

Česká zemědělská univerzita v Praze

TECHNICKÁ FAKULTA

Technologický zařízení staveb



Rekonstrukce malé vodní elektrárny s Francisovou turbínou

diplomová práce

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

Autor: Bc. Lukáš Pertl

© 2018 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Lukáš Pertl

Technologická zařízení staveb

Název práce

Rekonstrukce malé vodní elektrárny s Francisovou turbínou

Název anglicky

Reconstruction of small hydropower plants with a Francis turbine

Cíle práce

Pro vybranou malou vodní elektrárnu zmapovat podmínky a možnosti rekonstrukce soustrojí s Francisovou turbínou. Zhodnotit technické a ekonomické aspekty navrhované varianty.

Metodika

- určit hydrotechnický potenciál lokality s MVE
- navrhnout inovační řešení pro rekonstrukci Francisovy turbíny
- provést technicko-ekonomické vyhodnocení rekonstrukce

Pozn.:

- práce by měla být strukturována do následujících oddílů: Úvod, Materiál a metody, Výsledky, Diskuse, Závěr. V pracích rešeršního charakteru lze sloučit Materiál ... s Výsledky, stejně tak Diskusi a Závěrem
- rovnice, tabulky a obrázky je nutno číselně označovat a na toto značení se v textu odkazovat. Nedílnou součástí práce je Obsah, Abstrakt, Seznam použitých zkratk a symbolů, obrázků, tabulek a Seznam použité literatury.
- při vypracování bakalářské práce je nutno respektovat citační pravidla dle ČSN ISO 690:2011
- vedoucího práce je nutno čtvrtletně seznamovat s postupem zpracování zadaného tématu

Doporučený rozsah práce

60 stran textu včetně obrázků, grafů a tabulek

Klíčová slova

malá vodní elektrárna, vodní turbína, hydroenergetika

Doporučené zdroje informací

Bednář, J.: Turbíny [malé vodní elektrárny], Nakladatelství Marcela Bednářová, Blansko 2013
Melichar, J., Bláha, J., Brada, K.: Hydraulické stroje – konstrukce a provoz, ČVUT Praha 2002.
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.
Ulrych, E.: Aplikovaná hydromechanika I, ČZU v Praze, 2007.

Předběžný termín obhajoby

2017/18 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Martin Polák, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra mechaniky a strojnictví

Elektronicky schváleno dne 10. 1. 2017

doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 1. 2017

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 23. 02. 2018

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: „Rekonstrukce malé vodní elektrárny s Francisovou turbínou“ vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č.111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení §35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne 23.2.2018

.....

Bc. Lukáš Pertl

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu diplomové 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.

Rekonstrukce malé vodní elektrárny s Francisovou turbínou

Abstrakt: Diplomová práce se v úvodu zabývá problematikou energetického využití malých vodních zdrojů. Následuje 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 práce je porovnání konstrukčních rozměrů současné turbíny s výpočtem a porovnání výsledků s návrhem jiného typu turbíny.

Závěr je věnován technicko-ekonomické rozvaze o využití Francisovy nebo Kaplanovy turbíny malé vodní elektrárny Perknov a výběru optimální varianty pro danou lokalitu.

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

Reconstruction of small hydro power with Francis turbine

Summary: The diploma 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.

The conclusion is devoted to the economic balance between the Francis and Kaplan turbines of the small hydroelectric power station (MVE), where it is assessed which water turbine is economically more advantageous for the given location.

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

Obsah

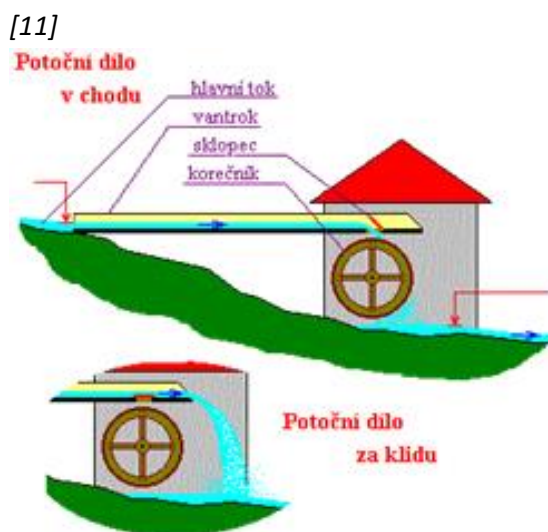
1.	Úvod	2
1.1	Definice MVE	3
1.2	Historický přehled vodních děl a motorů (vodních kol a turbín)	4
2.	Typy vodních motorů	6
2.1	Vodní turbíny a jejich rozdělení	7
3.	Turbíny používané v MVE.....	15
3.1	Bánkiho turbína	15
3.2	Francisova turbína	16
3.3	Kaplanova turbína	18
4.	MVE Perknov	22
4.1	Lokalita	22
4.2	Výpočet hlavních rozměrů Francisovy turbíny MVE Perknov	31
4.3	Modifikace strojní části MVE Kaplanovou turbínou.....	33
5.	Ekonomické porovnání obou typů turbín	37
5.1	Současná situace a vstupní údaje.....	37
5.2	Francisova turbína – rozvaha a výsledovka.....	38
5.3	Kaplanova turbína – rozvaha a výsledovka	44
5.4	Charakteristiky úspěšnosti investice „Francis“ vs „Kaplan“	49
6.	Závěr.....	53
7.	Použitá literatura.....	54
7.1	Knižní publikace.....	54
7.2	Internetové zdroje.....	54
8.	Seznam zkratk	55
9.	Seznam příloh.....	55

1. Úvod

Úvodní seznámení se základní terminologií a popisem charakteristických rysů vodních děl včetně vodních motorů (turbín) sleduje vymezení jejich rozsahu využití. Následuje jejich rozdělení do různých typů z pohledu historického vývoje, současného stavu i výhledů jejich používání v oblasti malých vodních elektráren.

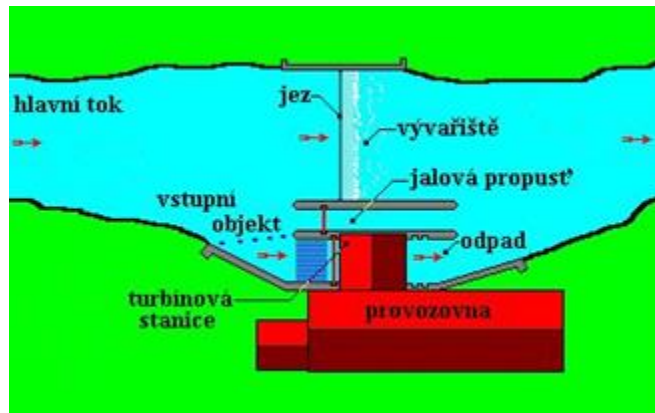
Vodní dílo je komplex veškerého zařízení (strojního, stavebního, ...) využívající vodní energii na daném vodním toku. Energetický pohled jej posuzuje následovně, viz ČSN 750128 (nově nahrazená ČSN 750120):

- Dle velikosti instalovaného výkonu
 - 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. Potoční MVE jsou provozně nenáročné.



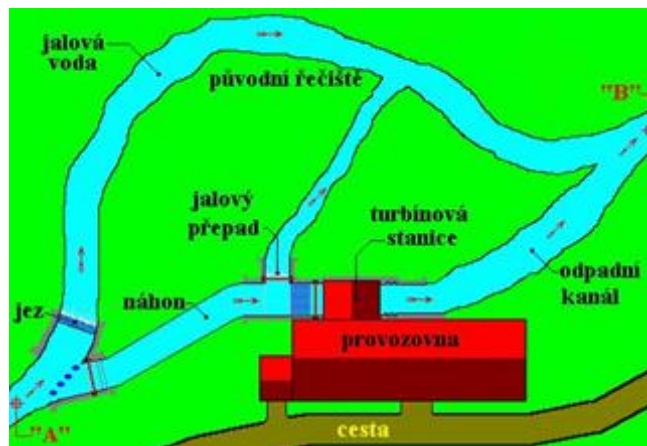
Obr. 1.1 Schéma elektrárny potoční [11]

- 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 spádu daného rozdílem hladin mezi body "A" a "B", jak je na obrázku. Tento typ používá většina MVE. [11]



Obr. 1.3 Schéma elektrárny derivační [11]

1.1 Definice MVE

Vodní elektrárny s výkonem menším než 10 MW jsou řazeny mezi malé vodní elektrárny (MVE). Může jimi být kryta osobní spotřeba elektřiny, dodávky do rozvodné sítě a v neposlední řadě i sloužit pro průmyslové účely. Jejich umístění a provoz nepředstavuje výrazný zásah do okolní přírody, což se nedá zajistit u velkých vodních elektráren. Odhadovaná roční produkce elektrické energie v malých vodních elektrárnách je přibližně 1000 GWh a celková výroba ve vodních elektrárnách v ČR je cca 3000 GWh, což představuje cca 3 % veškeré výroby elektrické energie v České republice. K 1.1.2013 bylo na území České republiky evidováno 1451 malých vodních elektráren s výrobou energie do 1 MWh. Tyto údaje vykazuje statistika ERÚ. [11][17]

MVE se obvykle skládá z těchto částí:

- Vzdouvací zařízení (přehrady, hráze, jezy) – slouží ke vzduť vodní hladiny (ke zvětšení spádu) a k usměrnění průtoku do přivaděče.
- Přivaděč (náhon) – přivádí vodu k 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 – mění mechanickou energii na elektrickou energii.
- Jalový přepad – odvádí nadbytečný průtok vody, který by přehlcoval turbínu.
- Odpadní kanál – vrací vodu do původního koryta. [11]

1.2 Historický přehled vodních děl a motorů (vodních kol a turbín)

Následující tabulka přibližuje v historickém sledu vývoj vodních děl a vodních motorů od starověku až do dnešní doby.

