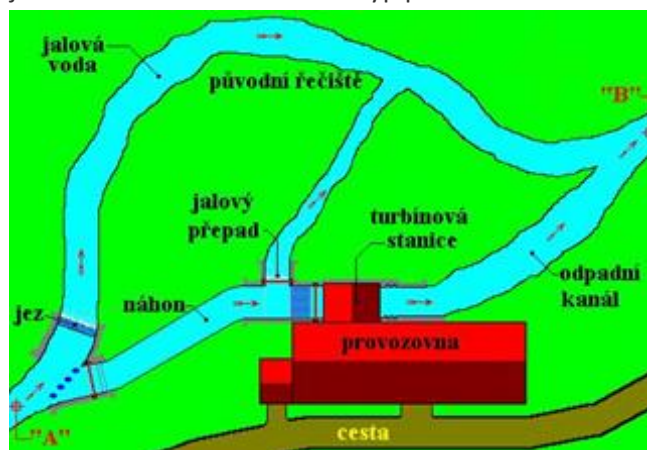
Obr. 1.1 Schéma elektrárny potoční [11]

- Elektrárny jezové (viz. obr. 1.2) - vhodné pro malé spády a velké průtoky. Využívají energii vzniklou vzduťím vody na jezu a z toho plynoucí rozdíl hladin před a za jezem. [11]



Obr. 1.2 Schéma elektrárny jezové [11]

- Elektrárny derivační (viz. obr. 1.3) - využívají rozdíl spádu mezi body "A" a "B", jak vidíme na obrázku. Tento typ používá většina MVE. [11]



Obr. 1.3 Schéma elektrárny derivační [11]

1.2 Vymezení pojmu MVE

Malými vodními elektrárnami rozumíme vodní elektrárny o výkonu menším než 10 MW. Používají se k výrobě elektřiny pro osobní potřebu, průmyslové účely i k dodávkám do rozvodné sítě. Na rozdíl od velkých vodních elektráren nepředstavuje jejich vybudování a provoz výrazný zásah do okolní přírody. Celkově se ve vodních elektrárnách v ČR ročně vyrobí cca 3000 GWh (cca 3 %) elektrické energie. Z toho v malých vodních elektrárnách (MVE) cca 1000 GWh. Přesný počet malých vodních elektráren s výrobou energie do 1MWh byl k 1.1.2013 1451. Tyto údaje vykazuje statistika ERÚ. [11][17]

Klasická MVE se skládá z těchto částí:

- Vzduvací zařízení (přehrady, hráze, jezy) – slouží ke vzduťím vodní hladiny (ke zvětšení spádu) a k usměrnění průtoku do přivaděče.
- Náhon (přivaděč) – přivádí vodu k vodní turbíně.
- Česle – slouží k odstranění mechanických nečistot a zabraňují jejich vniknutí do turbíny.

- Vodní motor (vodní kolo nebo turbína) – slouží k přeměně energie vody na mechanickou energii.
- Generátor – přeměňuje mechanickou energii na elektrickou energii.
- Jalový přepad – odvádí nadbytek průtoku vody, který by přehlcovatel turbínu.
- Odpadní kanál – vrací vodu do původního koryta. [11]

1.3 Historický přehled vodních děl, motorů (vodních kol, turbín)

Níže je uveden strukturovaný historický přehled vodních děl a motorů od starověku až do dnešní doby.

- **600 let př.n.l.** – *Chaldejci – čerpací kola pro zavlažování půdy.*
- **230 let př.n.l.** – Egypt – hnací lžicové kolo (užití věder k čerpání vody).
- **150 let př.n.l.** – Říše římská – čerpání spodní vody pomocí vodních kol.
- **150 let př.n.l.** – Řecko – použití vodních kola s vertikální osou pro vodní mlýny.
- **50 let př.n.l.** – *Strabo (Řecký zeměpisec) – zmínka o existenci vodních mlýnů.*
- **r. 361** – Německo (řeka Mosel) – vystavěny první vodní mlýny.
- **r. 536** – Řím (řeka Tibera) – *první plovoucí vodní mlýn.*
- **r. 718** – Žatec (řeka Ohře) – první vodní mlýn ve střední Evropě (stavitel tesař Halak).
- **r. 955** – Německo (*Wurzen*) – *první vodní mlýn.*
- **od 12.stol.** – Evropa – vodní kolo se stalo běžným motorem.
- **r. 1227** – Labe – provoz prvního vodního mlýnu (plovoucího).
- **r. 1550** – *Toulouse* – *sudové kolo pro mlýn (Francouz Besson).*
- **r. 1738** – *Jozef Karol Hell* – vodní vahadlový stroj (pracoval s potenciální energií vody).
- **r. 1749** – *Jozef Karol Hell (Slovensko)* – *vysokotlaký vodosloupčový stroj.*
- **r. 1750** – *Johann Andreas Segner* – *reakční vodní kolo.*
- **r. 1753** – Leonard Euler – *zdokonalil Segnerovo reakční vodní kolo.*
- **r. 1818** – Německo – *první celoželezné vodní kolo.*
- **r. 1824-6** – Prof. Claude Burdin – *první přetlaková turbína (vývoj turbíny).*
- **r. 1827** – *Burdinova turbína* – *první uvedení do provozu.*
- **r. 1827-1833** – Benoit Fourneryon – *nový typ odstředivé přetlakové turbíny.*
- **r. 1834** – Fourneryon – *stavba turbíny pro francouzské železářny.*
- **r. 1837** – Henschl (Německý technik) – *savkou doplněna Fourneryonova turbína.*
- **r. 1844** – Redtenbacher – *vynález stupňovité turbíny.*
- **r. 1844** – Ing. Zuppinger (Švýcarsko) – *první rovnotlaká turbína s vnějším vstřikem.*
- **r. 1848** – Schwamkrug (*hornický technik*) – *první rovnotlaká turbína s vnitřním vstřikem.*
- **r. 1847-49** – Ing. James Bicheno Francis – *vývoj univerzálně použitelné přetlakové turbíny (vertikální i horizontální).*
- **od r.1860** – Přejít z převážně dřevěných převodů k přenosu hnací síly na *celoželezné konstrukce s transmisními hřídeli a koly s plochými řemeny (z hovězí kůže).*
- **r. 1863** – Girard – *vynález rovnotlaké turbíny (Girardova turbína).*
- **r. 1870** – Evropa – *výrazné rozšíření Francisovy turbíny.*
- **r. 1877** – Lester Allen Pelton – *úvahy o přímotlaké turbíně (lžicovité lopatky).*
- **r. 1878** – Prof. R. Fink – *Francisova turbína doplněna o natáčivé rozváděcí lopatky.*
- **r. 1886** – Pfarr – *pro velké vodní spády doplněna Francisova turbína pevným rozváděčem*

a spirálovou skříní.

- r. 1900 – A.G. Michael – bubnová turbína později zdokonalená prof. Bánkem.
- r. 1912 – Prof. Ing. Dr. h. c. Viktor Kaplan – *vývoj vrtulové turbíny (Brno).*
- r. 1913 – Prof. Ing. Dr. h. c. Viktor Kaplan – *patentování systému turbíny s natáčivými oběžnými lopatkami.*
- r. 1918 – Bánkiho turbína – *matematické řešení.*
- r. 1918 – *Slévárna Ignace Storka (Brno) – výroba první Kaplanovy turbíny.*
- r. 1919 – *Ulm (jižně od Vídně) – uvedení do provozu první Kaplanovy turbíny.*
- r. 1919 – Prof. Banki (Budapešť) – *provoz první rovnotlaké bubnové turbíny.*
- r. 1920 – E. Crewdson – *pro velké spády stavba rovnotlaké turbíny (Turgo).*
- r. 1921 – *Poděbrady – první Kaplanova turbína v Československu.*
- r. 1938 – *Použití Kaplanovy turbíny pro vyšší spád (38m).*
- r. 1950 – *Deriázova turbína (diagonální) – úprava Kaplanovy turbíny.*
- r. 1951 – *Ztráta soukromého vlastnictví a likvidace malých vodních děl (vodní mlýny, ...).*
- r. 1953 – *Použití Kaplanovy turbíny pro vyšší spád (56m).*
- r. 1958 – *Použití Kaplanovy turbíny pro vyšší spád (71m). [12]*

2. Typy vodních motorů

Vodní motor je stroj sloužící k přeměně vodní energie na mechanickou práci. Způsobů, jak to realizovat je několik:

- Přímou využití potenciální (polohovou) energii vody na konkrétním spádu.
- Přeměnit potenciální energii na kinetickou a případně tlakovou a teprve tu následně přeměnit na mechanickou práci. [12]

Prvního způsobu využívají vodní kola, jako jedny z nejstarších strojů, které člověk začal pro pohon a později výrobu energie využívat. Výkon vodních kol je více závislý na průtoku a méně na spádu. Hlavní nevýhodou je namrzání v zimě, zejména jsou-li po část dne nebo přes noc zastavena. [12]

Druhý způsob je využíván v přetlakových turbínách. Jsou podobně jako vodní kola rotačními vodními motory, v nichž dochází k přeměně energie vody v mechanickou energii rotujícího hřídele. Mohou využívat jak kinetickou, tak i tlakovou energii vody. V současné době MVE v České republice převážně používají v různých obměnách a modifikacích tři základní typy konstrukcí vodních turbín: Bánkiho, Francisovu a Kaplanovu. [12]

Nelze jednoznačně prohlásit, že vodní kolo je horší než turbína. Záleží jen a pouze na konkrétní lokalitě, způsobu provozu a druhu stroje, který má být vodním motorem poháněn. [12]

Vodní motor je zařízení s dlouhou životností. Víc než jeho morální zastarání a nejvyšší dosažitelná účinnost ovlivňuje jeho úspěšný provoz průtoková přizpůsobivost, způsob regulace, snadná opravitelnost a nízké provozní náklady. [12]

Ne vždy se drahý stroj plně využije. Na podřadných potocích, kde průtok kolísá mezi -80% až +500%, je často provoz mimo vrchol účinnosti. Když se k tomu připočítá listí, splašky, plastové odpady, větvičky, písek, kamínky, bláto a dlouhé čekání na drahé náhradní díly i nutné odstávky na údržbu je celková bilance ještě horší. [12]

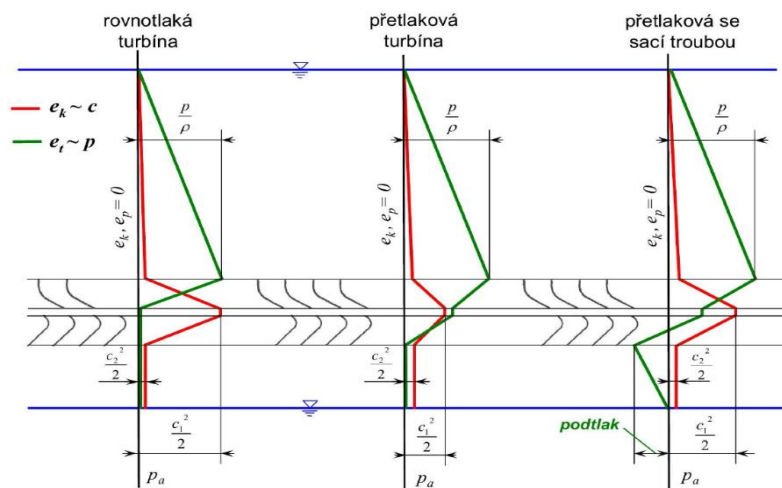
Totéž platí pro přebujelou automatizaci. Není moc platná dokonalá automatika, která udrží spád na milimetr přesně. Účinnost vodního motoru se sice udrží o nějaké procento výš, avšak mnohdy je lepší ožet pár litrů vody, které krátkodobě přetečou přes jalový přepad a použít pomalou, spolehlivou, jednoduchou regulaci s dlouhou životností a pracující s malými provozními náklady. [12]

2.1 Základní rozdělení

Dle přítoku vody na oběžné kolo lze rozdělit turbíny se vstupem: radiálním, axiálním, radiaxiálním, diagonálním, tangenciálním se šikmým vstupem a s dvojnásobným vstupem. Podle uspořádání se vodní turbíny dělí na horizontální, vertikální nebo šikmé. Podle způsobu přenosu energie vody se rozlišují turbíny na rovnotlaké a přetlakové. [3]

U rovnotlakých turbín se celá hodnota tlakové energie vody mění v přívodním zařízení (rozdávěcí lopatky) na kinetickou energii. Tlak na vstupu do oběžného kola je rovný tlaku na výstupu. Proud vody nevyplňuje zcela průtočné kanály oběžného kola, tedy jsou částečně zaplněné vzduchem (částečný-parciální ostřík), čímž je zaručena rovnost tlaků. Pro lepší představu je průběh tlaků a rychlostí rovnotlaké turbíny znázorněn na obr. 2.1.1. [1]

U přetlakových turbín je část tlakové energie v zařízení pro přívod vody k oběžnému kolu přeměněna na kinetickou energii a zbývající část tlakové energie se mění v kinetickou energii při průchodu vody oběžným kolem. Proud vody plně vyplňuje průtočné kanály oběžného kola (úplný-totální ostřík), a tím vzniká nerovnost tlaků, která bývá navýšena použitím savky ve výstupním potrubí. Přehled průběhu tlaků a rychlostí u rovnotlakých a přetlakových turbín je uveden na obr. 2.1.1. [1]



Obr. 2.1.1 Průběh tlaků a rychlostí turbín [2]

Legenda:

$e_k \sim c$ – kinetická (rychlostní) energie

$e_t \sim p$ – potenciální (tlaková) energie

P – tlak

ρ – hustota vody

c_1 – rychlost vody na vstupu do oběžného kola

c_2 – rychlost vody na výstupu z oběžného kola

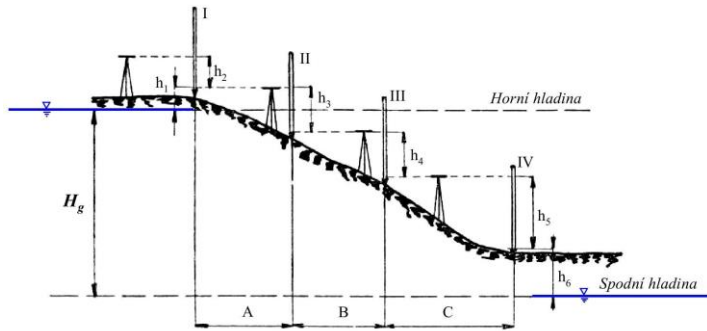
2.2 Charakteristiky

Tato kapitola je zaměřena na určení základních návrhových charakteristik, které jsou nezbytné pro určení typu turbíny a zjištění hrubého hydrologického potenciálu vodního díla. Dále je vysvětlen pojem kavitace a její nežádoucí vliv na funkci turbín.