Tabulka 1.1 Vývoj vodních děl a motorů [12]

Období	Místo a události v oblasti vodních děl a motorů
600 let př.n.l.	Chaldejci použili čerpací kolo na dopravu vody do závlahových kanálů
230 let př.n.l.	V Egyptě bylo použito hnací lžicové kolo pro pohon věder k čerpání vody
150 let př.n.l.	V římské říši bylo použito vodní kolo na spodní vodu. V téže době používají v Řecku vodní mlýny s vodním kolem a vertikální osou
50 let př.n.l.	O vodních mlýnech se zmiňuje řecký zeměpisec Strabo
r. 361	Byly zbudovány první vodní mlýny v Německu na řece Mosel
r. 536	V Římě byl zřízen první plovoucí lodní mlýn na řece Tibeře
r. 718	Tesař Halak postavil první vodní mlýn ve střední Evropě mlynáři Svachovi v Žatci na řece Ohři
od 12.stol.	Vodní kolo je již známo po celé Evropě
r. 1227	Uveden do provozu první plovoucí vodní mlýn na Labi
r. 1749	Jozef Karol Hell na Slovensku sestrojil vysokotlaký vodosloupcový stroj
r. 1750	Lékař Johann Andreas Segner sestrojil reakční vodní kolo

r. 1753	Segnerovo kolo bylo zdokonaleno Leonardem Eulerem
r. 1824-6	Francouz prof. Claude Burdin vyvinul první přetlakovou turbínu
r. 1827	Uvedení první Burdinovy turbíny do provozu
r. 1834	Fourneryon staví svou turbínu pro francouzské železárně
r. 1837	Fourneyronova turbína byla německým technikem Henschlem doplněna o sací troubu
r. 1837-1841	Vynalezena Henschel-Jonvalova turbína
r. 1844	Redtenbacher vynalezl stupňovitou turbínu Inženýr Zuppinger ve Švýcarsku sestrojil první rovnotlakou turbínu s vnějším ostřikem
r. 1847-49	Americký inženýr anglického původu James Bicheno Francis zdokonalil Howdovu turbínu a vyvinul tak univerzálně použitelnou (vertikální i horizontální) přetlakovou turbínu
r. 1848	Hornický technik Schwamkrug v Rudohoří vyvinul rovnotlakou turbínu s vnitřním vstupem vody
r. 1863	Vynalezena rovnotlaká Girardova turbína
r. 1870	Přes původní odpor zaznamenává Francisova turbína výrazné rozšíření po evropském kontinentě
r. 1880	Američan Lester Allen Pelton vynalezl rovnotlakou turbínu
r. 1878	Německý profesor R. Fink doplňuje Francisovu turbínu natáčivými rozváděcími lopatkami
r. 1886	Ing. Adolf Pfarr sestrojil spirálovou Francisovu turbínu s pevným rozváděčem pro velké spády
r. 1900	A. G. Michael teoreticky charakterizoval bubnovou turbínu, která se později stane předlohou pro maďarského profesora Bánkiho
r. 1913	Prof. Ing. Dr.h.c. Viktor Kaplan vyvíjí turbínu s natáčivými oběžnými lopatkami a systém patentuje
r. 1918	Matematicky vyřešena Bánkiho turbína Je vyrobena první Kaplanova turbína (brněnskou slévárnou Ignace Storka)

26.3.1919	První Kaplanova turbína uvedena do provozu v Ulmu (jižně od Vídně) Profesor Banki uvádí v Budapešti do provozu rovnotlakou turbínu
r. 1920	E. Crewdson staví rovnotlakou turbínu pro velké spády nazvanou "Turgo"
r. 1921	Rozbíhá se první Kaplanova turbína v Československu (v Poděbradech)
r. 1938	Kaplanova turbína byla použita na spád 38 metrů
r. 1950	Úpravou Kaplanovy turbíny vzniká diagonální Deriazova turbína
r. 1951	Začala hromadná likvidace malých vodních mlýnů a provozů využívajících vodní energii

2. Typy vodních motorů

Vodní kola patří k nejstarším strojům sestavených člověkem. Sloužila k pohonu strojů a později i k výrobě energie. Průtok a dále i spád předurčuje v první řadě výkon těchto strojů. Nízká účinnost, zimní námrazy jsou jejich hlavními nevýhodami. Patří mezi rovnotlaké stroje. [12]

Přetlakové turbíny mění potenciální a kinetickou energii vody v mechanickou energii rotujícího hřídele. [12]

V České republice při současném pohledu na MVE a jejich různých obměn či modifikací se setkáváme se třemi základními typy konstrukcí vodních turbín [12]:

- Bánkiho turbína
- Francisova turbína
- Kaplanova turbína

Chceme-li posoudit vhodnost použití vodního motoru v dané lokalitě, je třeba se zaměřit na zodpovězení následujících otázek:

- Jedná se vždy o zařízení s dlouhou životností. Nutno zvážit vztah jeho „morálního technického stárnutí“ během jeho předpokládaného provozu k dosažitelné účinnosti v dané lokalitě.
- Výše provozních nákladů versus způsob regulace, běžná údržba a její časová náročnost.
- Vliv nahodilých událostí, např. jako kolísání průtoku vody, znečištění přitékající vody (listí, větví a jiné předměty) vedoucí k odstávkám a mnohdy i k vícenákladům.
- Způsob regulace. Nákladná a dokonalá regulace ve výsledku nemusí vést k lepšímu zhodnocení investice. Uspokojivým řešením je mnohdy jednoduchá a spolehlivá regulace vykazující dlouhou životnost a nízké provozní náklady. [12]

2.1 Vodní turbíny a jejich rozdělení

Základní pohled na rozdělení vodních turbín dle vstupu vody, uspořádání vodní turbíny a způsobu přenosu energie je rozdělen do následujících skupin.

Dle vstupu vody na oběžné kolo lze rozdělit turbíny na:

- radiální,
- axiální,
- radiaxiální,
- diagonální,
- tangenciální se šikmým či dvojnásobným vstupem.

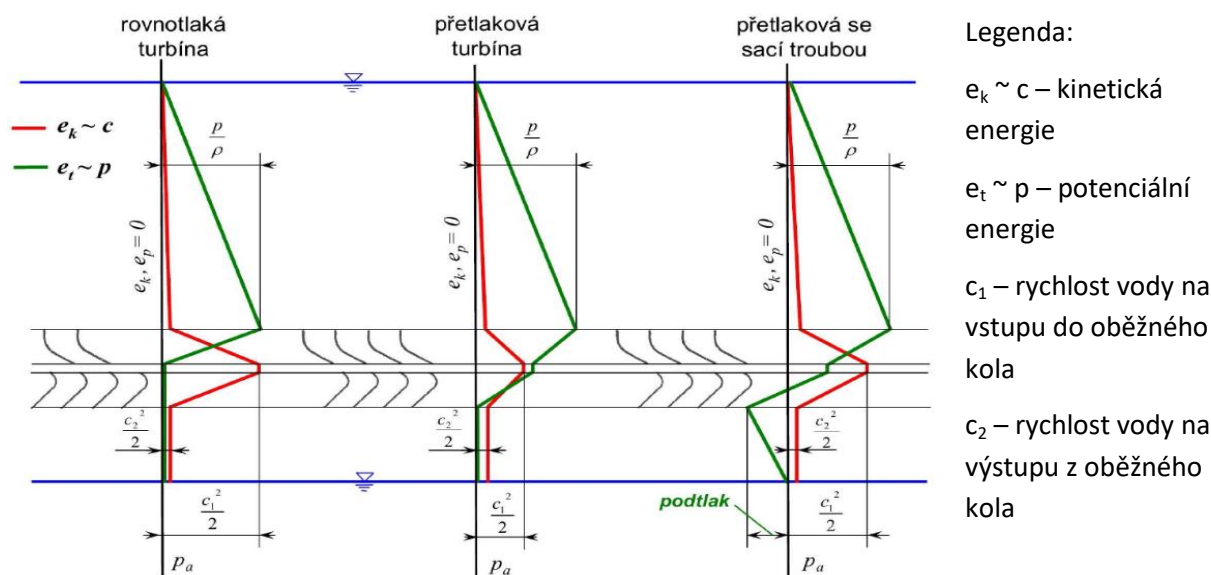
Podle uspořádání se vodní turbíny dělí na:

- horizontální,
- vertikální a
- šikmé.

Podle způsobu přenosu energie vody se rozlišují turbíny na:

- rovnotlaké a (Peltonova t., Bánkiho t., Turgo t.)
- přetlakové. (Kaplanova t., Francisova t.) [3]

Následující obrázek porovnává průběhy tlaků a rychlostí u turbíny rovnotlaké, přetlakové a přetlakové se sací troubou a dále popisuje základní rozdílnosti zmiňovaných turbín.



Obr. 2.1.1 Průběh tlakových a kinetických energií u rovnotlakých a přetlakových turbín [2]

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]

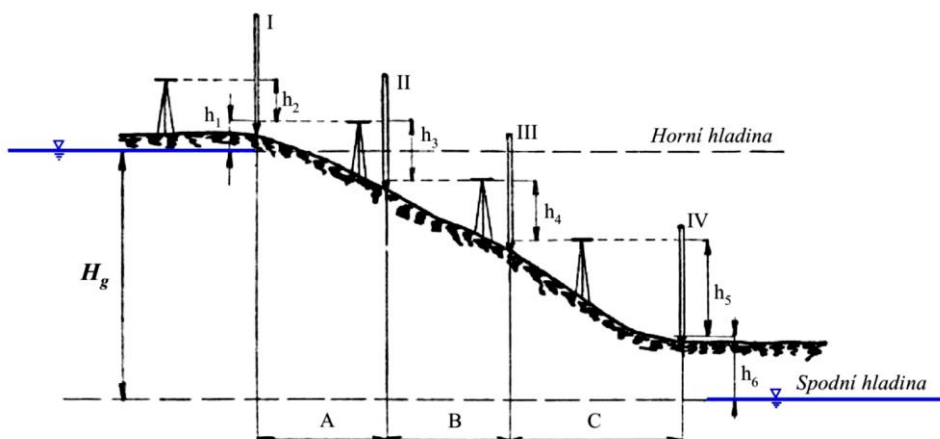
U přetlakových turbín je část tlakové energie v zařízení pro přívod vody k oběžnému kolu přeměněna na kinetickou energii a zbývající část tlakové energie se mění v kinetickou energii při průchodu vody oběžným kolem. Proud vody plně vyplňuje průtočné kanály oběžného kola (úplný-totální ostřík), a tím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

2.1.1 Hydrotechnický potenciál

Pro zjištění hydrotechnického potenciálu lokality je nezbytné určit spád a průtok.

- **Spád** (geodetický spád)

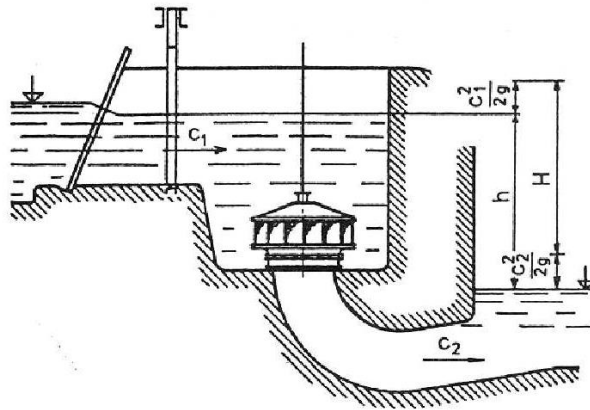
Je definován jako svislá odlehlost hladin vodního díla. Určení geodetického spádu je obvykle prováděno nivelací pomocí nivelačního přístroje a měřící latě. Měřeny jsou dílčí výšky, např. h_1 až h_5 , jak je uvedeno na obr. 2.2.1. Z jejich algebraického součtu je určen rozdíl hladin. K určení geodetického spádu lze použít i vážní lať a obdobného výpočetního způsobu jako při nivelaci. [2]



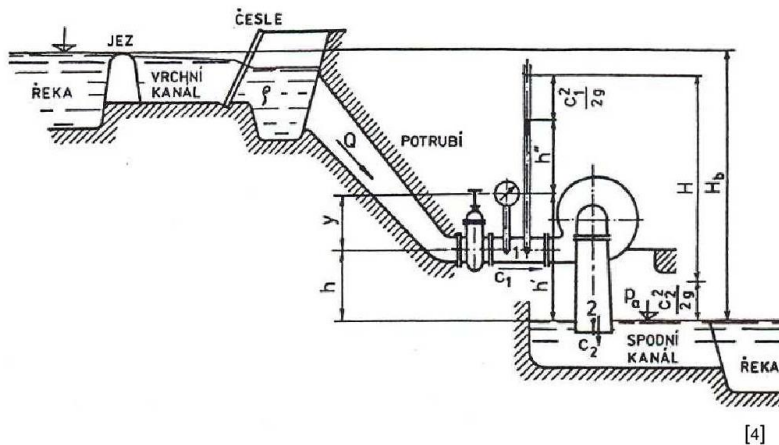
Obr. 2.2.1 Schéma určení geodetického spádu měřený nivelací [2]