2.2.1 Spád

- Geodetický spád

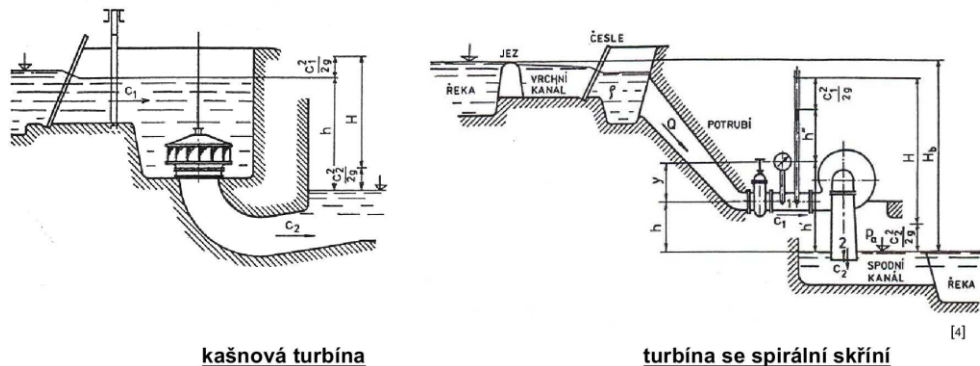
Jeden ze způsobů určení geodetického spádu je nivelací, kde pomocí nivelačního přístroje a měřící latě měříme dílčí výšky h_1 až h_5 jak je uvedeno na obr. 2.2.1, které algebraicky sečteme a z nich určíme rozdíl hladin. Další možností je určení spádu vážní latí, což je výpočetně obdobné jako při nivelaci. [2]



Obr. 2.2.1 Schéma určení geodetického spádu měřený nivelací [2]

- Užitiný spád

Je poměr mezi měrnou energií turbíny a gravitační konstantou. Pro názornou představu je uveden obr. 2.2.2, vzorec 2.1 pro kašnovou turbínu a vzorec 2.2 pro turbínu se spirální skříní. [2]



Obr. 2.2.2 Užitečný spád a ztrátová výška [2]

Měrná energie kašnové turbíny:

$$e_T = g \cdot h + \frac{1}{2} (c_1^2 - c_2^2) \quad (2.1)$$

Užitný spád:

$$H = \frac{e_T}{g}$$

kde g je gravitační konstanta

h je geodetický spád

c_1 je rychlost vody na vstupu do oběžného kola

c_2 je rychlost vody na výstupu ze sací trouby

p_1 je tlak vody na vstupu přívaděcího potrubí

p_2 je tlak vody na výstupu přívaděcího potrubí [2]

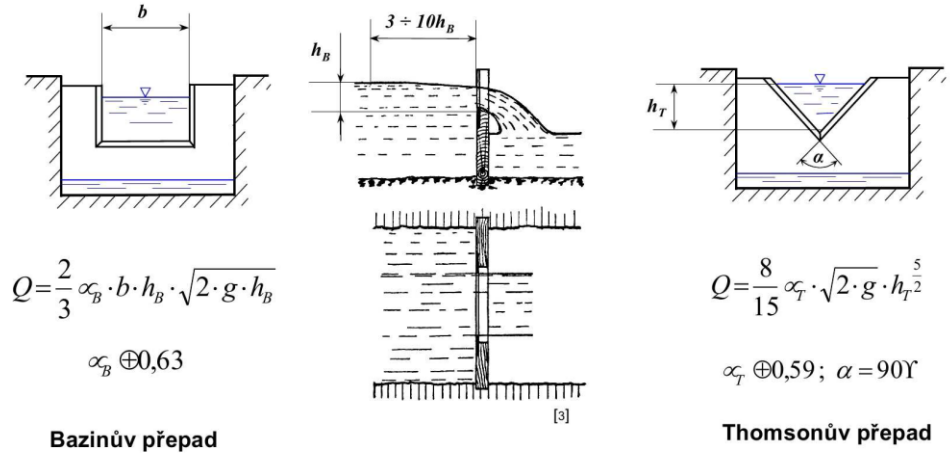
Měrná energie turbíny se spirální skříní:

$$e_T = \frac{(p_1 - p_2)}{\rho} + g \cdot h + \frac{1}{2} (c_1^2 - c_2^2) \quad (2.2)$$

- Průtok a jeho měření

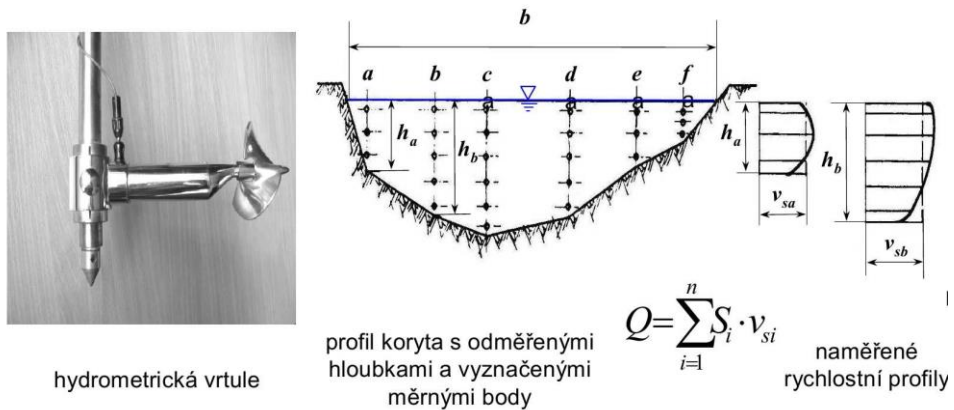
Průtok lze měřit dvěma způsoby:

- Měření přepadem, kde rozlišujeme tvar přepadové hrany viz. příklad na obr. 2.2.3 Thomsovův přepad a Bazinův přepad. [2]



Obr. 2.2.3 Schéma měření průtoku přepadem [2]

- Měření hydrometrickou vrtulí, kde se měří příčný a rychlostní profil koryta viz schéma na obr. 2.2.4 [2]



Obr. 2.2.4 Schéma měření průtoků hydrometrickou vrtulí [2]

Výsledky průtoků jsou zaneseny do tabulky denních průtoků (viz. Tabulka 4.2 o hydrologických poměrech MVE Perknov), ze které vycházíme při návrhu hlavních rozměrů turbíny. [2]

2.2.2 Eulerova turbínová věta

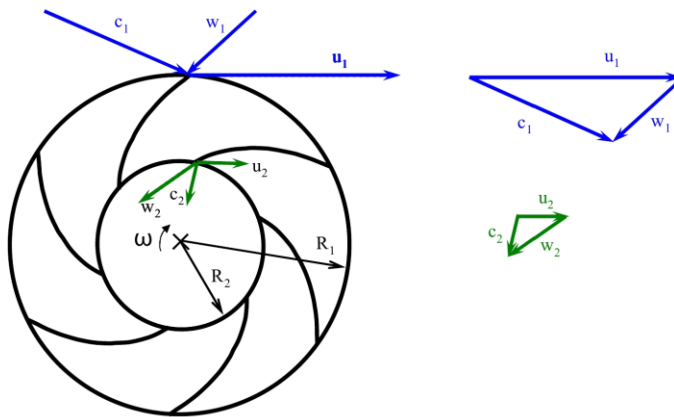
Eulerova turbínová věta udává souvislost mezi výkonem a rychlostmi kapaliny v oběžném kole. Vychází z obr 2.2.5, kde je schematicky znázorněn rotor radiální přetlakové turbíny. [1]

$$P = \rho \cdot Q (\vec{u}_1 \cdot \vec{c}_1 - \vec{u}_2 \cdot \vec{c}_2)$$

kde ρ je hustota vody

Q je průtok

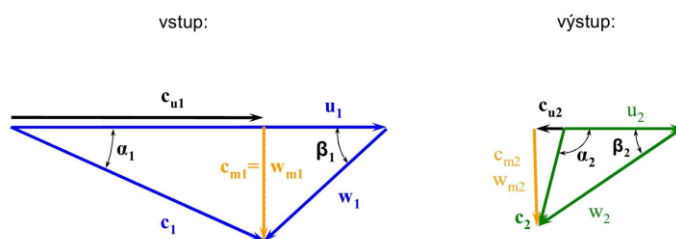
- \vec{u}_1 je unášivá rychlost na vstupu do oběžného kola
- \vec{c}_1 je absolutní rychlost na vstupu do oběžného kola
- \vec{u}_2 je unášivá rychlost na výstupu z oběžného kola
- \vec{c}_2 je absolutní rychlost na výstupu z oběžného kola [1]



- \mathbf{c} ... absolutní rychlost (voda vůči okolí, pozorovateli)
- \mathbf{u} ... unášivá rychlost (oběžné kolo vůči okolí, pozorovateli)
- \mathbf{w} ... relativní rychlost (voda vůči lopatce, pozorovatel „sedí“ na lopatce)

Obr. 2.2.5 Schéma rotoru radiální přetlakové turbíny [2]

Oběžné kolo se otáčí úhlovou rychlostí ω a je na vnějším obvodu rovnoměrně ostříkáváno. Kapalina vstupuje do oběžného kola absolutní rychlostí \vec{c}_1 . Vektor \vec{c}_1 tedy svírá s tečnou k oběžnému kolu (a tedy i s unášivou rychlostí \vec{u}_1) ostrý úhel α_1 . Proud vody je odkloněn lopatkou, jejíž náběžný úhel je β_1 . Relativní rychlost kapaliny vzhledem k oběžnému kolu, kterou označíme \vec{w}_1 , bude mít směr, daný úhlem β_1 . Nositelky rychlostí \vec{c}_1 , \vec{u}_1 , \vec{w}_1 tvoří trojúhelník, který je znázorněn na obr. 2.2.6. [1]

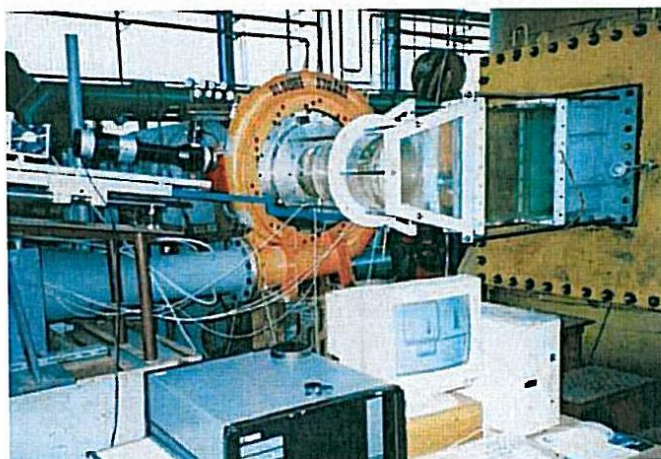


- α ... úhel proudu vody
- β ... úhel sklonu lopatky
- c_u ... průmět absolutní rychlosti do rychlosti unášivé
- c_m ... průmět absolutní rychlosti do rychlosti meridiánové
- w_m ... průmět relativní rychlosti do rychlosti meridiánové

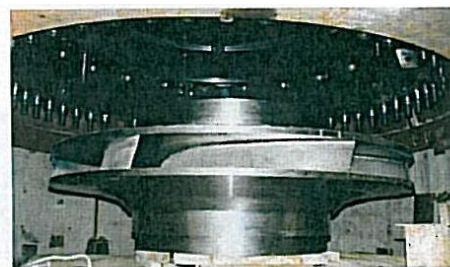
Obr. 2.2.6 Schéma rychlostních trojúhelníků [2]

2.2.3 Teorie podobnosti hydraulických strojů (měrné otáčky turbíny)

Teorie podobnosti hydraulických strojů je využívána ve zkušebnictví pro posouzení modelu a skutečného díla. Cílem je najít vazby mezi geometrií rychlostních trojúhelníků a veličinami určující vodní dílo (spád „H“ a průtok „Q“). Tyto vazby jsou obsaženy v měrných otáčkách stroje. [2]



Modelová turbína PVE Dlouhé Stráně
v laboratoři



Skutečné oběžné kolo (\varnothing 4 540 mm)



Skutečná spirály turbíny

[15]

Obr. 2.2.7 Model a skutečnost [2]

Měrné otáčky můžeme určovat dvojím způsobem a to buď podle průtoku nebo podle výkonu. První uvedené vychází z geometrické podobnosti, která při spádu $h = 1\text{m}$ zpracovává průtok $Q = 1\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. V druhém případě při totožném spádu je získán jednotkový výkon 1 kW . [1]

Měrné otáčky podle průtoku:

$$N_q = N \cdot \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{h^{\frac{3}{4}}}$$

kde N jsou otáčky turbíny

Q je průtok

h je užitný spád [1]

Měrné otáčky podle výkonu:

$$N_{SC} = N \cdot \frac{P^{\frac{1}{2}}}{h^{\frac{3}{4}}}$$

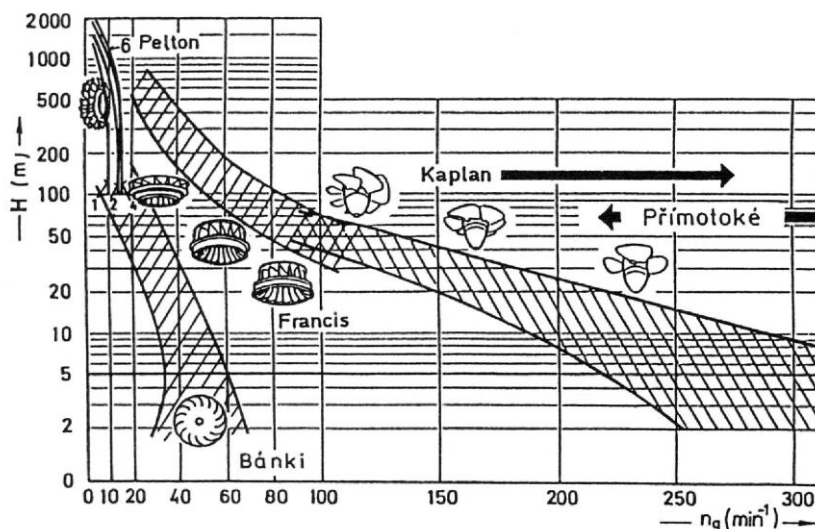
kde N jsou otáčky turbíny

P je výkon

h je užitný spád [1]

V dnešní době se užívají výhradně měrné otáčky počítané podle průtoku, neboť u otáček počítaných dle výkonu rozdíl účinností mezi modelem a dílem se liší tím více, čím více se liší výkon obou strojů. [1]

Použití měrných otáček určující rychloběžnost turbíny je využíván k volbě typu turbíny viz. diagram na obr. 2.2.8.



Obr. 2.2.8 Diagram oblasti použití různých typů turbín dle spádu a měrných otáček [1]

2.2.4 Kavitace

Je složitý, nežádoucí jev vzniku a zániku dutin v proudící kapalině, který napadá a rozrušuje materiál oběžného kola turbíny a způsobuje hluk včetně vibrací celého zařízení. S tímto jevem musíme při návrhu turbín počítat. [13]

Fyzikální podstata kavitace:

- Při snížení tlaku v kapalině až na tzv. „tlak nasycených par“ (odpovídající dané teplotě kapaliny) dochází k odpařování kapaliny za vzniku malých bublinek vyplněných vodní parou.
- Při vstupu bublinek do oblasti vyššího tlaku dochází ke kondenzaci vodní páry a k následnému vzniku dutin – tzv. „kavitačních dutin“ (vyplněných vzduchem nebo obecně plynem).
- Do dutiny pak vniká okolní kapalina velkou rychlostí a po zaplnění dutiny dochází k velkému rázu.
- Pokud k tomuto rázu dojde na povrchu pevného materiálu nebo v jeho bezprostřední blízkosti, dochází při dlouhodobém působení k mechanickému rozrušení tohoto materiálu. [13]

Kavitace (další okolnosti vzniku):

- Na vznik kavitace mají největší vliv nerozpuštěné plyny a pevné částice, které se s danou kapalinou špatně smáčejí.
- Nestejnorodá místa v kapalině narušují tahovou pevnost kapaliny a tvoří zárodky budoucí kavitace neboli tzv. „kavitační jádra.“
- Mezi molekulárními vrstvami kapaliny působí značné síly, k jejichž překonání je potřeba dosáhnout určitého napětí (tzn. kapalina vykazuje určitou „pevnost v tahu“).

- „tahová pevnost“ vody je závislá na teplotě a dosahuje svého maxima přibližně při teplotě 10 °C.
- U turbín vzniká kavitace převážně v důsledku odtržení proudu kapaliny od obtékaného povrchu. [13]

Důsledky kavitace:

- Mechanické rozrušení oběžného kola, savky (difuzoru).
- Snížení průtoku.
- Snížení celkové účinnosti.
- Zvyšování hluku.
- Zvyšování vibrací... [13]

3. Popis turbín používaných pro MVE

V následujícím textu budou popsány tři základní typy vodních turbín nejčastěji používaných pro malé vodní elektrárny v České republice a přiblíženy jejich základní rysy.

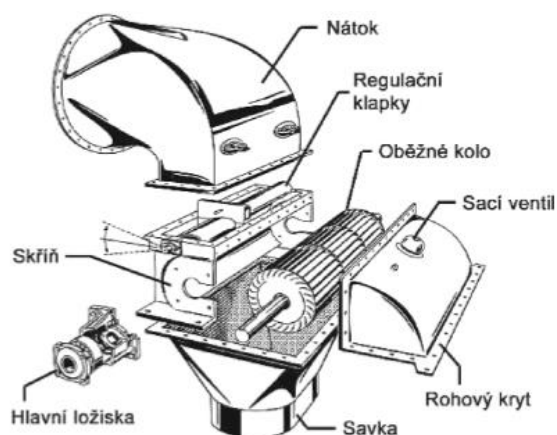
3.1 Bánkiho turbína

Teoreticky vynalezena australským inženýrem A.G.M. Mitchelem v r.1903, pro praktické použití ji dopracoval maďarský profesor Donát Banki v r.1918. Její další vývoj je spojen zejména s firmami Ossberg, Cink a ČKD Turbo Technics s.r.o. [12] [1]

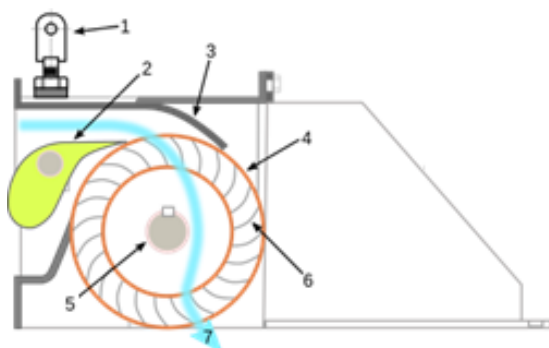
Bánkiho turbína je jednoduchá rovnotlaká vodní turbína a zvláštností je, že lopatky oběžného kola jsou obtékány ve dvou směrech. Konstrukční jednoduchost turbíny, kterou můžeme vidět na obr. 3.1.1 je oblíbena u malých vodních elektráren, kde by konstrukce dokonalejších (a tím i dražších) typů turbín nebyla ekonomická. I amatérsky je zhotovitelná s dobrou účinností. Energetická účinnost Bánkiho turbíny dosahuje 70–85 %. [1]

Typově se jedná o příčně dvojnásobně protékanou turbínu s parciálním ostřikem, která na prvním dostředivém průtoku pracuje přetlakově nebo mezně, druhý odstředivý průtok je pouze rovnotlaký. [12]

Oběžné kolo Bánkiho turbíny je tvořeno dvěma kruhovými deskami tvořícími čela rotoru, mezi nimiž jsou jednoduché cylindrické lopatky. Kolo je uloženo ve skříně, kde z jedné strany do ní přitéká usměrněný proud vody, vtéká dovnitř kola a opět přes lopatky vytéká na druhé straně skříně ven (viz. obr. 3.1.2). Při každém průtoku lopatkami odevzdá část své energie. [12] [1]



Obr. 3.1.1 Schématické znázornění Bánkiho turbíny [2]



Legenda:

- 1 – vzduchový ventil
- 2 – regulační klapky
- 3 – skříň
- 4 – oběžné kolo
- 5 – hřídel
- 6 – lopatky oběžného kola
- 7 – proud vody

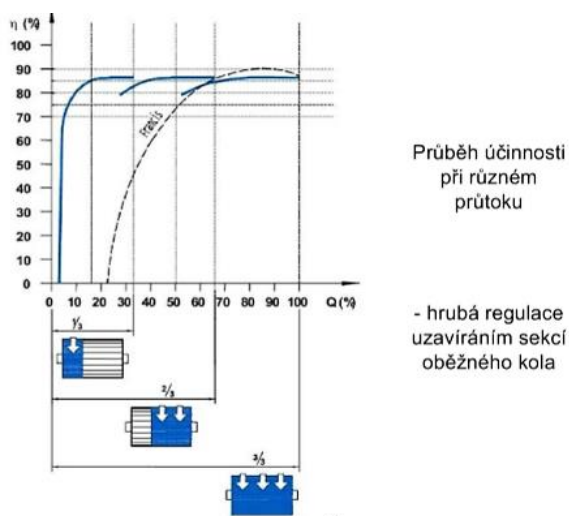
Obr. 3.1.2 Schématické znázornění Bánkiho turbíny s horizontálním přítokem [14]

3.1.1 Použití Bánkiho turbíny

Bánkiho turbína má velmi široké využití. Vyhoví zejména na malých vodních tocích. Přednosti jejího použití jsou shrnuty v následujících bodech:

- Charakteristika Bánkiho turbíny vykazuje dobrou účinnost v rozsahu od 30 do 100% plnění.
- Je velmi jednoduchá na výpočet a výrobně snadno realizovatelná i v amatérských podmínkách.
- I při drobných nepřesnostech dává zaručený výsledek.
- Nevyžaduje použití žádných speciálních materiálů, běžně vyhoví i obyčejný plech.
- Je snadno a rychle regulovatelná.
- Mimo uzavírací klapku je tato turbína podstatně méně citlivá na nečistoty, než turbíny s dostředivým průtokem.
- Nemí náchylná ke kavitaci.
- Ložiska jsou mimo vodu, takže je možno pracovat i s pitnou vodou bez nebezpečí jejího znečištění.
- Vhodnou volbou šířky kola nebo dělením do více sekcí ji lze téměř libovolně přizpůsobit hydrologickým podmínkám lokality. [12]

Bude-li pracovat turbína na velmi proměnlivém toku, je vhodné její oběžné kolo rozdělit na dvě různě dlouhé sekce. Při pohonu jednoho generátoru je obvyklé rozdělení v poměru $1/3$ a $2/3$. Podmínkou je, aby délka větší sekce vyhovovala součiniteli poměru délky k průměru kola pro daný spád. Každá sekce má svou samostatně ovládanou klapku. Při plném průtoku pracují obě půlky turbíny současně. Jakmile vody ubývá, přivírá se nejprve úzká klapka tak dlouho, až je malá sekce zcela uzavřena a pracuje pouze velká. K tomu dojde při 66% jmenovitého průtoku. Při stále klesajícím průtoku se začne zavírat i širší sekce. Jakmile dojde k jejímu uzavření asi na polovinu, zavře se úplně a současně se zcela otevře malá sekce. To se odehraje při poklesu průtoku na 33% jeho jmenovité hodnoty. Veškerý zbývající průtok převezme úzké kolo turbíny, aby široké při uzavření klapky nezačalo pracovat s horší účinností. Malou sekci je možno stále uzavírat až do hodnoty cca 16% jmenovitého průtoku turbínou. Při tomto stavu poklesne účinnost turbíny tolik, že je lépe vodu akumulovat a pracovat v cyklickém režimu. Pro lepší představu regulace je uveden graf na obr. 3.1.3. [12]



Obr. 3.1.3 Graf průběhu účinnosti při různém průtoku a hrubá regulace uzavírání sekcí oběžného kola [2]

3.2 Francisova turbína

V roce 1826 Benoit Fourneyron vyvinul vysoce efektivní vodní turbínu (80%), kde voda vtékala na oběžné kolo tangenciálně. Jean-Victor Poncelet vyvinul v roce 1820 turbínu na podobném principu. V roce 1838 S. B. Howd získal v USA patent pro další turbínu tohoto typu. [15]

V roce 1848 James B. Francis vylepšil tyto předchozí turbíny a podařilo se mu dosáhnout celkově 90% účinnosti. Pomocí vědeckých postupů a sady testů a měření vytvořil maximálně efektivní turbínu. Jeho metody výpočtů a měření navíc značně pozvedly technologii návrhu a stavby turbín. Pomocí jeho analytických metod lze navrhnout maximálně efektivní turbínu, která bude přesně odpovídat požadavkům na konkrétní zařízení. [15]

Francisova turbína je přetlaková turbína, což znamená, že pracovní kapalina během své cesty strojem mění tlak a přitom odevzdává svoji energii. Oběžné kolo turbíny se nachází mezi vysokotlakým přívodem a nízkotlakou savkou většinou v patě přehrady. [15]

Vstup vody do turbíny je potrubím ve tvaru spirály nebo z kašny u nízkých spádů a starších řešení. Pomocí rozváděcího kola je voda tangenciálně směřována na oběžné kolo. Lopatky rozváděcího kola bývají konstruovány jako stavitelné, jejichž pootáčením lze korigovat nepříznivý vliv kolísání

vodního průtoku. Z oběžného kola vystupuje voda axiálně, tj. ve směru osy otáčejícího se hřídele s turbínou. [15]

3.2.1 Použití Francisovy turbíny

Francisovy turbíny se používají v energetice pro střední stabilní průtoky a střední spády. Historicky jsou používány i pro malé spády a průtoky, neb Kaplanova turbína nebyla ještě ve dvacátých a třicátých letech minulého století dostatečně ověřena. [15]

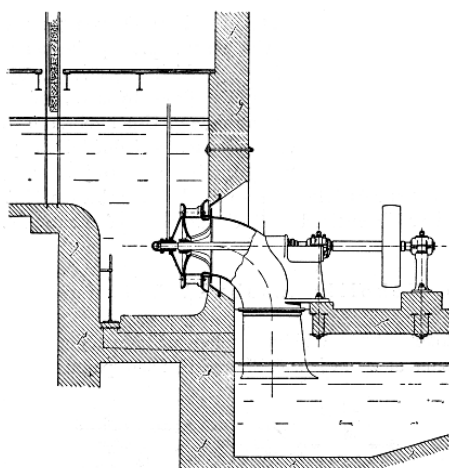
V této studii nutno i připomenout, že Francisovy turbíny jsou dnes výhodné zejména u přečerpávacích elektráren, kde lze turbínu zapojit jako čerpadlo. Například vodní elektrárna Dlouhé Stráně používá dvě Francisovy turbíny, které jsou největší reverzní turbíny v Evropě, každá o výkonu 325 MW. Z hlediska použití v malých vodních elektrárnách vzniká množství konstrukčně stavebních provedení:

- Dle přívodu vody k oběžnému kolu (spirální skříní, kašnou).
- Uložení hřídele (vertikální a horizontální).
- Druhu savky (mokrá, suchá). [15]

Některá řešení budou popsána dále.