- **Užitný spád**

Je definován jako poměr mezi měrnou energií turbíny a gravitační konstantou. Způsob výpočtu závisí na uspořádání vodního díla. Jako příklad jsou na obr. 2.2.2 uvedeny vzorce 2.1 pro kašnovou turbínu a 2.2 pro turbínu se spirální skříní. [2]



kašnová turbína



turbína se spirální skříní

Obr. 2.2.2 Užitečný spád a ztrátová výška [2]

Měrná energie kašnové turbíny:

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

Měrná energie turbíny se spirální skříní:

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

Užitný spád:

$$H = \frac{e_T}{g} \text{ [m]}$$

Kde:

g ... je gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

h ... je geodetický spád [m]

c_1 ... je rychlost vody na vstupu do oběžného kola [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

c_2 ... je rychlost vody na výstupu ze sací trouby [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

p_1 ... je tlak vody na vstupu příváděcího potrubí [Pa]

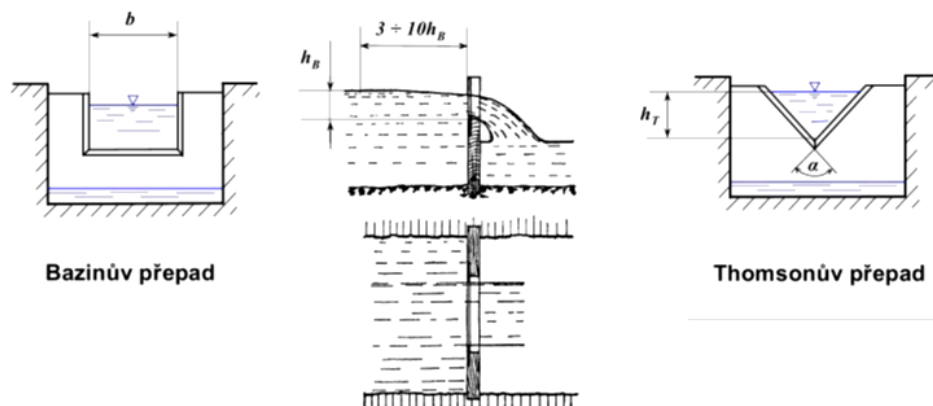
p_2 ... je tlak vody na výstupu příváděcího potrubí [Pa]

ρ ... je hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] [2]

- **Průtok**

Průtok lze měřit dvěma způsoby:

- Měření přepadem, kde se rozlišuje tvar přepadové hrany, viz. příklad na obr. 2.2.3 znázorňuje Thomsovův přepad a Bazinův přepad. Tyto měřicí metody jsou vhodné na měření malých a středních toků. Metoda spočívá v dočasném přehrazení toku neprodyšnou stěnou v místě měření obdélníkového průřezu v případě Bazinova přepadu a nebo trojúhelníkového průřezu v případě Thomsonova přepadu a následný výpočet dle schématu na obr. 2.2.3. [2]



Obr. 2.2.3 Schéma měření průtoku přepadem [2]

Bazinův přepad:

$$Q = \frac{2}{3} \mu_B \cdot b \cdot h_B \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_B} \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

Thomsonův přepad:

$$Q = \frac{8}{15} \mu_B \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h_T^{\frac{5}{2}} \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

Kde:

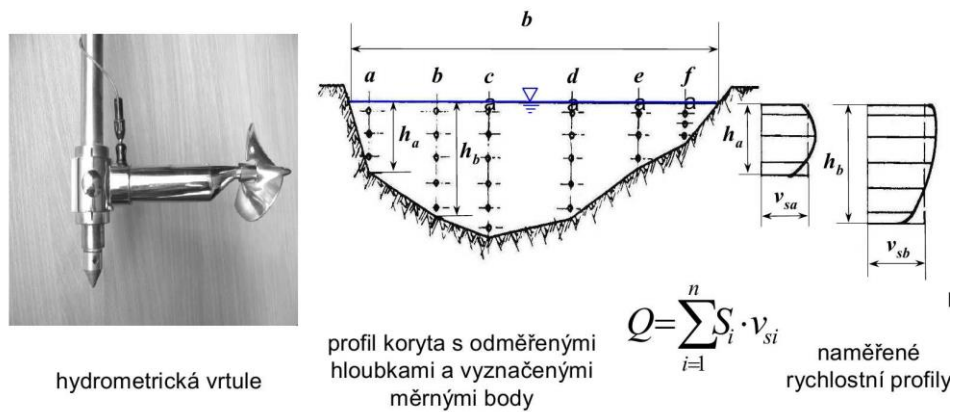
μ_B ... je součinitel přepadu

b ... je délka přelivné hrany [m]

$h_{B,T}$... je přepadová výška [m]

g ... je gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

- Měření hydrometrickou vrtulí, kde se měří příčný a rychlostní profil koryta, viz schéma na obr. 2.2.4. Princip spočívá v měření počtu otáček za určený časový interval šroubovitého propeleru, který je vložen do koryta řeky. [2]

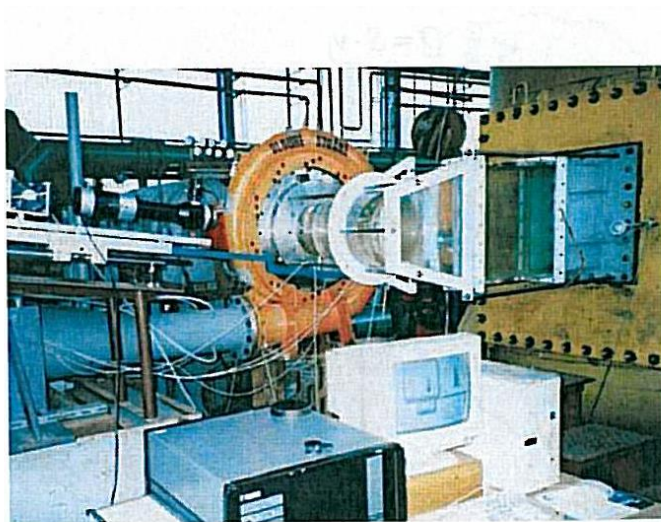


Obr. 2.2.4 Schéma měření průtoků hydrometrickou vrtulí [2]

Výsledky měření průtoků jsou zaneseny do tabulky denních průtoků (viz. Tabulka 4.1 o hydrologických poměrech MVE Perknov), ze které je vycházeno při návrhu hlavních rozměrů turbíny. [2]

2.1.2 Teorie podobnosti hydraulických strojů (měrné otáčky turbíny)

Při návrhu turbíny pro VD a při konstruování hydraulických strojů obecně se využívá teorie fyzikální podobnosti. Cílem je najít vazby mezi veličinami určujícími vodní dílo (spád „H“ a průtok „Q“) a geometrií rychlostních trojúhelníků. Pro posouzení rychloběžnosti turbíny jsou používány tzv. „měrné otáčky“. [2]



Modelová turbína PVE Dlouhé Stráně v laboratoři



Skutečné oběžné kolo (ø 4 540 mm)



Skutečná spirály turbíny

[15]

Obr. 2.2.7 Model a skutečnost [2]

Při určování měrných otáček dle průtoku se vychází z geometrické podobnosti rychlostních trojúhelníků skutečné a modelové turbíny, tj. takové, která při spádu $h = 1$ m zpracovává průtok $Q = 1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Měrné otáčky podle průtoku:

$$N_q = N \cdot \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{h^{\frac{3}{4}}} \text{ [ot} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2.4)$$

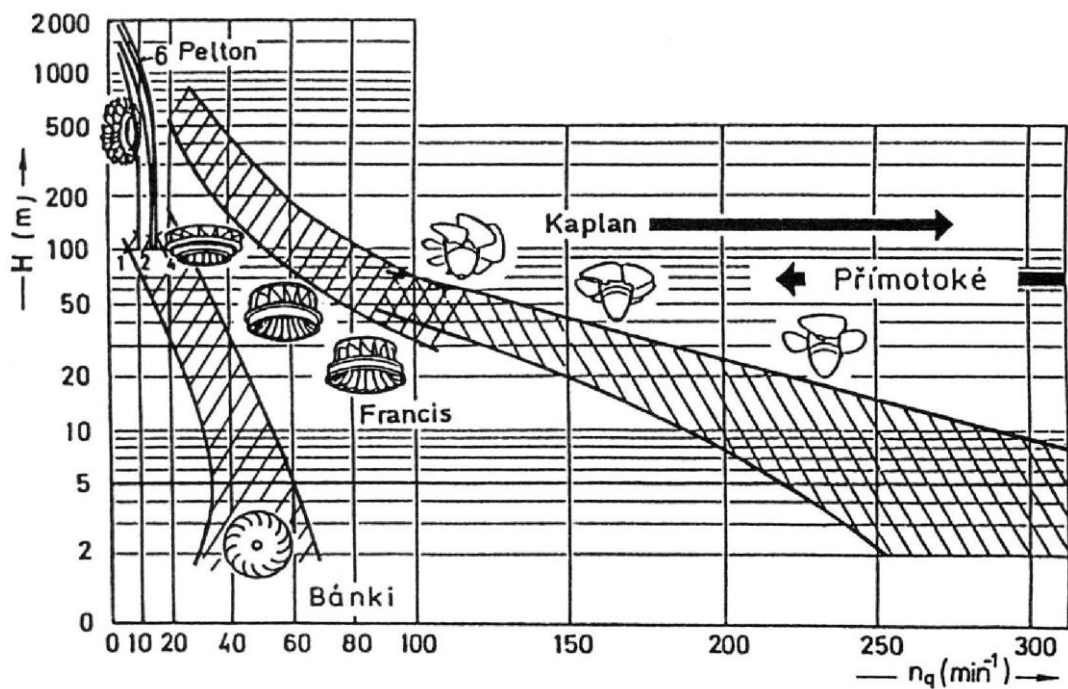
Kde:

N ... jsou otáčky turbíny [$\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$]

Q ... je průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

h ... je užitný spád [m][1]

K volbě typu turbíny je použit diagram na obr. 2.2.8, kde na svislé ose je znázorněn spád v metrech (H) a na vodorovné ose jsou měrné otáčky za minutu (N_q).