3.2.2 Francisova turbína horizontální (s kašnou)

Horizontální kašnová Francisova turbína (viz. schéma na obr. 3.2.1) patří k nejrozšířenějším přetlakovým vodním motorům v minulosti. Osazovala se jí většinou derivační vodní díla s otevřeným přivaděčem nebo tlakovým přivaděčem, avšak s otevřenou kašnou. Vyráběly se v typizovaných výrobních řadách, odstupňované podle průměru oběžného kola. Výrobní řady byly zvoleny tak, že na každý spád a průtok se našla vhodná turbína nebo kombinace dvou různě velikých turbín. Používaly se nejčastěji jako hlavní nebo doplňkový přímý mechanický pohon mlýnů, pil a drobných živností. [12]



Obr. 3.2.1 Horizontální kašnová Francisova turbína [4]

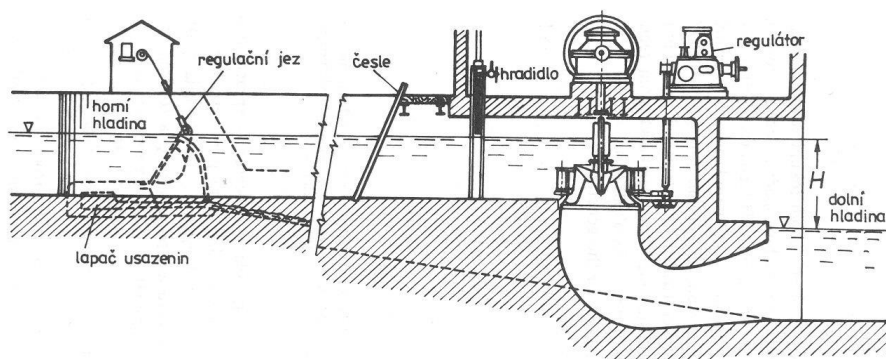
Toto technické uspořádání se používalo na spádech od 2 do 8 metrů při malých a středních průtocích (přibližně od 100 do 2000 ltr./sec.) Jedním z hlavních rozdílů mezi horizontálně a vertikálně uloženou turbínou je ten, že u vertikálně uložené turbíny vychází hřídel z turbíny přímo do prostoru

strojovny a tím je výrazně zjednodušen převod. Často se vystačí jen s řemenovým převodem. Většinou jsou tyto turbíny tzv. normáloběžné, pouze větší turbíny na malé spády, případně turbíny přímo spojené s generátorem mohou být rychloběžnější. [12]

3.2.3 Francisova turbína vertikální (s kašnou)

Vertikální kašnová Francisova turbína (viz. schéma na obr. 3.2.2) byla hojně rozšířeným přetlakovým vodním motorem v minulosti. Osazovala se jí většinou vodní díla jezová nebo vodní díla derivační s otevřeným přivaděčem v nížinách na větších řekách. Používala se nejčastěji jako hlavní mechanický pohon větších mlýnů, městských elektráren a průmyslových závodů. Pokud se tyto stroje do dnešních dnů zachovaly, jsou po rekonstrukci většinou provozovány jako MVE v řádu desítek až stovek kilowattů. [12]

Toto technické uspořádání se používá na spádech od 1,5 metru při středních a velkých průtocích (přibližně od 600 do 8000 ltr./sec.) Na menších spádech za ozubeným převodem následuje ještě druhý převod řemenový. U moderních rekonstrukcí se někdy vystačí jen se samotným řemenovým převodem na vertikálně postavený pomaloběžný generátor. Menší a starší turbíny jsou konstruovány s oběžným kolem tzv. normáloběžným, ale valná část strojů má oběžné kolo rychloběžné. [12]

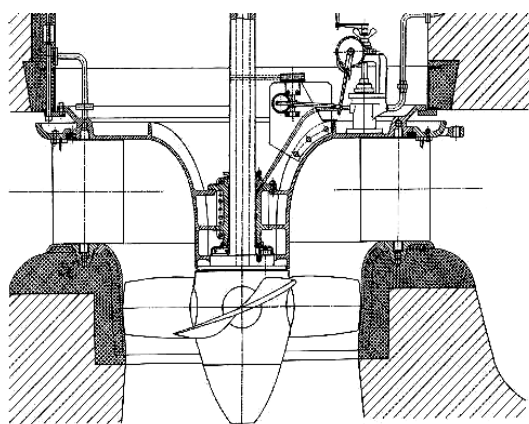


Obr. 3.2.2 Vertikální kašnová Francisova turbína [5]

Vlastní turbína je umístěna na dně kašny, která je zaplněna vodou. Její hřídlo vede svisle vzhůru do strojovny, která je dostatečně vysoko nad spodní vodou, aby nehrozilo její zaplavení. Voda vniká z kašny do regulovatelných rozváděcích lopatek po celém obvodu turbíny. Při průtoku rozváděcími lopatkami získává kinetickou energii a směr potřebný pro vstup do oběžného kola. V zakřivených mezilopátkových kanálech oběžného kola voda mění směr i rychlost a tím předává svoji energii. Po výtoku z oběžného kola se voda odvádí do odpadního kanálu. Protože je turbína z důvodů snadné údržby a oprav nad spodní hladinou, je voda odváděna savkou. Nepracuje-li turbína při jmenovitém průtoku (a to je vzhledem k našim hydrologickým poměrům často), dochází za oběžným kolem k rotaci vodního sloupce v savce, která má kruhový průřez, případně je-li zahnutá má mírně oválný průřez. Voda při průchodu kuželovitě se rozšiřující savkou snižuje rychlost, kde vytváří podtlak přenášející se na odtokovou stranu oběžného kola. Díky sacímu efektu využívá turbína celý spád, ač je oběžné kolo nad hladinou vývařiště. [12]

3.3 Kaplanova turbína

Vynálezcem této turbíny byl profesor brněnské techniky Viktor Kaplan, který jako první vzal při teoretickém návrhu turbíny v úvahu vazkost vody. V letech 1910 – 1912 proto navrhl na základě svých úvah nový tvar oběžného kola. První prototyp Kaplanovy turbíny byl vyroben brněnskou firmou Ignác Storek v roce 1919. Po zkouškách se ukázalo, že turbína dosahuje vynikající mechanické účinnosti až 86%. Další prototyp byl úspěšně vyzkoušen v poděbradské elektrárně. Ale k uplatnění vynálezu v technické praxi uběhla ještě řada let. Důvodem počátečních potíží byla především kavitace, která byla v této době ještě málo prozkoumána. Jeho přátelé ve výrobních závodech, kteří dobře chápali dosah vynálezu, mu však pomohli počáteční obtíže překonat a na úkor toho se tato turbína stala nejvýznamnějším typem turbíny užívaným ve velkých vodních elektrárnách po celém světě. Začátkem jejího úspěchu byla úspěšná montáž tehdy největší turbíny světa ve švédském LillaEdet v roce 1925. [1] [16]

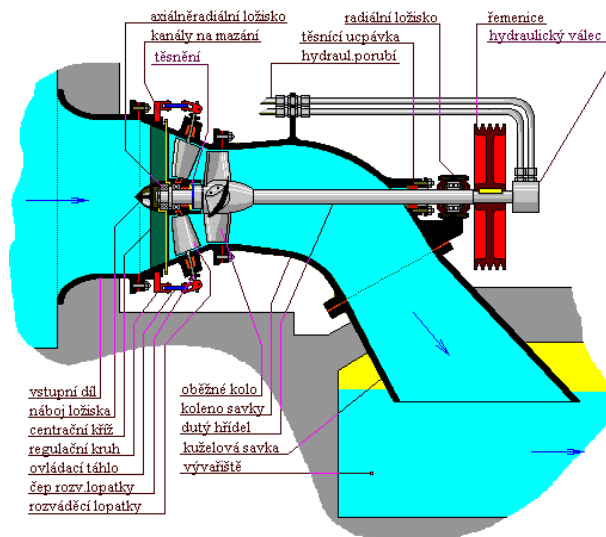


Obr. 3.3.1 Schéma Kaplanovy turbíny [4]

Kaplanova turbína (viz. obr. 3.3.1) je turbínou přetlakovou. Její rotor má tvar vrtule (propeleru) a průtok vody je čistě axiální. Je regulována jak pomocí natáčecích lopatek statoru tak též pomocí natáčecích lopatek rotoru. Tato okolnost má stěžejní význam u vodních toků s proměnlivým průtokem. Její účinnost je vyšší než účinnost Francisovy turbíny, ale je výrazně složitější a dražší. V závislosti na rozdílu hladin může být instalována buď se svislou, nebo s vodorovnou osou otáčení. [1] [16]

3.3.1 Semi Kaplanova turbína

Semi Kaplanova turbína viz. schéma na obr. 3.3.2 patří mezi nejčastěji používané hnací stroje na nově budovaných nízkospádových vodních elektrárnách. Bývá použita i při přestavbě starších vodních děl - původně osazených vertikální Francisovou turbínou, kde často dosahuje lepšího využití toku (díky širšímu regulačnímu rozsahu). Osazují se s ní především vodní díla jezová a také vodní díla derivační s otevřeným přivaděčem na menších spádech. Svůj název získala od esovitě tvarované savky a je turbínou horizontální. Používá se výhradně pro pohon generátorů a to především asynchronních, ale díky dobré regulovatelnosti je možné použití i generátoru synchronního a možnost dodávky elektřiny do samostatné sítě nebo soustrojí použít jako záložní energetický zdroj. [12]



Obr. 3.3.2 Schéma Semi Kaplanovy turbíny [12]

3.3.2 Použití Semi Kaplanovy turbíny

Toto technické uspořádání umožňuje využití spádů od 1,5 do cca 5,5 metrů a průtoků od 250 do 6000 litrů za sekundu. Nejčastější použití však nalezne na spádech od 2 do 4 metrů při průtocích od 500 do 3000 litrů za sekundu. Výhodou této přímoproudé turbíny je, že má malé náklady na stavební část. Nepotřebuje žádnou kašnu ani hluboké vývařště. Vodorovně vyvedený hřídel je pro většinu aplikací ideální. Díky tomuto řešení může být generátor umístěn dostatečně vysoko, což ho často zachrání před zatopením. Aby však mohl hřídel turbíny snadno opustit těleso stroje, musí být savka turbíny esovitě zahnutá a následkem toho má o několik procent nižší účinnost ve srovnání se savkou přímou. Převod ke generátoru je u menších turbín řemenový (vícenásobnými klínovými řemeny) nebo u větších strojů ozubeným čelním soukolím v samostatné uzavřené převodovce. Pouze turbíny na větších spádech, které dosahují dostatečně vysoké otáčky, jsou spojeny s generátorem přímo. [12]

Velkou výhodou tohoto stroje je malá stavební výška, možnost instalace do malých strojoven u jezových elektráren nebo v jezových pilířích. Mechanicky se jedná o kompaktní technologický blok. Regulovatelný rozváděč ve spolupráci s regulací oběžného kola umožňuje nastavit a efektivně využít průtok ve velmi širokém regulačním rozsahu. Lze jím i téměř zastavit průtok strojem. Před vstup do turbíny se osazuje pouze havarijní uzávěr. Bývá jím nejčastěji stavidlo, u větších spádů klapka nebo hradící deska. [12]

Nevýhodou stroje - stejně jako všech Kaplanových turbín s dvojitou regulací je značná mechanická složitost a od toho se odvíjející vysoká cena a vyšší náklady na údržbu. Proto má význam tento typ turbíny instalovat pouze na lokality, kde je to jejich hydrologickým charakterem skutečně opodstatněné. Mezi takové patří lokality bez možnosti akumulace vody, na kterých je navíc průtok během roku natolik rozkolísaný, že by použití jednodušších typů strojů přinášelo velké ztráty. V ostatních případech je ekonomicky výhodnější použít levnější turbíny s jednoduchou regulací. Stroj je (stejně jako většina rychloběžných strojů) citlivý na dodržení přesného spádu, otáček a správně seřízené regulační vazby mezi rozváděčem a oběžným kolem. [12]

Samotná turbína je umístěna přímo ve spodní části strojovny a přes přírubu spojena s přechodovým kusem, který zajišťuje přívod vody. Voda vtéká do konfuzéru stroje, který se kuželovitě

zužuje. Tím se rychlost vody zvýší. Následně míjí centrační kříž, který drží hlavici ložiskového tělesa a vstupuje mezi rozváděcí lopatky. Lopatky upraví směr a rychlost vody pro vstup do oběžného kola. Oběžné kolo je umístěno v nejužším průřezu celého stroje, kde je rychlost proudění vody nejvyšší. Plášť stroje je v tomto místě mírně kulovitě vyklenutý, aby dovoloval změnu sklonu lopatek oběžného kola bez toho, že by zachytily o stěnu. Počet lopatek oběžného kola je (s ohledem na jejich ovládání) sudý. Nejčastěji jsou čtyři. Jejich zakřivení je voleno tak, aby se mezilopátkové kanály ve směru proudění zužovaly. Voda, která jimi proudí, musí zvyšovat rychlost a měnit směr. Tím vzniká reakční síla uvádějící oběžné kolo do pohybu. Voda opouští oběžné kolo s poměrně značnou zbytkovou energií. Tu však následně zpracovává savka turbíny a transformuje ji na zápornou tlakovou energii, která podporuje průtok vody strojem. Turbína musí být vždy současně regulována rozváděcími lopatkami i sklonem lopatek oběžného kola tak, aby bylo proudění vody na výstupu z oběžného kola rovnoběžné s hřídelem, bez rotace. V opačném případě dochází v savce ke značným ztrátám, poklesu účinnosti stroje a ztrátě většiny výhod, které Kaplanova turbína ve srovnání s jinými vodními motory přináší. Savka může končit ve vývařišti viz. obr. 3.3.2. Její okraj musí být i při zastavené turbíně pod hladinou. U větších strojů savka plynule přechází do vodorovně orientovaného obdélného průřezu, který se rozšiřuje a plynule přechází do odpadního kanálu. [12]

4. MVE Perknov

V rámci zpracování bakalářské práce byla vybrána MVE Perknov u Havlíčkova Brodu, která bude v následujícím textu blíže představena spolu s výpočtem hlavních rozměrů Francisovy turbíny, které budou porovnány se skutečností. Dále je proveden variantní výpočet hlavních rozměrů pro Kaplanovu turbínu. V závěru je uvedeno ekonomické zhodnocení stávající MVE s Francisovou turbínou.

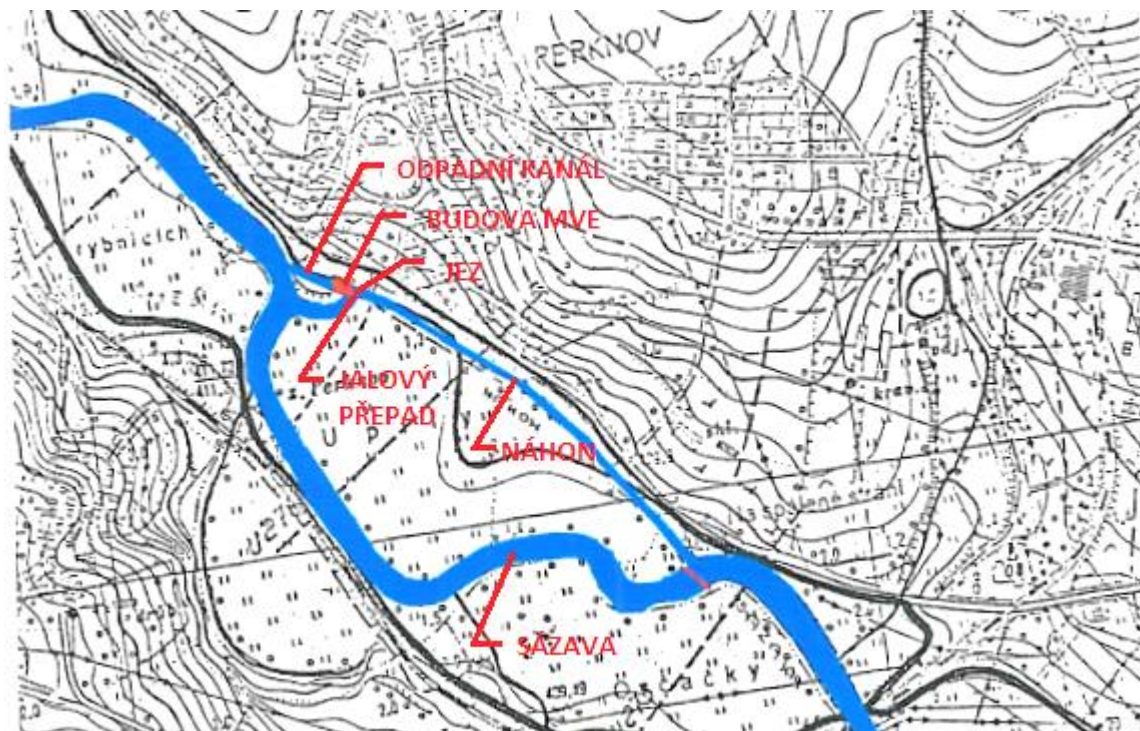
4.1 Lokalita

4.1.1 Popis lokality

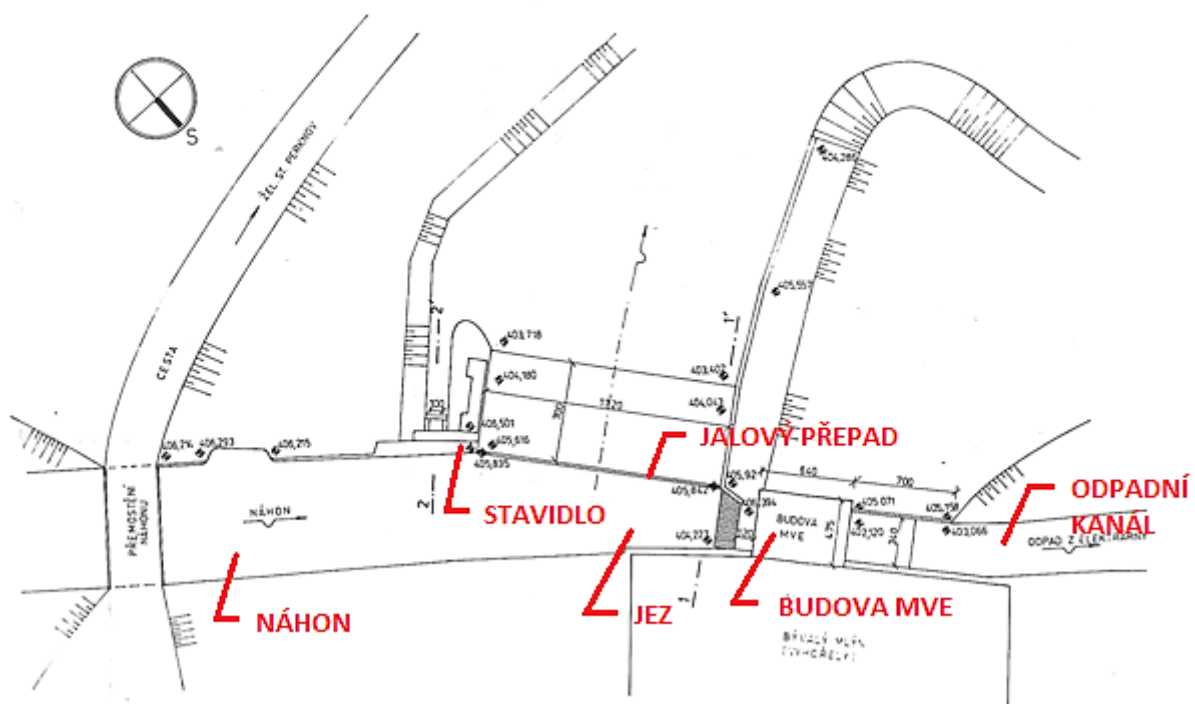
Tok:	Sázava
Říční km:	160,20
Okresní úřad:	Havlíčkův Brod
Obec:	Perknov
Správce a majitel vodního díla:	p. Jaroslav Kubeš, Chelčického 538, Rosice nad Labem
Správa vodního toku:	Povodí Vltavy Praha, a.s.; Holečkova 8, 150 24 Praha 5
Příslušný vodohospodářský orgán:	Okresní úřad Havlíčkův Brod [6]

Historie této lokality sahá do pozdních dob 15. století. V první fázi využívání toku řeky Sázavy to byl mlýn s korečnickem pro mletí obilnin. Postupnou přeměnou procházel až do začátku 30. let 20. století, kdy byla vodní energie využívána v textilním průmyslu pro cupovačky. Další zásah do využití toku byl v roce 1939 v podobě výstavby nového mlýna, avšak s Francisovou turbínou, která poháněla stroje přes transmisní rozvod. V roce 1948 došlo k ukončení provozu mlýna v důsledku znárodnění a od té doby mlýn chátral až do roku 1972, čímž devastace vodního díla nabyla vrcholu. [6]

Pro dnešní účely, tj. výrobu el. energie, bylo vodní dílo přestavěno na malou vodní elektrárnu po roce 1992, kdy bylo v restitucích vráceno původnímu majiteli. K modernizaci elektrárny, jak ji můžeme v současnosti vidět došlo v roce 2007. [6]



Obr. 4.1 Situace – umístění MVE Perknov [6]



Obr. 4.2 Podrobná situace – uspořádání MVE Perknov [6]

4.1.2 Hydrologické poměry

Plocha povodí v úseku pro MVE Perknov:	784,1	km ²
Průměrná dlouhodobá roční výška srážek:	698,5	mm
Průměrný dlouhodobý roční průtok (Q _a):	5,985	m ³ ·s ⁻¹
Maximální hlnost turbíny:	2,5	m ³ ·s ⁻¹
Spád:	2,2	m [6]

N - leté průtoky	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇
[m ³ ·s ⁻¹]	67	89	118	142	167	200	226

Tabulka 4.1 Velké vody opakující se jednou za (N – leté období) [6]

dnů	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
[m ³ ·s ⁻¹]	14,25	9,44	7,09	5,61	4,55	3,74	3,09	2,54	2,06	1,63	1,20	0,80	0,53

Tabulka 4.2 Hodnoty M-denních průtoků pro MVE Perknov [6]

4.1.3 Koncepční řešení MVE

Náhon na 160,146 říčním kilometru, kterým je přiváděna voda z toku řeky Sázavy, je lichoběžníkového průřezu s přírodními břehy. Jez je z monolitického betonu s hrazenou propustí, který je na kótě 406,018 m. n. m., jehož hranu lze nastavit pomocí náplatků a dřevěných hradítek. [6]

Vodní dílo je řešeno jako derivační při pravém břehu toku řeky. Pro nadbytek průtoku, který by přehlcoval turbínu, je zřízen jalový boční přeliv, který je zobrazen v řezu na obr. 4.3. Je situován před strojovnou MVE (viz. podrobná situace na obr. 4.2) a jeho konstrukční délka koruny je 17,2 m. Výška přelivu je nastavitelná za pomoci manuálního zasazování hradítek do ocelových náplatků a reguluje přelivovou hranu v rozmezí od 405,608 m. n. m. do 405,842 m. n. m. Před přelivem je zřízeno stavidlo (viz. řez na obr. 4.4) o šířce 1 m sloužící k vypuštění zdrže jezu Perknov a ke snížení hladiny v náhonu při zahrazení vtoku do MVE. Další stavidlo, které slouží k hrazení vody je umístěno na vtoku do kašny. Jeho šíře je 3950 m a je z dřevěných trámů zasazených do svařeného ocelového rámu. Jako ochrana před vtokem nežádoucích předmětů slouží jemné česle vyrobené z pásové oceli o tloušťce 5 mm. [6]

Jez:

Délka koruny:	46,8	m
Kóta koruny jezu:	406,018	m. n. m.
Hrazená propust' (šířka):	2,38	m [6]

Jezová zadrž:

Maximální délka vzdutí: 1300 m (k jezu v H. Brodu) [6]

Náhon k elektrárně:

Délka: 610 m

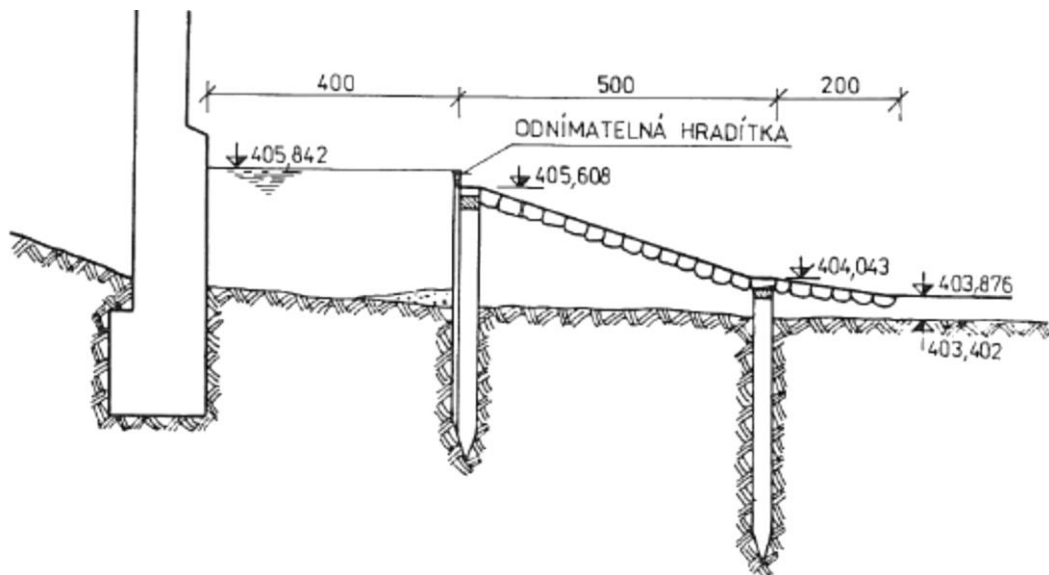
Hrazení náhonu: není [6]