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

2.1.1 Eulerova turbínová věta

Vztah mezi výkonem a rychlostmi kapaliny v oběžném kole popisuje Eulerova turbínová věta. Na obr 2.2.5 jsou schematicky znázorněny rychlostní poměry na lopatce rotoru radiální přetlakové turbíny. [1]

$$P = \rho \cdot Q (\vec{u}_1 \cdot \vec{c}_1 - \vec{u}_2 \cdot \vec{c}_2) \text{ [W]} \quad (2.3)$$

Kde:

ρ ... je hustota vody [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

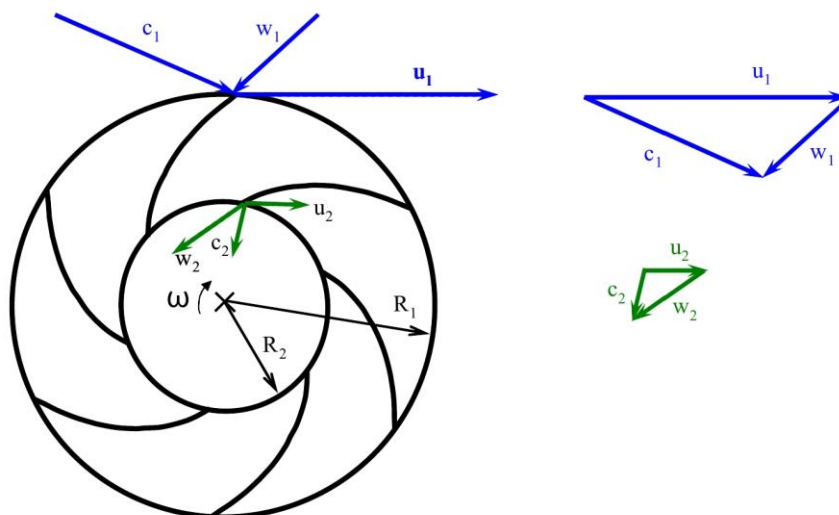
Q ... je průtok [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]

\vec{u}_1 ... je unášivá rychlost na vstupu do oběžného kola [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

\vec{c}_1 ... je absolutní rychlost na vstupu do oběžného kola [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

\vec{u}_2 ... je unášivá rychlost na výstupu z oběžného kola [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

\vec{c}_2 ... je absolutní rychlost na výstupu z oběžného kola [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] [1]



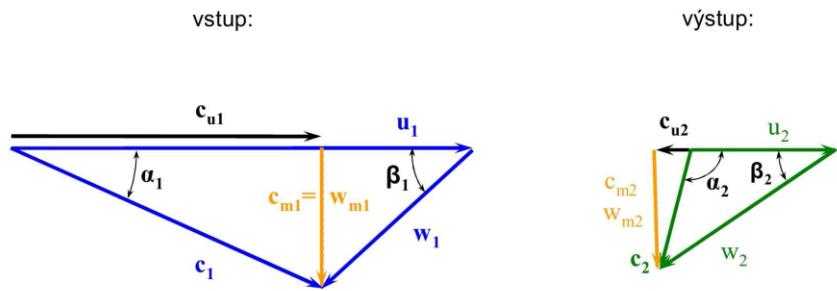
c ... absolutní rychlost (voda vůči okolí, pozorovateli)

u ... unášivá rychlost (oběžné kolo vůči okolí, pozorovateli)

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 na vnějším obvodu je rovnoměrně ostřikováno. 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) úhel α_1 . Proud vody je odkloněn lopatkou, jejíž náběžný úhel je β_1 . Relativní rychlost kapaliny vzhledem k oběžnému kolu, která je značena \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 | c_u ... průmět absolutní rychlosti do rychlosti unášivé |
| β ... úhel sklonu lopatky | c_m ... průmět absolutní rychlosti do rychlosti meridiánové |
| | w_m ... průmět relativní rychlosti do rychlosti meridiánové |

Obr. 2.2.6 Schéma rychlostních trojúhelníků [2]

2.1.2 Kavítace

Nežádoucí jev spojený se vznikem a zánikem bublin v proudící kapalině se nazývá kavítace. Při ní dochází k napadání a rozrušování materiálu oběžného kola turbíny a ke zvýšení hluku včetně vibrací celého zařízení. S tímto jevem musí být počítáno při návrhu turbín. [13]

Fyzikální podstatou kavítace je snížení tlaku v kapalině až na tzv. „tlak nasycených par“ odpovídající dané teplotě kapaliny, při kterém dochází k odpařování kapaliny a vzniku malých bublinek vyplněných vodní parou. Při vstupu bublinek do oblasti vyššího tlaku dochází ke kondenzaci vodní páry a do nich pak vniká okolní kapalina vysokou rychlostí za vzniku velkého rázu. Pokud k tomuto rázu dojde na povrchu pevného materiálu nebo v jeho bezprostřední blízkosti, potom při dlouhodobém působení dochází k mechanickému rozrušení daného materiálu. [13]

Jako další možnost vzniku kavítace je působení nerozpuštěných plynů a pevné částice, které se s danou kapalinou špatně smáčejí. Nestejnorodá místa v kapalině narušují „tahovou pevnost kapaliny“ (soudržnost) a tvoří zárodky budoucí kavítace neboli tzv. „kavitační jádra.“ Mezi molekulárními vrstvami kapaliny působí značné síly, k jejichž překonání je potřeba dosáhnout určitého napětí (tzn., že kapalina vykazuje určitou soudržnost neboli „pevnost v tahu“), která je u vody závislá na teplotě a dosahuje svého maxima přibližně při teplotě 10 °C. U turbín vzniká kavítace převážně v důsledku odtržení proudu kapaliny od obtékaného povrchu. [13]

Nežádoucí důsledky kavítace se projevují v podobě mechanického rozrušení oběžného kola včetně sací trouby (difuzoru). Dále následuje snížení průtoku vody turbínou, snížení celkové účinnosti a zvyšování hluku včetně vibrací. [13]

3. Turbíny používané v MVE

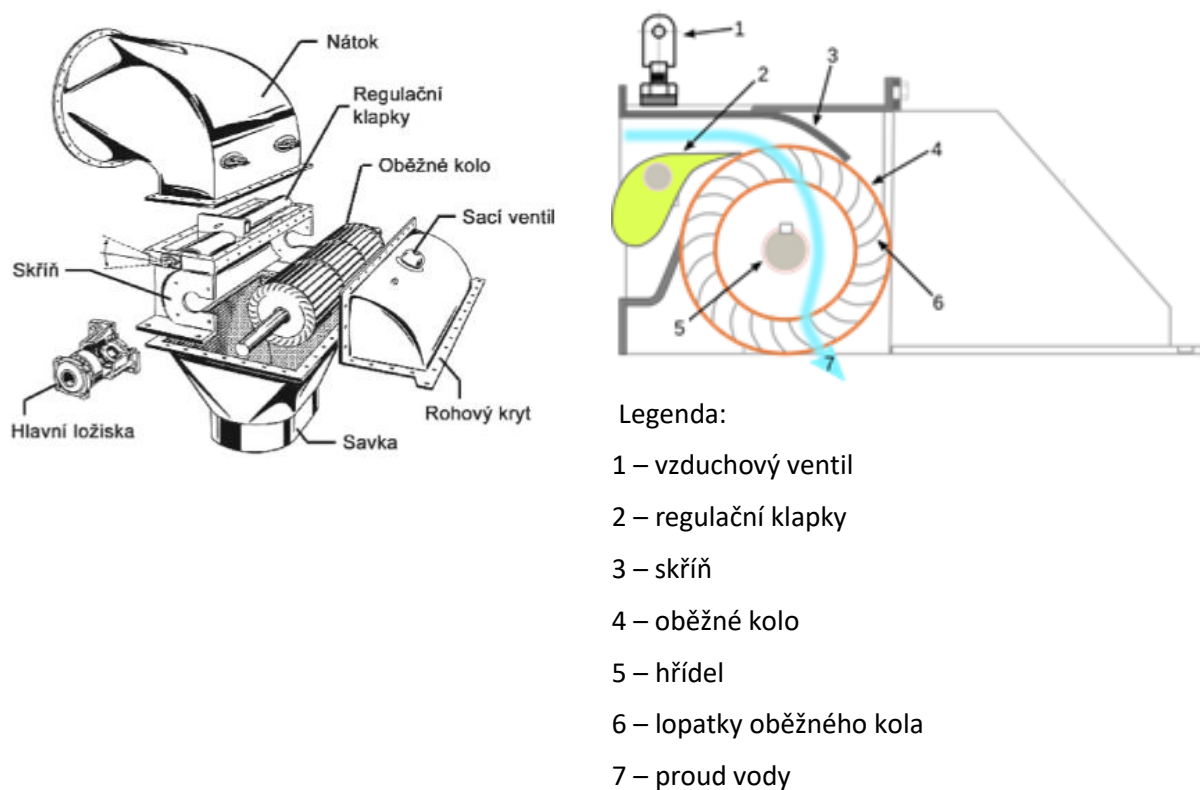
3.1 Bánkiho turbína

Teoreticky byla vynalezena australským inženýrem A. G. M. Mitchelem v r. 1903, ale 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 řazena k jednoduchým rovnotlakým vodním turbínám a vyniká konstrukční jednoduchostí turbíny (viz obr. 3.1.1). Je oblíbena u malých vodních elektráren, kde konstrukce dokonalejších (a tím i dražších) typů turbín by nebyla ekonomicky výhodná. Celková účinnost této turbíny se pohybuje mezi 70 až 85 %. [1]

Konstrukce oběžného kola Bánkiho turbíny sestává ze dvou kruhových desek, která tvoří čela rotoru. Mezi nimi jsou jednoduché lopatky válcového tvaru. Kolo je uloženo ve skříni. Při průtoku lopatkami oběžného kola je energie proudu vody převedena v rotační energii hřídele oběžného kola. [12] [1]

Z hlediska typového zařazení se jedná o rovnotlakou, příčně dvojnásobně protékanou turbínu s parciálním ostřikem. [12]



Obr. 3.1.1 Schématické znázornění Bánkiho turbíny [2] [14]

3.1.1 Použití Bánkiho turbíny

Využití Bánkiho turbíny je velmi široké a vyhovuje zejména pro malé vodní toky. Přednosti jejího použití jsou následující:

- Charakteristika Bánkiho turbíny vykazuje dobrou účinnost v rozsahu jejího plnění od 30 do 100 %.
- Je výrobně snadno realizovatelná i v amatérských podmínkách.
- Nevyžaduje použití žádných speciálních materiálů.
- Jednoduchá regulace.
- Není náchylná ke kavitaci.
- Hřídelová ložiska jsou mimo vodu, takže je možno pracovat i s pitnou vodou bez nebezpečí jejího znečištění.
- Dělením do více sekcí ji lze snadno regulovat a přizpůsobit hydrologickým podmínkám lokality. [12]

3.2 Francisova turbína

V roce 1826 Benoit Fourneyron vyvinul vysoce efektivní vodní turbínu (účinnost 80 %) s tangenciálním vstupem vody. Jemu předcházel Jean-Victor Poncelet, který vyvinul v roce 1820 turbínu na podobném principu. V roce 1838 S. B. Howd získal v USA patent pro další turbínu tohoto typu. [15]

James B. Francis v roce 1848 vylepšil předchozí turbíny a celkově zvýšil jejich účinnost až na 90 %. Značně pozvedl technologii návrhu a stavby turbín kombinací výpočtů a experimentálních měření, což je základem návrhu maximálně efektivní turbíny přesně vyhovující požadavkům na konkrétní zařízení v dané lokalitě. [15]

Základní rysy Francisovy turbíny jsou:

- Přetlaková turbína, tj. oběžné kolo mění vedle kinetické i tlakovou energii kapaliny.
- Vstup vody do turbíny je řešen pomocí spirální skříně, nebo u nízkých spádů nátokem z kašny.
- Pomocí rozváděcích lopatek je voda směrována na oběžné kolo.
- Lopatky rozváděcího kola bývají konstruovány jako stavitelné, čímž lze regulovat průtok.
- Oběžné kolo opouští voda axiálně, tj. ve směru osy hřídele turbíny.

3.2.1 Použití Francisovy turbíny

Ve dvacátých a třicátých letech minulého století, kdy je zaznamenáván největší rozvoj využití vodní energie, nebyla Kaplanova turbína ještě dostatečně ověřena, aby mohla konkurovat Francisově turbíně. Pro střední průtoky a střední spády se tedy využívala velmi často Francisova turbína. V historickém přehledu je uvedena u malých spádů a průtoků. [15]

Reverzní Francisovu turbínu lze využívat i pro čerpání, což nalézá uplatnění u přečerpávacích elektráren. Největší reverzní turbíny má vodní elektrárna Dlouhé Stráně, která používá dvě reverzní Francisovy turbíny. Tyto jsou největší reverzní turbíny v Evropě a každá má výkon 325 MW.

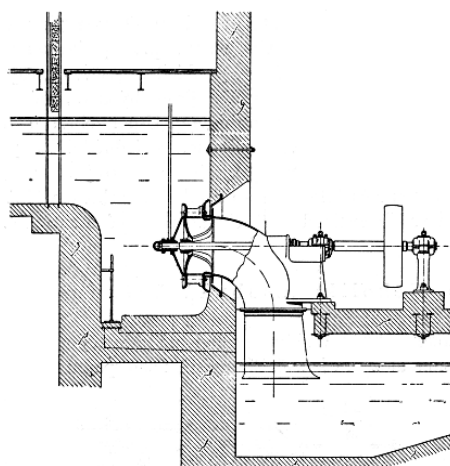
U malých vodních elektráren existuje řada kombinací konstrukčně-stavebního provedení:

- Dle přívodu vody k oběžnému kolu (spirální skříní, kašnou).
- Uložení hřídele (vertikální a horizontální).
- Druhu sací trouby (mokrý, suchý). [15]

Některá řešení budou popsána dále.

3.2.2 Francisova turbína horizontální kašnová

Nejrozšířenějším stavebně-technickým řešením byla v minulosti horizontální kašnová Francisova turbína (viz. schéma na obr. 3.2.1). Byla vyráběna v typizovaných výrobních řadách, odstupňovaných podle průměru oběžného kola. Většinou jí byla osazována derivační vodní díla s otevřeným přivaděčem nebo tlakovým přivaděčem, avšak s otevřenou kašnou. Pro pohon mlýnů, pil u drobných živností se nejčastěji používala jako hlavní nebo doplňkový přímý mechanický pohon. [12]



Obr. 3.2.1 Horizontální kašnová Francisova turbína [4]

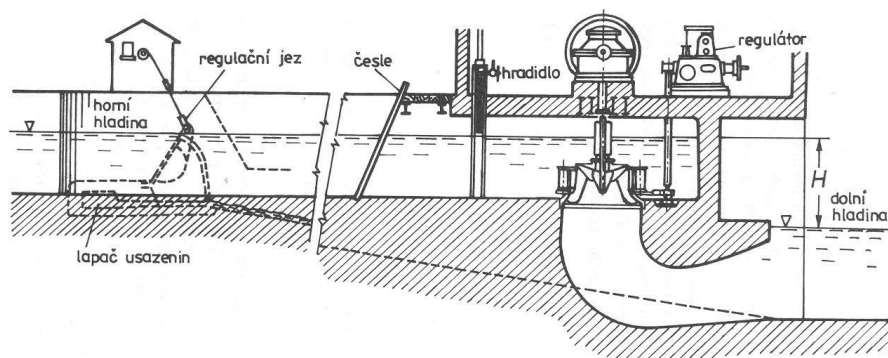
Výše uvedené uspořádání bylo v minulosti používáno na spádech od 2 do 8 metrů při malých a středních průtocích (přibližně od 100 do 2000 l.s⁻¹).

3.2.3 Francisova turbína vertikální kašnová

Základní rozdíl v uspořádání mezi horizontálně a vertikálně uloženou turbínou spočívá v tom, že u vertikálně uložené turbíny je výrazné zjednodušení převodu díky hřídeli vycházejícímu z turbíny přímo do prostoru strojovny. K přenosu otáčivého pohybu byl nejčastěji používán řemenový převod. Moderní rekonstrukce využívají zpravidla řemenový převod, přičemž pomaluběžný generátor je vertikální. Na obr. 3.2.2 je schéma provedení vertikální kašnové Francisovy turbíny. Tato v minulosti byla hojně rozšířeným přetlakovým vodním motorem. Byla využívána v nížinách na větších řekách

většinou u vodních děl jezových nebo derivačních s otevřeným přivaděčem. Používala se nejčastěji jako hlavní mechanický pohon větších mlýnů, městských elektráren a průmyslových závodů. V případě dobrého technického stavu těchto strojů jsou i v dnešní době po rekonstrukci nadále provozovány v MVE. [12]

Použití tohoto technického řešení je obvyklé na spádech od 1,5 metru při středních a velkých průtocích (přibližně od $0,6$ do $8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). [12]



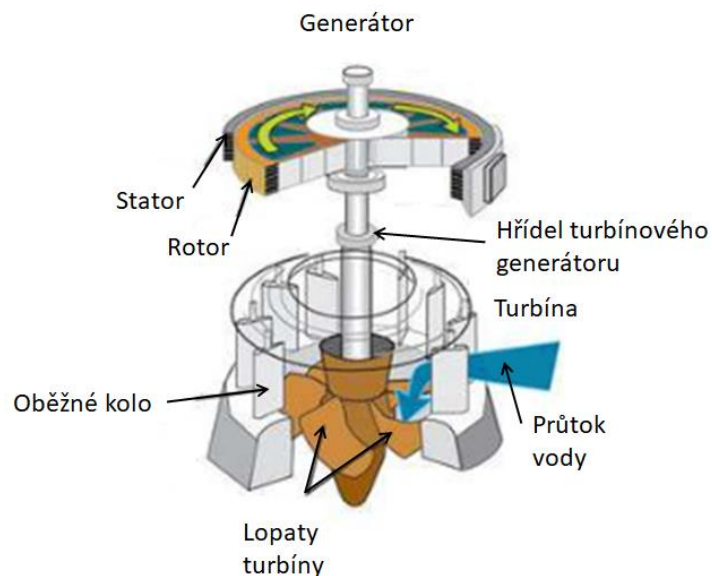
Obr. 3.2.2 Vertikální kašnová Francisova turbína [5]

Turbína je umístěna na dně kašny zaplněné vodou. Svislý hřídel turbíny vede vzhůru do strojovny. Regulovatelné rozváděcí lopatky jsou po celém obvodu turbíny. Při průtoku těmito lopatkami získává voda 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 oběžnému kolu. Po opuštění oběžného kola se voda odvádí do odpadního kanálu. Z důvodů snadné údržby a oprav je turbína situována nad spodní hladinou a voda z ní je odváděna sací troubou. Při práci turbíny mimo jmenovitý průtok (a to je vzhledem k našim hydrologickým poměrům často), dochází za oběžným kolem k rotaci vodního sloupce v sací troubě. Tato má kruhový průřez, a je-li zahnutá může mít i mírně oválný průřez. Snižování rychlosti vody při průchodu sací troubou je způsobeno jejím rozšiřováním průměru, což vytváří podtlak, který se přenáší na odtokovou stranu oběžného kola. Díky tomu vzniká sací efekt, čímž turbína využívá celý spád, přestože oběžné kolo je nad hladinou vývařistě. [12]

3.3 Kaplanova turbína

Vynálezcem této turbíny byl profesor brněnské techniky Viktor Kaplan, který v letech 1910 – 1912 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 95 %. Další prototyp byl úspěšně vyzkoušen v poděbradské elektrárně. Ale do 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 díky tomu 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 je řazena mezi dobře regulovatelné reakční přetlakové axiální turbíny. Toho se využívá především v místech, kde není možné zajistit stálý průtok nebo spád. Na rozdíl od Francisovy turbíny se liší menším počtem lopatek, tvarem oběžného kola a možností regulace náklonu lopatek u oběžného i rozváděcího kola (viz obr. 3.3.2). Účinnost Kaplanovy turbíny je vyšší než dříve popisované Francisovy, ale za cenu výrazně vyšší složitosti a pořizovacích nákladů. Dle rozdílu hladin bývá instalována s vertikální a nebo horizontální osou otáčení. [1] [16]



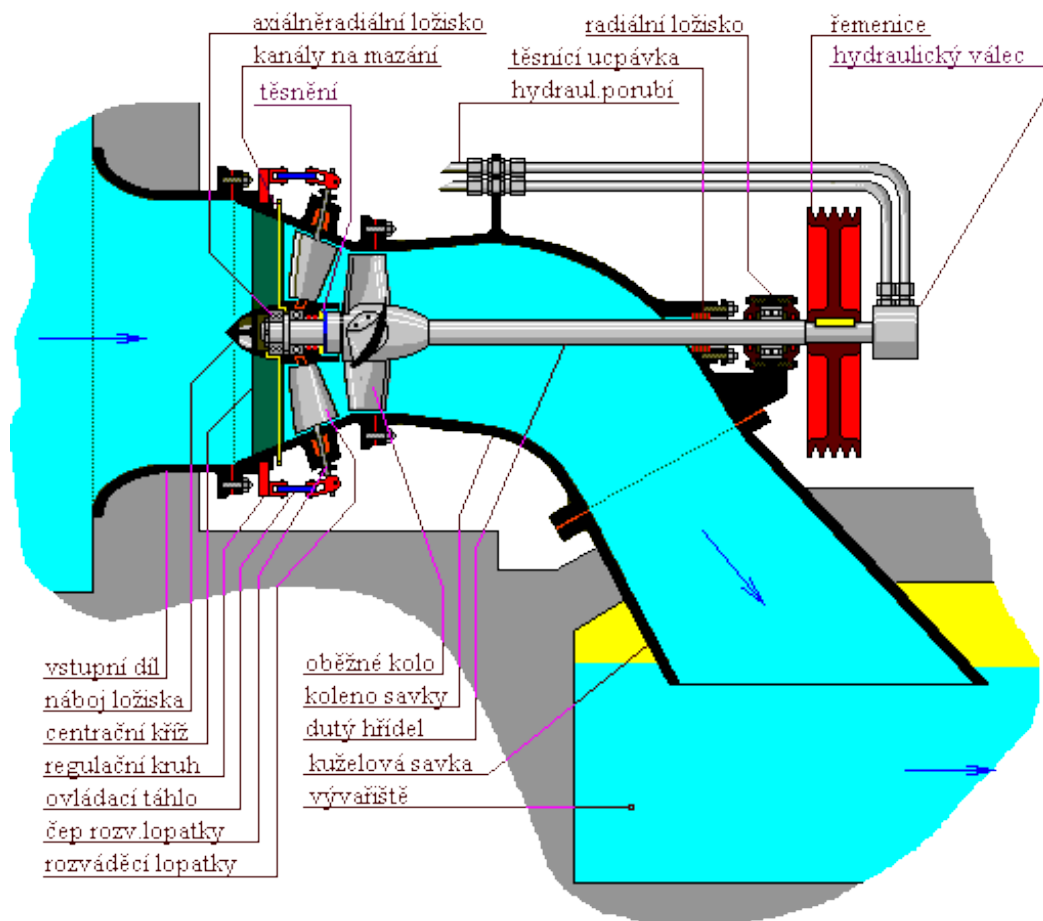
Obr. 3.3.2 Náboj oběžného kola s natáčením lopatek [4]