Jalová propust:

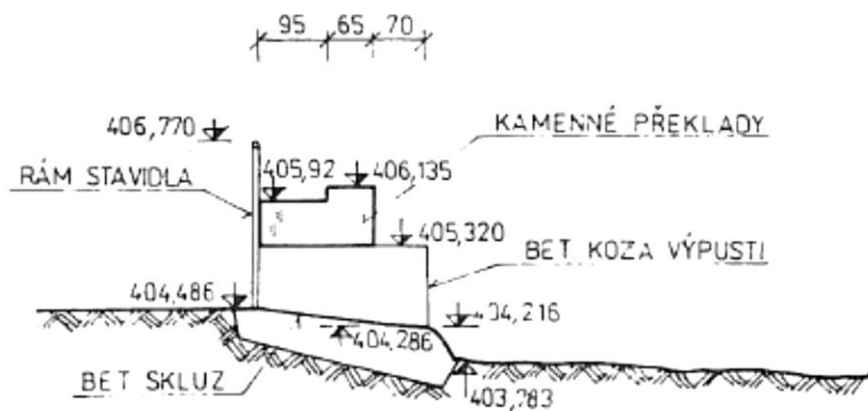
Umístění: před bočním přelivem

Šířka: 1 m

Hrazení: stavidlo [6]



Obr. 4.3 Řez jezem elektrárny 1-1' [6]



Obr. 4.4 Řez jezem elektrárny 2-2' [6]

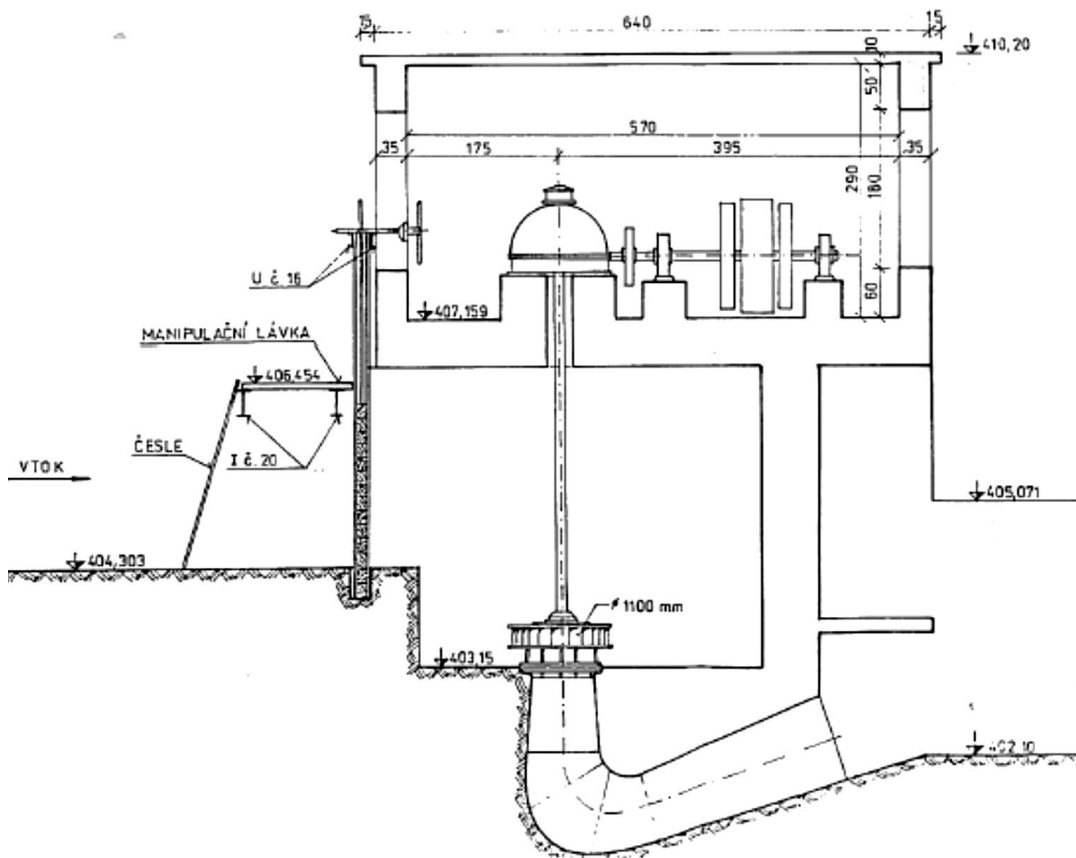
K bývalému mlýnu byla vystavěna strojovna MVE. V prvním podzemním podlaží je umístěna Francisova turbína s vertikálně uloženým hřídelem (viz foto na obr. 4.7) a svislý řez na obr. 4.5. Celé

soustrojí je navrženo z hodnot užitého spádu o velikosti 2,2 m a maximální hltnosti $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ určených z dat ČHMÚ (tab. 4.2). Průtok turbínou se reguluje rozváděcím kolem. Turbína je vybavena automatickou hladinovou regulací. Pro maximální využití spádu je vybudována betonová sací trouba kolenového typu, která je vyústěna do odpadu o rozměrech 3,5 x 3,4 m. Odpad má délku 50 m a ústí zpět do řeky Sázavy (viz foto výusti na obr 4.8). [6]

V přízemí nad turbínou je strojovna elektrárny, která má rozměry 5,7 x 4,5 m. Ve strojovně je převod z hřídel pomocí převodovky na asynchronní generátor s vertikální osou (viz foto na obr. 4.6). [6]

Turbína:

Typ:	Francisova
Rok výroby:	1939
Výrobce:	fa Prokop Pardubice
Průměr oběžného kola	1 100 mm
Otáčky turbíny:	110 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ [6]



Obr. 4.5 Svislý řez A – A' [6]



Obr. 4.6 Foto vybavení strojovny [vlastní zdroj]



Obr. 4.7 Foto repasované Francisovy turbíny [vlastní zdroj]



Obr. 4.8 Foto výusti MVE Perknov [vlastní zdroj]

4.1.4 Manipulace s vodou

MVE je provozována v závislosti na průtocích v řece Sázavě a to zásadně tak, aby hladina na jezu v Perknově neklesla pod úroveň přelivné hrany. MVE je běžně provozována v rozsahu výkonu 10 – 35kW, tj. při hltnosti turbíny cca $0,7 - 2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Při výkonu menším než 10kW se MVE odstavuje a veškerý průtok je převáděn přes jezové těleso a boční přeliv u MVE. [6]

4.2 Řešení strojní části Francisovy turbíny MVE

V následujících odstavcích je řešen výpočet hlavních rozměrů Francisovy turbíny, jehož výsledky jsou následně porovnány s parametry skutečné turbíny.

4.2.1 Hydroenergetické řešení MVE

Rozhodující vliv při výpočtu výkonu turbíny mají dvě návrhové veličiny:

- Průtok $Q = 2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- Užitný spád $h = 2,2 \text{ m}$ [6]

Dalším významným parametrem k výpočtu hlavních rozměrů turbíny a určení jejího typu jsou otáčky turbíny. Z těchto vstupních hodnot jsou vypočteny měrné otáčky viz. odstavec 2.2.3. [1]

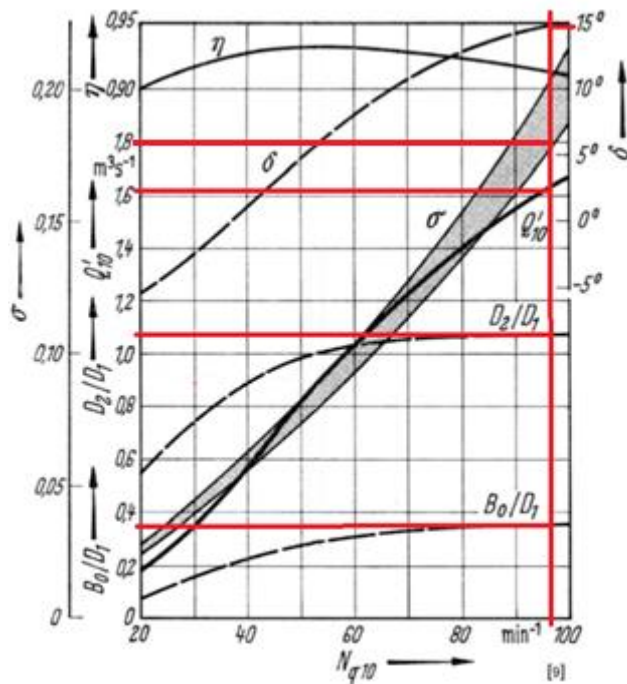
$$N_q = N \cdot \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{h^{\frac{3}{4}}} = 110 \cdot \frac{2,5^{\frac{1}{2}}}{2,2^{\frac{3}{4}}} \quad (3.1)$$

$$N_q = 96,3 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

kde N jsou otáčky turbíny [$N = 110 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$] [6]

Na základě výpočtu (3.1) a diagramu (obrázek 2.2.8) přicházejí v úvahu 2 typy turbín. A to Francisova (v současnosti používaná v MVE Perknov) a Kaplanova, na které je provedeno variantní řešení MVE v dalším odstavci.

4.2.2 Francisova turbína – výpočet hlavních rozměrů



Obr. 4.9 Diagram pro určení hlavních rozměrů Francisovy turbíny [1]

Vzorce použité při výpočtu hlavních rozměrů Francisovy turbíny:

Průtok etalonovou turbínou (dle diagramu na obr 4.9):

$$Q' = 1,61 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.2)$$

Vnější průměr rotoru:

$$D_1 = \left(\frac{Q}{Q'} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{h^{\frac{1}{4}}} = \left(\frac{2,5}{1,610} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{2,2^{\frac{1}{4}}} \quad (3.3)$$

$$D_1 = 1,023 \text{ m} = 1\,023 \text{ mm}$$

Šířka vstupního kanálu (dle diagramu na obr 4.9):

$$\frac{B_0}{D_1} = 0,35 \quad (3.4)$$

$$B_0 = 0,35 \cdot D_1 = 0,35 \cdot 1\,023 \quad (3.5)$$

$$B_0 = 358,05 \text{ mm}$$

Výstupní průměr rotoru (dle diagramu na obr 4.9):

$$\frac{D_2}{D_1} = 1,07 \quad (3.6)$$

$$D_2 = 1,07 \cdot D_1 = 1,07 \cdot 1\,023 \quad (3.7)$$

$$D_2 = 1\,095 \text{ mm}$$

Úhel rozevření sací trouby (dle diagramu na obr 4.9):

$$\delta = 14,8^\circ \quad (3.8)$$

Vzorce použité při výpočtu rychlostních trojúhelníků:

Úhlová rychlost oběžného kola:

$$\omega = \frac{\pi N}{30} = \frac{\pi \cdot 110}{30} \quad (3.9)$$

$$\omega = 11,5 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$$

Obvodová rychlost na vnějším průměru:

$$u_1 = R_1 \cdot \omega = \frac{D_1}{2} \cdot \omega = \frac{1,023}{2} \cdot 11,519 \quad (3.10)$$

$$u_1 = 5,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Meridiánová rychlost:

$$c_{m1} = \frac{Q}{\pi \cdot D_1 \cdot B_0 \cdot k_1} = \frac{2,5}{\pi \cdot 1,023 \cdot 0,358 \cdot 0,95} \quad (3.11)$$

$$c_{m1} = 2,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

kde k je součinitel respektující zmenšení průtočného průřezu vlivem konečné tloušťky lopatek
[0,95 ÷ 0,96]

Radiální výstup:

$$c_{u1} = \frac{g \cdot h}{u_1} = \frac{9,81 \cdot 2,2}{5,893} \quad (3.12)$$

$$c_{u1} = 3,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Výstupní úhel vodního paprsku:

$$\tan \alpha_1 = \frac{c_{m1}}{c_{u1}} = \frac{2,287}{3,662} \quad (3.13)$$

$$\alpha_1 = 32,0^\circ$$

Absolutní vstupní rychlost vodního proudu:

$$c_1 = \frac{c_{u1}}{\cos \alpha_1} = \frac{3,662}{\cos 31,99^\circ} \quad (3.14)$$

$$c_1 = 4,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Úhel sklonu lopatky:

$$\tan(\beta_1) = \frac{c_{m1}}{u_1 - c_{u1}} = \frac{2,287}{5,893 - 3,662} \quad (3.15)$$

$$\beta_1 = 45,7^\circ$$

Průřez vstupního kanálu:

$$S_1 = \pi \cdot D_1 \cdot B_0 = \pi \cdot 1,023 \cdot 0,358 \quad (3.16)$$

$$S_1 = 1,2 \text{ m}^2$$

Průmět plochy mezikruží:

$$S'_2 = \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D'_2{}^2) = \frac{\pi}{4} (1,094^2 - 0,484^2) \quad (3.17)$$

$$S'_2 = 0,8 \text{ m}^2$$

kde D'_2 je průměr [0,484m], který odečteme z výkresu oběžného kola turbíny viz. příloha č. 2.

Plocha výstupního průřezu

$$S_2 = \frac{S'_2}{\cos \vartheta} = \frac{0,757}{\cos 47,5^\circ} \quad (3.18)$$

$$S_2 = 1,1 \text{ m}^2$$

kde ϑ je úhel [47,5°], který odečteme z výkresu oběžného kola turbíny viz. příloha č. 2.

Výstupní rychlost

$$c_2 = c_{m2} = c_{m1} \cdot \frac{S_1}{S_2} = 2,287 \cdot \frac{1,151}{1,121} \quad (3.19)$$

$$c_2 = 2,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Unášivá rychlost bodě S

$$u_2 = \omega \cdot \frac{D_s}{2} = 11,519 \cdot \frac{0,700}{2} \quad (3.20)$$

$$u_2 = 4,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

kde D_s je průměr [0,700m], který odečteme z výkresu oběžného kola turbíny viz. příloha č. 2.

Výstupní úhel lopatky

$$\tan(\beta_2) = \frac{c_{m2}}{u_2} = \frac{2,348}{4,032} \quad (3.21)$$

$$\beta_2 = 30,2^\circ$$

Výkresy kompletních rychlostních trojúhelníků včetně návrhu oběžného kola Francisovy turbíny jsou uvedeny v přílohách č. 1 a 2.

Počet lopatek

$$\bar{u}_1 = \frac{u_1}{\sqrt{2 \cdot g \cdot h}} = \frac{5,893}{\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2,2}} \quad (3.22)$$

$$\bar{u}_1 = 0,9$$

$$z = 12 \cdot \frac{1}{\bar{u}_1} = 12 \cdot \frac{1}{0,897} \quad (3.23)$$

$$z = 13,4 \text{ ks}$$

$$z \doteq 13 \text{ ks}$$

$$z = 12 + 5 \cdot D_1 = 12 + 5 \cdot 1,023 \quad (3.24)$$

$$z = 17,1 \text{ ks}$$

$$z \doteq 17 \text{ ks}$$

Dle výpočtu 3.22, 3.23, 3.24 volím 16ks lopatek

Vzorce použité při výpočtu výkonu turbíny:

K určení celkového výkonu elektrárny musíme započít celkovou účinnost složenou z účinnosti turbíny, elektrického generátoru a z účinnosti převodu mezi turbínou a generátorem.

Celková účinnost:

$$\eta_c = \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_{př} \cdot \eta_{tr} = 0,87 \cdot 0,86 \cdot 0,93 \cdot 0,92 \quad (3.25)$$

$$\eta_c = 0,6$$

kde η_t je účinnost turbíny [0,87-0,88] (uvažujeme hodnotu 0,87)

kde η_g je účinnost generátoru [0,85-0,97] (uvažujeme hodnotu 0,86)

kde $\eta_{př}$ je účinnost převodu převodovkou [0,92-0,97] (uvažujeme hodnotu 0,93)

kde η_{tr} je účinnost transformátoru [0,92-0,98] (uvažujeme hodnotu 0,92) [5]

Celkový výkon elektrárny:

$$P_T = g \cdot h \cdot Q \cdot \eta_c = 9,81 \cdot 2,2 \cdot 2,5 \cdot 0,640 \quad (3.26)$$

$$P_T = 34,5 \text{ kW}$$

Kontrola maximální přípustné sací výšky:

$$Y_s = \frac{1}{\rho} \cdot (P_b - P_d) - (\sigma \cdot g \cdot h) = \frac{1}{1000} \cdot (95\,000 - 4\,000) - (1,8 \cdot 9,81 \cdot 2,2)$$

$$Y_s = 52,2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$

$$h_s = 5,2 \text{ m} \quad (3.27)$$

kde P_b je minimální atmosferický tlak okolí [95 kPa]

kde P_d je tlak nasycených par [4 kPa]

kde σ je Thomův kavitační součinitel [1,8]

Dle diagramu na obr. 4.9

4.2.3 Francisova turbína – porovnání výpočtu hlavních rozměrů se skutečností

Z výpočtů hlavních rozměrů Francisovy turbíny budeme porovnávat se skutečnými rozměry 3 základní charakteristiky a to:

- Průměr oběžného kola turbíny
- Sací výšky
- Celkový výkon elektrárny

Skutečný průměr oběžného kola je 1100mm, což je potvrzeno výpočtem dle vzorce (3.7), který nám udává hodnotu 1095mm.

U skutečné sací výšky víme, že musí být menší než vypočtená hodnota. Dle obr 4.5 zjistíme, že sací výška je rozdíl hladin $403,15 - 402,10 = 1,05\text{m}$ což potvrzuje, že skutečná sací výška je menší než vypočtená viz vzorec 3.27.

Při porovnání hodnot vypočteného celkového výkonu elektrárny $P_T = 34,5 \text{ kW}$ s rozsahem štítkového výkonu generátoru 10 - 35 kW při zvoleném průtoku $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, zjišťujeme, že hodnoty se téměř shodují.

Dle výše uvedeného srovnání můžeme potvrdit, že výpočty byly provedeny správně a odpovídají skutečnosti.

4.3 Modifikace strojní části MVE Kaplanovou turbínou

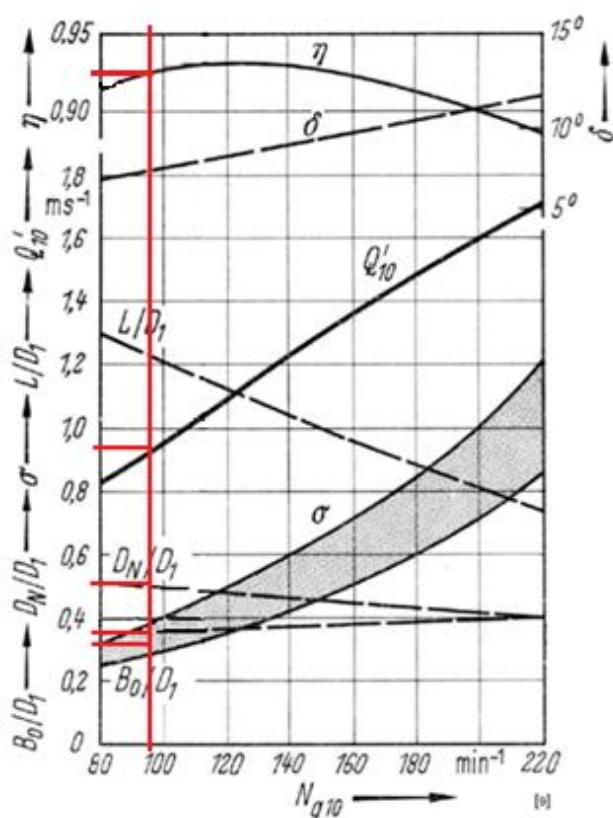
Vzhledem k hydroenergetickému potenciálu lokality MVE Perknov připadá též v úvahu Kaplanova turbína, jak již bylo zmíněno v odstavci 4.2.1. V této kapitole je uveden návrh hlavních rozměrů obdobně jako u Francisovy turbíny.

4.3.1 Hydroenergetické řešení MVE

Při variantním řešení Kaplanovy turbíny vycházíme z totožných hodnot jako v řešení pro Francisovu turbínu dle odstavce 4.2.1.

Průtok	$Q = 2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Užitný spád	$h = 2,2 \text{ m}$.
Měrné otáčky	$N_q = 96,3 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$

4.3.2 Kaplanova turbína – výpočet hlavních rozměrů



Obr. 4.10 Diagram pro určení hlavních rozměrů Kaplanovy turbíny [1]

Vzorce použité při výpočtu hlavních rozměrů Kaplanovy turbíny vychází z [1]:

Průtok etalonovou turbínou (dle diagramu na obr 4.10):

$$Q' = 0,935 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.28)$$

Měrná spádová energie:

$$Y_T = g \cdot h = 9,81 \cdot 2,2 \quad (3.29)$$

$$Y_T = 21,6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$

Skutečný průměr rotoru:

$$D_1 = \left(\frac{Q}{Q'}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{10}{Y_T}\right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{2,5}{0,925}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{10}{21,582}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.30)$$

$$D_1 = 1\,349 \text{ mm}$$

Šířka vstupního kanálu (dle diagramu na obr 4.10):

$$\frac{B_0}{D_1} = 0,36 \quad (3.31)$$

$$B_0 = 0,36 \cdot D_1 = 0,36 \cdot 1\,349 \quad (3.32)$$

$$B_0 = 485,6 \text{ mm}$$

Průměr náboje (dle diagramu na obr 4.10):

$$\frac{D_N}{D_1} = 0,50 \quad (3.33)$$

$$D_N = 0,50 \cdot D_1 = 0,50 \cdot 1\,349 \quad (3.34)$$

$$D_N = 674,5 \text{ mm}$$

Počet lopatek rotoru:

$$z = 3 + 0,00875 \cdot Y_T = 3 + 0,00875 \cdot 21,582 \quad (3.35)$$

$$z = 3,2$$

Dle výpočtu 3.36 volím 3ks lopatek

Rozteč lopatek:

$$T = \frac{\pi \cdot D_1}{z} = \frac{\pi \cdot 1349}{3} \quad (3.36)$$

$$T = 1\,412,7 \text{ mm}$$

Délka lopatek:

$$L = \frac{T}{T/L} = \frac{1412,669}{0,8} \quad (3.37)$$

$$L = 1\,765,8 \text{ mm}$$

kde T/L je poměrná rozteč lopatek [0,62-0,87] (uvažujeme hodnotu 0,8)

Vzorce použité při výpočtu rychlostních trojúhelníků:

Průtočný průřez:

$$S = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_N^2) = \frac{\pi}{4} (1,349^2 - 0,675^2) \quad (3.38)$$

$$S = 1,1 \text{ m}^2$$

Meridiánová rychlost:

$$c_m = w_m = \frac{Q}{S} = \frac{2,5}{1,072} \quad (3.39)$$

$$c_m = w_m = 2,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Úhlová rychlost rotoru:

$$\omega = \frac{\pi N}{30} = \frac{\pi \cdot 110}{30} \quad (3.40)$$

$$\omega = 11,5 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$$

Vzorce použité při výpočtu rychlostních trojúhelníků na vnějším průměru D_1 :

$$D = D_1 = 1,349 \text{ m}$$

Unášivá rychlost:

$$u_1 = R_1 \cdot \omega = \frac{D_1}{2} \cdot \omega = \frac{1,349}{2} \cdot 11,519 \quad (3.41)$$

$$u_1 = 7,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Průmět vstupní rychlosti c_1 do směru rychlosti unášivé:

$$c_{u1} = c_1 \cdot \cos \alpha_1 = \frac{Y_t}{u_1} = \frac{21,582}{7,770} \quad (3.42)$$

$$c_{u1} = 2,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Vstupní úhel proudnice:

$$\text{tg } \alpha_1 = \frac{c_m}{c_{u1}} = \frac{2,332}{2,778} \quad (3.43)$$

$$\alpha_1 = 40,01^\circ$$

Úhel sklonu lopatky na vstupu:

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{c_m}{u_1 - c_{u1}} = \frac{2,332}{7,770 - 2,778} = 0,457 \quad (3.44)$$

$$\beta_1 = 25,04^\circ$$

Výstupní úhel lopatky:

$$\operatorname{tg} \beta_2 = \frac{c_m}{u_1} = \frac{2,332}{7,770} = 0,295 \quad (3.45)$$

$$\beta_2 = 16,71^\circ$$

Vzorce použité při výpočtu rychlostních trojúhelníků na středním průměru D_s :

$$D_s = \frac{D_1 + D_N}{2} = \frac{1,349 + 0,675}{2} \quad (3.46)$$

$$D_s = 1,0 \text{ m}$$

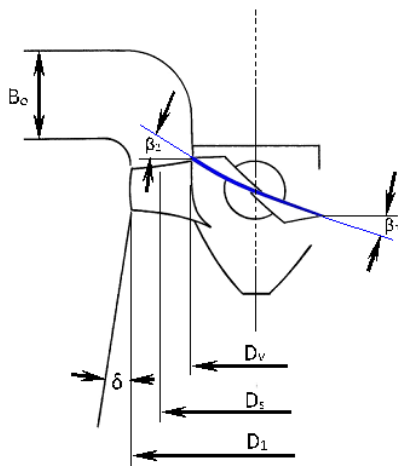
Vzorce použité při výpočtu rychlostních trojúhelníků na vnitřním průměru D_v :

$$D_v = D_N + 2r_n = 0,675 + (2 \cdot 0,003) \quad (3.47)$$

$$D_v = 0,7 \text{ m}$$

kde r_n je vůle lopatky (uvažujeme hodnotu 3 mm)

Výpočet rychlostních trojúhelníků na středním průměru kola D_s a na vnitřním průměru kola D_v je proveden analogicky podle vypočteného průměru vnějšího kola D_1 s dosazením příslušných výše uvedených hodnot.