Oběžné kolo bez vnějšího věnce má oběžné lopatky upevněny natáčivě v náboji kola. Lopatky jsou ovládané regulačním mechanismem osazeným uvnitř náboje kola. Osa čepů lopatek svírá s osou náboje úhel 90° . U standardních provedení se jejich plynulé natáčení provádí za provozu stroje. Rozvaděč, který může být řešen jako radiální, diagonální až téměř axiální, má rovněž natáčivé lopatky, ovládané vlastním regulačním mechanismem. Změna polohy oběžných a rozváděcích lopatek je prováděna současně, vázaně. U turbín větších výkonů je obvyklé provedení vertikální. Kaplanovy turbíny menších výkonů mohou být i horizontální nebo s mírně šikmou osou rotoru (viz následující popis Semi-Kaplanovy turbíny). [1] [16]

3.3.1 Semi-Kaplanova turbína

Semi-Kaplanova turbína, nebo též S-turbína (viz. schéma na obr. 3.3.3) je situována zpravidla horizontálně a má nejčastější uplatnění na nově budovaných nízkospádových vodních elektrárnách. Svůj název získala od esovitě tvarované sací trouby. Osazují se jí především jezová vodní díla. Též je vhodná pro vodní díla derivační s otevřeným přivaděčem na menších spádech. Používá se výhradně pro pohon generátorů a to především asynchronních, ale díky dobré regulovatelnosti je možné použití i generátoru synchronního s možností dodávky elektřiny do sítě. Při přestavbách starších vodních děl osazených vertikální Francisovou turbínou bývá často nahrazována Semi-Kaplanovou turbínou, která dosahuje lepšího využití toku (díky širšímu regulačnímu rozsahu). [12]

Samotná turbína bývá umístěna přímo ve spodní části strojovny a přes přírubu spojena se vstupním přívodem vody. Voda vtéká do konfuzoru stroje, který se kuželovitě zužuje. Tím se rychlost vody zvýší. Následně míjí centrační kříž, který drží hlavici náboje 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 dovoľoval změnu sklonu lopatek oběžného kola bez toho, že by zachytily o stěnu. Počet lopatek oběžného kola je (s ohledem na jejich ovládní) sudý. Nejčastěji jsou čtyři. Jejich zakřivení je voleno tak, aby se mezilopátkové kanály ve směru proudění zužovaly. Voda opouští oběžné kolo s poměrně značnou zbytkovou energií. Tu však následně využívá sací trouba turbíny a transformuje ji na zápornou tlakovou energii, která podporuje průtok vody strojem. Turbína musí být vždy současně regulována rozváděcími i oběžnými lopatkami tak, aby bylo proudění vody na výstupu z oběžného kola rovnoběžné s hřídelem, bez parazitní rotace. V opačném případě dochází v sací troubě ke značným ztrátám, poklesu účinnosti stroje a ztrátě většiny výhod, které Kaplanova turbína ve srovnání s jinými vodními motory přináší. Sací trouba končí ve vývařišti. Její okraj musí být i při zastavené turbíně pod hladinou. U větších strojů sací trouba plynule přechází do vodorovně orientovaného obdélného průřezu, který se rozšiřuje a plynule přechází do odpadního kanálu. [12]



Obr. 3.3.3 Schéma Semi Kaplanovy turbíny [12]

3.3.2 Výhody a nevýhody Semi-Kaplanovy turbíny

Předpokládaná oblast použití Semi-Kaplanovy turbíny je díky jejímu konstrukčnímu uspořádání vhodná pro využití spádů od 1,5 do cca 5,5 metrů a průtoků od 250 do 6000 litrů za sekundu. Nejčastěji jí však nalezneme na spádech od 2 do 4 metrů při průtocích od 500 do 3000 litrů za sekundu.

Mezi výhody patří nižší náklady na stavební úpravy bez potřeby kašny a hlubokého vývaňště. Díky vodorovně vyvedenému hřídeli má toto řešení generátor umístěn dostatečně vysoko, což jej často uchrání před zatopením. Přenos výkonu z hnacího hřídele na generátor je u menších turbín realizován řemenovým převodem (několika 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.

Malá stavební výška dovoluje instalaci do malých strojoven u jezových elektráren a nebo uvnitř jezových pilířů v podobě kompaktního technologického bloku. Regulace rozváděče 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 vstupem do turbíny je osazen pouze havarijní uzávěr. Bývá jím nejčastěji stavidlo, u větších spádů klapka nebo hradící deska.

K nevýhodám je přisuzována 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

skutečně opodstatněné jejich hydrologickým charakterem. Mezi takové patří lokality bez možnosti akumulace vody a 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 (stejně jako většina rychloběžných strojů) je citlivý na dodržení přesného spádu, otáček a správně seřízené regulační vazby mezi rozvaděčem a oběžným kolem. [12]

4. MVE Perknov

V rámci zpracování diplomové práce byla pro technicko – ekonomické hodnocení vybrána MVE Perknov u Havlíčkova Brodu. V následujícím textu je její popis a dále je proveden výpočet hlavních rozměrů pro variantní řešení s Kaplanovou turbínou. V závěru je uvedena ekonomická rozvaha, která je zaměřena na posouzení ekonomické výhodnosti při použití Francisovy a Kaplanovy turbíny.

4.1 Lokalita

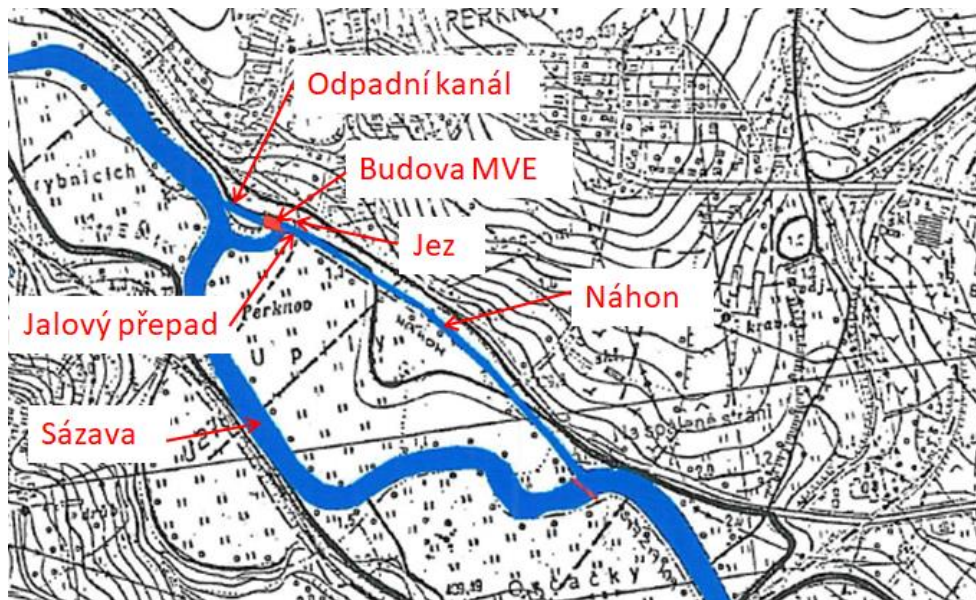
4.1.1 Popis lokality

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

Podle historicky nejstarších zpráv o využívání toku řeky Sázavy zde byl mlýn s korečником pro mletí obilnin. Postupnou přeměnou procházel až do začátku 30. let 20. století. Tehdy byla vodní energie využívána v textilním průmyslu pro pohon cupovacích strojů. Další změna nastala v roce 1939, kdy byl vystavěn nový mlýn již 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 1992. [6]

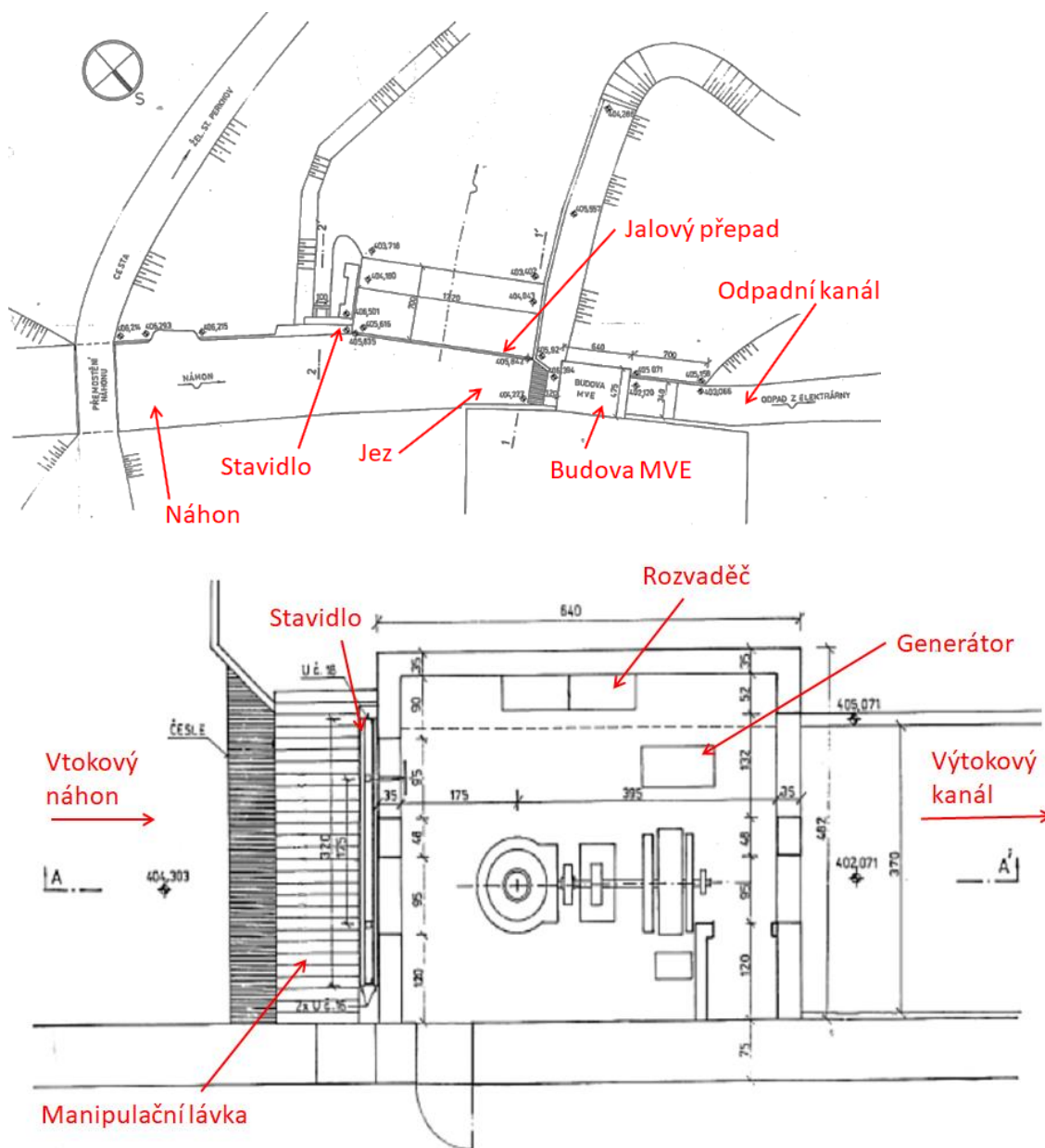
Do současného stavu, tj. na výrobu el. energie, bylo vodní dílo po roce 1992 přestavěno na malou vodní elektrárnu, kdy bylo v restitucích vráceno původnímu majiteli p. Kubešovi. K modernizaci elektrárny dle současné dispozice došlo v roce 2007. [6]

Na obr. 4.1 je zobrazená přehledná situace MVE Perknov. Voda je odkloněna od toku řeky Sázavy a je přivedena náhonem přes jez k budově MVE. Po té co proteče voda strojovnou, je svedena odpadním kanálem zpět do původního toku. V případě malého nebo naopak velkého průtoku je voda odvedena přes jalový přepad kolem budovy MVE.



Obr. 4.1 Situace – umístění MVE Perknov [6]

Na obr. 4.2 je podrobná situace MVE Perknov, kde jsou zobrazeny detaily jako např. stavidlo pro snížení hladiny v náhonu a dále dispozice strojovny MVE.



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

4.1.2 Hydrologické poměry MVE Perknov

Plocha povodí v úseku pro MVE Perknov:	784,1 km ²
Průměrný dlouhodobý roční úhrn srážek:	698,5 mm
Průměrný dlouhodobý roční průtok (Qa):	5,985 m ³ ·s ⁻¹
Maximální hltnost turbíny:	2,5 m ³ ·s ⁻¹
Spád:	2,2 m [6]

Nezbytným podkladem pro realizaci MVE patří tzv. odtokové křivky, nebo-li M-denní průtoky. M-denní průtok (viz tab. 4.1) je průměrný denní průtok dosažený během M-dní v roce. Hodnoty jsou uvedeny v manipulačním řádu nebo je na základě žádosti poskytne Český hydrometeorologický ústav. M-denní průtoky patří mezi základní hydrologické údaje a jejich hodnoty jsou využívány pro stanovení minimálního zůstatkového průtoku.

Tabulka 4.1 Hodnoty M-denních průtoků pro MVE Perknov [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

K dalším hydrologickým charakteristikám lokality patří N-leté průtoky (viz tab. 4.2), které jsou odvozeny na základě maximálních průtoků ze sítě vodoměrných stanic a představují velké vody opakující se jednou za N-leté období.

Tabulka 4.2 Velké vody opakující se jednou za (N – leté období) [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

4.1.3 Koncepční řešení MVE

Vodní dílo je řešeno jako derivační při pravém břehu toku řeky Sázavy. Náhon, kterým je přiváděna voda z hlavního toku řeky na 160,146 říčním kilometru, je lichoběžníkového průřezu s přírodními břehy. Jez (viz obr. 4.3) je z monolitického betonu s hrazenou propustí, který je na kótě 406,018 m. n. m.. Jeho hranu lze nastavit pomocí náplatků a dřevěných hradítek. [6]

Jez:

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

Náhon k elektrárně:

Délka:	610	m
Hrazení náhonu:	není	

Pro nadbytek průtoku, který by přehlcoval turbínu, je zřízen jalový boční přeliv, který je zobrazen v řezu na obr. 4.6 a na fotografii na obr. 4.4. Je situován před strojovnu MVE (viz. podrobná situace na obr. 4.2). Délka jeho koruny je 17,2 m. Výška přelivu je nastavitelná pomocí 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. 4.7) o šířce 1 m sloužící k vypouštění 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 mm a je z dřevěných trámců zasazených do svařeného ocelového rámu. Jako ochrana před vtokem nežádoucích předmětů slouží jemné česle (na obr. 4.5) vyrobené z pásové oceli o tloušťce 5 mm. [6]

Jalová propust:

Umístění:	před bočním přelivem	
Šířka:	1	m
Hrazení:	stavidlo	[6]

Jezová zdrž:

Maximální délka vzdutí:	1300	m (k jezu v H. Brodu)
-------------------------	------	-----------------------



Obr. 4.3 Foto jezu [vlastní zdroj]



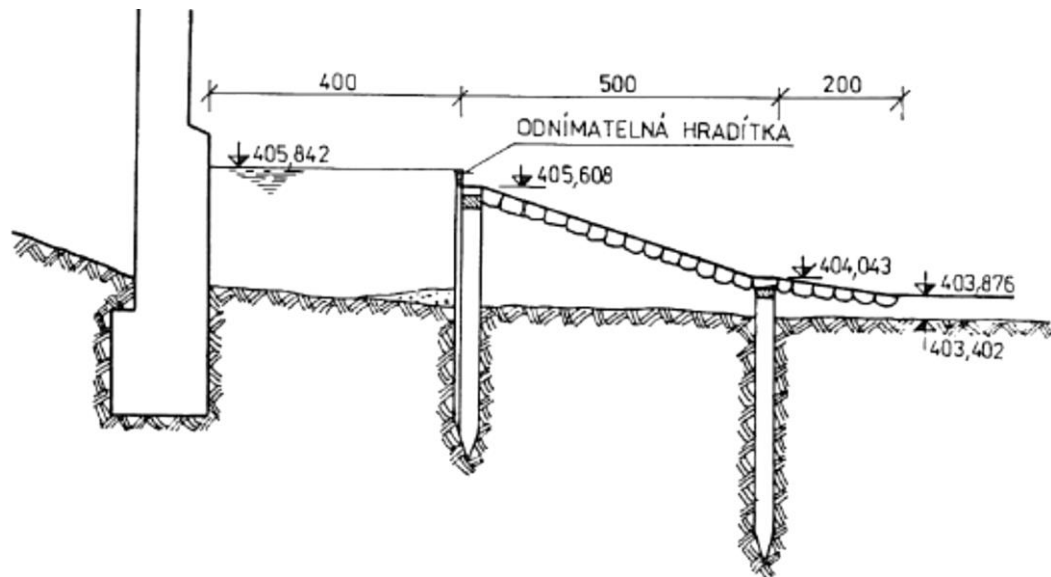
Obr. 4.4 Foto boční přelivné hrany [vlastní zdroj]



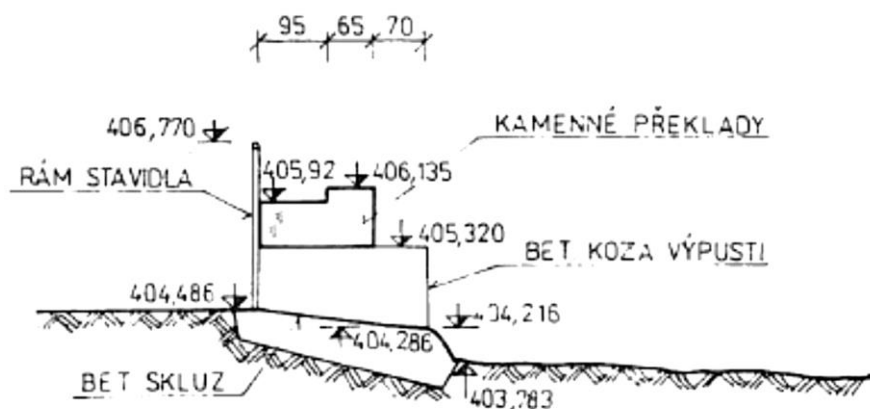
Obr. 4.3 Foto jezu [vlastní zdroj]



Obr. 4.5 Foto česlí [vlastní zdroj]



Obr. 4.6 Řez jezem elektrárny [6]



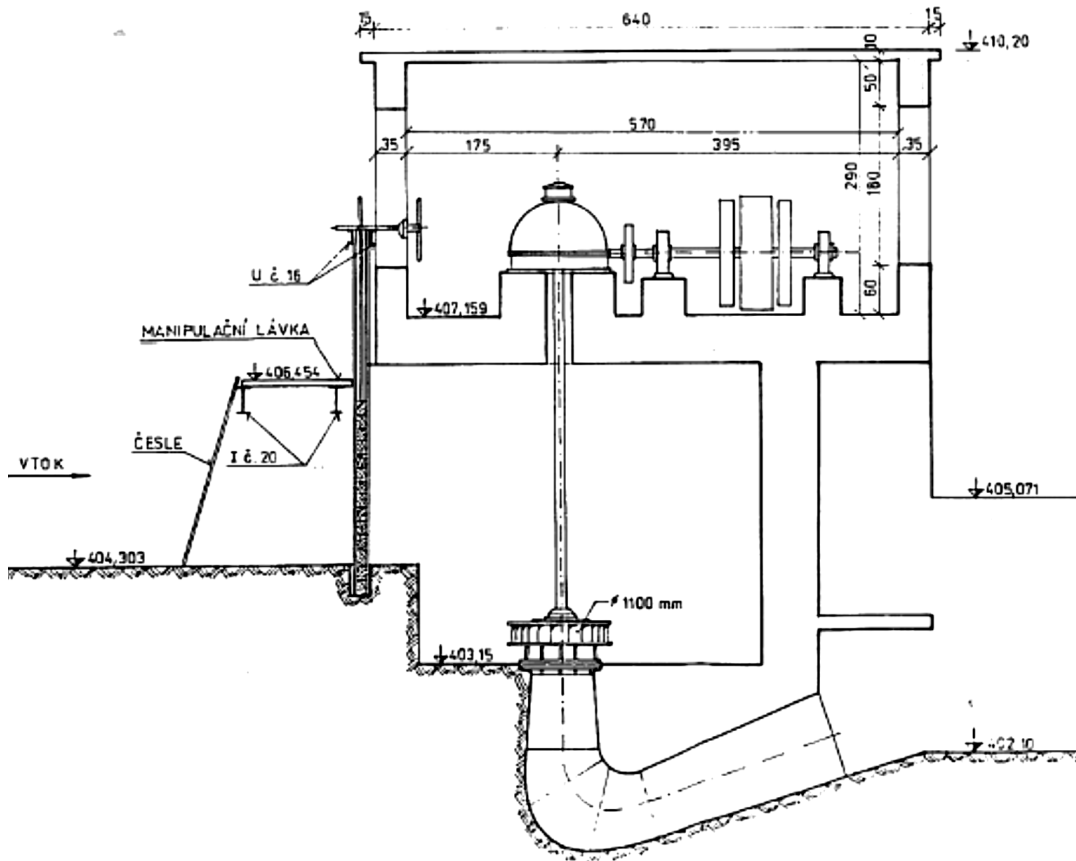
Obr. 4.7 Řez jezem elektrárny [6]