Obr. 4.14 Počítané rozměry lopatky [7]

Řez	D [mm]	R [mm]	u_1 [mm]	c_{u1} [m/s]	α_1	tg β_1	β_1	α_2	tg β_2	β_2
Vnější \emptyset D_1	1349	674,5	7,8	2,8	40,01°	0,5	25,04°	90°	0,3	16,71°
Střední $\emptyset D_s$	1012	506	5,8	3,7	32,19°	1,1	47,69°	90°	0,4	21,81°
Vnitřní \emptyset D_v	681	340,5	5,7	3,8	31,56°	1,3	50,98°	90°	0,4	22,30°

Tabulka 4.1 Přehled výsledků nutný pro sestavení rychlostních trojúhelníků a odvození tvaru lopatky

Vzorce použité při výpočtu výkonu turbíny:

Celková účinnost:

$$\eta_c = \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} = 0,92 \cdot 0,87 \cdot 0,92 \quad (3.25)$$

$$\eta_c = 0,7$$

kde η_t je účinnost turbíny [0,92] (Dle diagramu na obr 4.10)

kde η_g je účinnost generátoru [0,85-0,97] (uvažujeme hodnotu 0,87)

kde η_{tr} je účinnost transformátoru [0,92-0,98] (uvažujeme hodnotu 0,92) [5]

Výkon na prahu elektrárny:

$$P_T = g \cdot h \cdot Q \cdot \eta_c = 9,81 \cdot 2,2 \cdot 2,5 \cdot 0,736 \quad (3.26)$$

$$P_T = 39,7 \text{ kW}$$

Kontrola maximální přípustné sací výšky:

$$Y_s = \frac{1}{\rho} \cdot (P_b - P_d) - (\sigma \cdot g \cdot h) = \frac{1}{1000} \cdot (95\,000 - 4\,000) - (0,33 \cdot 9,81 \cdot 2,2)$$

$$Y_s = 83,9 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$

$$h_s = 8,4 \text{ m} \quad (3.27)$$

kde P_b je minimální atmosferický tlak okolí [95 kPa]

kde P_d je tlak nasycených par [4 kPa]

kde σ je Thomův kavitační součinitel [0,33]

Dle diagramu na obr 4.10

4.4 Porovnání výsledků výpočtu celkového výkonu obou typů turbín

Celkový vypočtený výkon Francisovy turbíny $P_{Tfr} = 34,5 \text{ kW}$ má nižší hodnotu než výkon Kaplanovy turbíny $P_{TKa} = 39,7 \text{ kW}$. Navíc Kaplanova turbína by dokázala efektivněji využívat a regulovat

proměnlivý průtok (podrobněji uvedeno v odstavci 3.3) a celkové množství vyrobené energie za časový úsek jednoho roku by byl vyšší než u použité Francisovy turbíny. Ale rekonstrukce s použitím Kaplanovy turbíny by byla finančně mnohem náročnější a návratnost investice mnohem delší, a proto by byla nutná podrobná studie a rozvaha výhodnosti této varianty.

5. Ekonomické zhodnocení

Na závěr je uvedeno ekonomické zhodnocení repasované Francisovy turbíny. Pro upřesnění - ceny jsou uvedeny pouze v hrubém odhadu a položky za zemní práce pro vyčištění přívodního a odpadního kanálu jsou značně zkeslené, protože majitel si tuto rekultivaci dělal sám vlastními prostředky nebo se zapůjčenou technikou.

5.1 Náklady na realizaci díla

Položka	Cena
Vyčištění přívodního a odpadního kanálu	70 000
Rekonstrukce stavidla	10 000
Výměna jemných česlí	10 000
Celkem:	90 000

Tabulka 5.1 Náklady na stavební úpravy

Položka	Cena
Repase Francisovy turbíny	130 000
Asynchroní generátor	70 000
Automatická regulace turbíny včetně elektroinstalace	260 000
Instalace zařízení	20 000
Celkem:	480 000

Tabulka 5.2. Strojní vybavení

Položka	Cena
Cena projektu	100 000
Celkem:	100 000

Tabulka 5.3 Projekt a poplatky

Položka	Cena
Mazivo	8 000
Náhradní díly	10 000
Celkem:	18 000

Tabulka 5.4 Provozní náklady za období jednoho roku

Položka	Cena
Náklady na stavební úpravu	90 000
Strojní vybavení	480 000
Projekt a polatky	100 000
Celkem:	670 000

Tabulka 5.5 Celkové náklady na realizaci

5.2 Předpokládané vyrobené množství elektrické energie

Pro určení množství vyrobené energie použijeme vypočtená data Francisovy turbíny při průtoku $2,5\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, což lze považovat za průměrnou hodnotu po dobu 320 dní v roce, 24 hodin denně. Ve skutečném případě je tato hodnota výtěžnosti energie spíše hodnotou maximální.

$$E_{320} = P_{T,Fr} \cdot t = 34,5 \cdot 320 \cdot 24 \quad (5.1)$$

$$E_{320} = 264\,960 \text{ kWh} = 265 \text{ MWh}$$

5.3 Výkupní ceny a zelené bonusy elektřiny pro MVE v roce 2015

ř./sl.	Podporovaný druh energie	Datum uvedení výroby do provozu (nebo splnění podmínky bodu 1.6.4.)		Jednotarifní pásmo provozování		Dvoutarifní pásmo provozování	
		od (včetně)	do (včetně)	Výkupní ceny [Kč/MWh]	Zelené bonusy [Kč/MWh]	Zelené bonusy [Kč/MWh]	
						VT	NT
a	b	c	j	k	n	o	
100	Malá vodní elektrárna	-	31.12.2004	2 028	1 208	1 500	1 012
101		1.1.2005	31.12.2013	2 600	1 780	2 270	1 485
102		1.1.2014	31.12.2014	2 549	1 729	-	-
103		1.1.2015	31.12.2015	2 499	1 679	-	-
110	Rekonstruovaná malá vodní elektrárna	-	31.12.2013	2 600	1 780	2 270	1 485
111		1.1.2014	31.12.2014	2 549	1 729	-	-
112		1.1.2015	31.12.2015	2 499	1 679	-	-
120	Malá vodní elektrárna v nových lokalitách	1.1.2006	31.12.2007	2 888	2 068	2 600	1 752
121		1.1.2008	31.12.2009	3 057	2 237	2 600	2 006
122		1.1.2010	31.12.2010	3 322	2 502	2 600	2 403
123		1.1.2011	31.12.2011	3 248	2 428	2 600	2 292
124		1.1.2012	31.12.2012	3 385	2 565	2 600	2 498
125		1.1.2013	31.12.2013	3 361	2 541	2 600	2 462
126		1.1.2014	31.12.2014	3 295	2 475	-	-
127		1.1.2015	31.12.2015	3 230	2 410	-	-

Tabulka 5.6 Výkupní ceny a roční zelené bonusy na elektřinu pro MVE v roce 2015

Dle tabulky spadá MVE Perknov do kategorie „Rekonstruované malé vodní elektrárny do 31.12.2013,“ kde hodnoty pro využití jednotarifního pásma provozování jsou:

Výkupní cena V_c : 2 600 Kč/MWh

Zelené bonusy Z_b : 1 780 Kč/MWh

5.4 Výnos MVE

Hrubý odhad částky bez DPH ročního výnosu je dán součinem hodnot z odstavců 5.2. a 5.3.

$$Z_h = E_{320} (V_c + Z_b) = 265 (2600 + 1780) \quad (5.2)$$

$$Z_h = 1\,160\,700 \text{ Kč}$$

6. Závěr

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku využití různých typů turbín MVE. V úvodu jsou blíže specifikovány pojmy a roztríděna různá vodní díla dle charakteristických rysů. Je doplněn historický vývoj vodních motorů od starověku až po současnost. Jsou zde popsány a vysvětleny základní návrhové veličiny. Dále je pozornost zaměřena na jednotlivé typy turbín používané v oblasti malých vodních elektráren. V druhé části je blíže popsán současný stav a rekonstrukce malé vodní elektrárny v Perknově, která byla zřízena na místě původního mlýna. Na elektrárně je ukázán návrh a výpočet hlavních rozměrů stávající Francisovy turbíny na základě teorie fyzikální podobnosti hydraulických stojů. Výsledky výpočtu jsou následně porovnány se skutečností. Pro ověření výpočtu byly vybrány tyto parametry: průměr oběžného kola, sací výška a celkový výkon elektrárny. Průměr oběžného kola byl vypočten s přesností 5mm, což potvrzuje hodnota vypočtená $D_2 = 1095\text{mm}$ se skutečností 1100mm dle výkresu na obr. 4.5. U sací výšky je výpočtem stanovena maximální přípustná hodnota $h_s = 5,2\text{m}$. Skutečná hodnota sací výšky u Francisovy turbíny musí být vždy menší, což rozdíl výšek hladin 1,05m (dle obr. 4.5) bez problému splňuje. Celkový vypočtený výkon $P_T = 34,5 \text{ kW}$ (při maximálním průtoku $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) také odpovídá současnému výkonu generátoru 10 - 35 kW při hltnosti turbíny $0,7 - 2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Součástí druhé části je variantní výpočet hlavních rozměrů a celkového výkonu Kaplanovy turbíny při využití stejného hydroenergetického potenciálu. Výsledek $P_{TKa} = 39,7 \text{ kW}$ výpočtu výkonu byl porovnán s celkovým výkonem Francisovy turbíny $P_{Tfr} = 34,5 \text{ kW}$. Dle předpokladu vykazuje Kaplanova turbína vyšší celkový výkon. Ten, spolu s lepším využitím hydrotechnického potenciálu (díky lepším možnostem regulace turbíny) bude zárukou celkově vyšší roční výroby elektrické energie. Závěrem je uvedeno ekonomické zhodnocení současné elektrárny s Francisovou turbínou, které obsahuje hrubý odhad nákladů spojených s realizací díla a předpoklad vyrobeného množství elektrické energie v období jednoho roku.

Celková rekonstrukce elektrárny je dle mého názoru povedená. Projektant navrhl renovaci dostupného vybavení a zaměřil se na automatizaci regulace průtoku pro maximální energetické využití lokality. Je zde vidět, že při návrhu byly použity správné předpoklady, které se odrazily v celkové koncepci projektu, takže majitel může být spokojen.

7. Použitá literatura

7.1 Knižní publikace

- [1] Ulrych, E.; *Aplikovaná hydromechanika I (základy hydroenergetiky)*, 1. vyd. Praha: ČZU, 2007. 126 s., ISBN 978-80-213-1609
- [2] Polák, M.; *Hydraulické stroje - úvod do teorie a konstrukce*, 1. vyd. Praha: ČZU TF, 2013. 154 s., ISBN 978-80-213-2367-4
- [3] Melichar, J.; Vojtek, J.; Bláha, J.; *Malé vodní turbíny, konstrukce a provoz*, 1. vyd. Praha: ČVUT, 1998. 296 s., ISBN 80-01-01808-0
- [4] Hýbl, J.; *Vodní motory III*, 3. vyd. Praha: Česká matice technická, 1922 až 1928.
- [5] Bláha, J.; Brada, K.; *Hydraulické stroje*, 1. vyd. Praha: SNTL, 1992. 752 s., ISBN 80-03-00665-1
- [6] Rammy; *Manipulační řád pro vodní dílo Perknov*, 1. vyd. Pardubice: Rammy, 1992. 29s.
- [7] Polák, M.; Polák, V.; *Aplikace teorie fyzikální podobnosti ve výpočtovém programu pro návrh vodních turbín. In: Jemná mechanika a optika 10/2010*, 1. vyd. Přerov: 2010. 281-284s., ISSN 0447-6441
- [8] ČSN 750128; *Vodní hospodářství. Názvosloví využití vodní energie*, Praha: ÚNMZ 1989
- [9] ČSN 750120; *Vodní hospodářství – Terminologie hydrotechniky*, Praha: ÚNMZ 2009

7.2 Internetové zdroje

- [10] Sdružení Cech provozovatelů MVE; *Cech provozovatelů MVE* [online] [cit. 19-3-2015]
URL: <<http://www.cechmve.cz>>
- [11] Ing. Jakub Slavík, MBA – Consulting Services; *Proelektrotechniky – elektronika pro odborníky* [online] [cit. 19-3-2015]
URL: <<http://www.proelektrotechniky.cz/vzdelavani/6.php>>
- [12] Viktor, Laika; *Malá voda* [online] [cit. 19-3-2015] URL: <<http://mve.energetika.cz>>
- [13] Zavila Onřej. *Čerpadla* [online] [cit. 20-3-2015]
URL: <http://hasicihustejnet.eu/data/TPO/3rocnik/technicke_prostredky_PO_1/publi_c/CERPADLA.pdf>
- [14] Wikipedia, the free encyclopedia; *Cross flow turbine* [online] [cit. 3-4-2015]:
URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Cross-flow_turbine>

- [15] Wikipedia; *Francisova turbína* [online] [cit. 3-4-2015]
URL: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Fancisova_turb%C3%ADna>
- [16] Wikipedia; *Kaplanova turbína* [online] [cit. 3-4-2015]
URL: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kaplanova_turb%C3%ADna>
- [17] Energetický regulační úřad; *ERÚ – statistika* [online] [cit. 4-4-2015]
URL: <<http://www.eru.cz/statistika>>

8. Seznam zkratek

zkratka	popis
MVE	Malá vodní elektrárna
VD	Vodní dílo
ČSN	Česká soustava norem
MW	Megawat
kW	Kilowat
GWh	Gigawathodina
MWh	Megawathodina
m	Metry
ČR	Česká republika
USA	Spojené státy Americké
ERÚ	Energetický regulační úřad
př.n.l.	Před naším letopočtem
r.	Rok
stol.	Století
%	Procenta
ČZU	Česká zemědělská univerzita
ČVUT	České vysoké učení technické
SNTL	Státní nakladatelství technické literatury

9. Seznam příloh

- Příloha č. 1 – Výkres rychlostních trojúhelníků Francisovy turbíny
- Příloha č. 2 – Výkres oběžného kola Francisovy turbíny