V roce 1992 byla k objektu přistavěna strojovna MVE. V prvním podzemním podlaží je umístěna Francisova turbína s vertikálně uloženým hřídelem (viz foto na obr. 4.10 a svislý řez na obr. 4.8). Celé soustrojí je navrženo z užitého spádu 2,2 m a maximální hltnosti $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Turbína je vybavena automatickou hladinovou regulací. Průtok turbínou je regulován rozváděcím kolem. Pro maximální využití spádu je vybudována betonová sací trouba kolenového typu, která je vyústěna do odpadního kanálu o rozměrech 3,5 x 3,4 m. Odpadní kanál 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 plochým řemenem z hřídele přes převodovku na asynchronní generátor s vertikální osou (viz foto na obr. 4.9). [6]

Turbína:

Typ:	Francisova
Rok výroby:	1939
Výrobce:	fa Prokop Pardubice
Průměr oběžného kola	1 100 mm
Otáčky turbíny:	110 ot·min ⁻¹ [6]



Obr. 4.8 Svislý řez A – A' - viz. Obr. 4.2. [6]



Obr. 4.9 Foto vybavení strojovny [vlastní zdroj]



Obr. 4.10 Foto repasované Francisovy turbíny [vlastní zdroj]



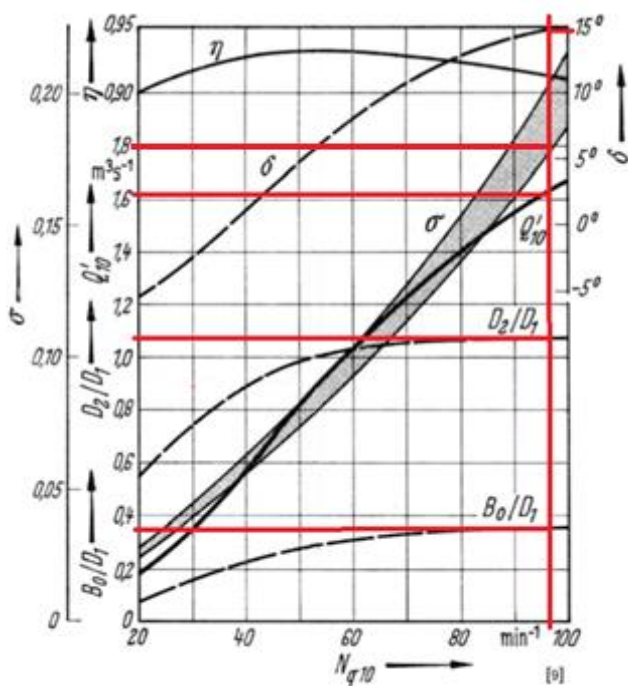
Obr. 4.11 Foto výusti MVE Perknov [vlastní zdroj]

4.1.4 Manipulace s vodou

MVE je provozována v závislosti na průtoku řeky Sázavy a to tak, aby hladina na jezu v Perknově neklesla pod úroveň přelivné hrany. Zůstatkový průtok je z hygienický důvodů (výtok z ČOV Havlíčkův Brod) nutno udržovat na hodnotě $0,85 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. MVE je běžně provozována v rozsahu výkonu 10 – 35 kW, tj. při hltnosti turbíny cca $0,7 - 2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Při výkonu menším než 10 kW se MVE odstavuje a veškerý průtok je převáděn přes jezové těleso a boční přeliv u MVE. [6]

4.2 Výpočet hlavních rozměrů Francisovy turbíny MVE Perknov

V následujících odstavcích jsou uvedeny výchozí podmínky pro stanovení hlavních rozměrů Francisovy turbíny, jejichž výsledky jsou následně porovnány s parametry skutečné turbíny. Výpočet hlavních rozměrů vychází z teorie podobnosti hydraulických strojů popsané v kapitole 2.1.2. V první fázi výpočtu je nezbytné si zvolit typ turbíny na základě diagramu (obrázek 2.2.8), kde je nutné znát hodnoty užitého spádu a měrných otáček. Po té je možné určit průměr oběžného kola na základě porovnání průtoků mezi navrhovanou a tzv. etalonovou turbínou, jejíž průměr je roven jedné. Další rozměry se určí z diagramu na obr. 4.12, geometrie lopatek a z rychlostních trojúhelníků.



Obr. 4.12 Diagram pro určení hlavních rozměrů Francisovy turbíny [1]

Průtok etalonovou turbínou (dle diagramu na obr 4.12):

$$Q' = 1,61 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.1)$$

Měrné otáčky:

$$N_q = N \cdot \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{h^{\frac{3}{4}}} = 110 \cdot \frac{2,5^{\frac{1}{2}}}{2,2^{\frac{3}{4}}} \quad (4.6)$$

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

Kde:

N ... jsou otáčky turbíny [N = 110 ot·min⁻¹], viz manipulační řád

Q ... je průtok [Q = 2,5 m³·s⁻¹], viz manipulační řád

h ... je užitiný spád [h = 2,2 m], viz manipulační řád [6]

Vnější průměr rotoru:

$$D_1 = \left(\frac{Q}{Q'}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{h^{\frac{1}{4}}} = \left(\frac{2,5}{1,610}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{2,2^{\frac{1}{4}}} \quad (4.2)$$

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

K určení celkového výkonu elektrárny musí být započtena celková účinnost složená z účinnosti turbíny, elektrického generátoru a z účinnosti převodu mezi turbínou a generátorem.

Celková účinnost:

$$\eta_c = \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_{př} \cdot \eta_{tr} = 0,87 \cdot 0,86 \cdot 0,93 \cdot 0,92 \quad (4.3)$$

$$\eta_c = 0,6$$

Kde:

η_t ... je účinnost turbíny [0,87-0,88] (dále uvažováno s hodnotou 0,87)

η_g ... je účinnost generátoru [0,85-0,97] (dále uvažováno s hodnotou 0,86)

$\eta_{př}$... je účinnost převodu převodovkou [0,92-0,97] (dále uvažováno s hodnotou 0,93)

η_{tr} ... je účinnost transformátoru [0,92-0,98] (dále uvažováno s hodnotou 0,92) [5]

Celkový výkon elektrárny:

$$P_T = g \cdot h \cdot Q \cdot \eta_c = 9,81 \cdot 2,2 \cdot 2,5 \cdot 0,640 \quad (4.4)$$

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

Kontrola maximální přípustné sací výšky:

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

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

$$h_s = 5,2 \text{ m}$$

(4.5)

Kde:

P_b ... je minimální atmosferický tlak okolí [95 kPa]

P_d ... je tlak nasycených par [4 kPa]

σ ... je Thomův kavitační součinitel [1,8]

Dle diagramu na obr. 4.12

4.2.1 Francisova turbína – porovnání výpočtu hlavních rozměrů se skutečností

Z výpočtů hlavních rozměrů Francisovy turbíny lze se skutečností porovnávat tři základní charakteristiky:

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

Skutečný průměr oběžného kola je 1100 mm. Výpočet udává hodnotu 1095 mm.

Skutečná sací výška musí být menší než vypočtená hodnota. Dle obr 4.8 je zjištěno, že sací výška je rozdíl hladin $403,15 - 402,10 = 1,05$ m. Skutečná sací výška je menší než vypočtená $h_s = 5,2$ m, viz vzorec 4.5.

Závěrem lze konstatovat, že při zvoleném průtoku $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ byl spočten celkový výkon elektrárny $P_T = 34,5$ kW. Tento spočtený výkon je v rozsahu štítkových hodnot výkonu současného generátoru MVE Perknov, které jsou v rozmezí 10 – 35 kW.

4.3 Modifikace strojní části MVE Kaplanovou turbínou

Vzhledem k hydroenergetickému potenciálu lokality MVE Perknov připadá též v úvahu Kaplanova turbína. Důvodem zmíněným v kapitole 3.3.1 je vhodnost použití turbíny pro nízkospádové elektrárny a dobrá reakce na proměnlivý průtok řeky. V této kapitole je uveden návrh hlavních rozměrů Kaplanovy turbíny.

4.3.1 Hydroenergetické řešení MVE

Rozhodující vliv při výpočtu výkonu turbíny mají dvě návrhové veličiny:

- Průtok $Q = 2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- Užitiný 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 počítané dle průtoku, viz. odstavec 2.2.3. [1]

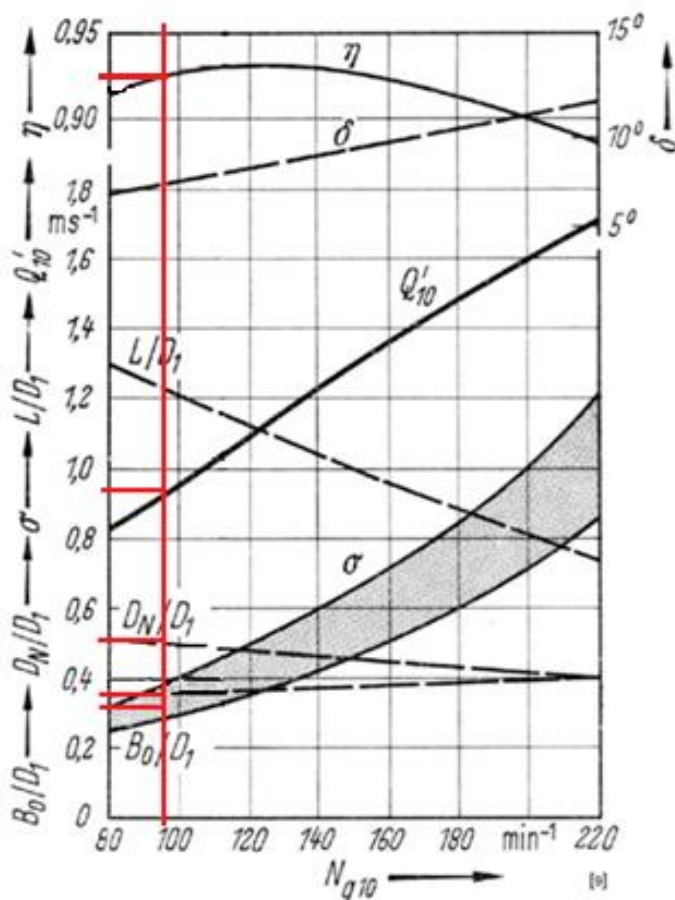
$$N_q = N \cdot \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{h^{\frac{3}{4}}} = 110 \cdot \frac{2,5^{\frac{1}{2}}}{2,2^{\frac{3}{4}}} \quad (4.6)$$

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

Kde:

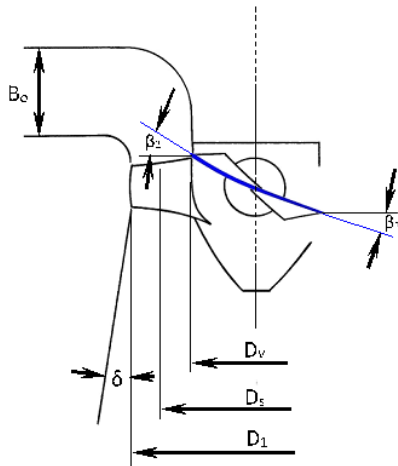
N ... jsou otáčky turbíny [$N = 110 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$], viz manipulační řád [6]

Na základě výpočtu (4.6) a diagramu (obrázek 2.2.8) přicházejí v úvahu dva typy turbín. A to Francisova (v současnosti používaná v MVE Perknov) a Kaplanova. Varianta provedení s Kaplanovou turbínou pro MVE je řešena v následujících kapitolách, kde způsob výpočtu je dle [1].



Obr. 4.13 Diagram pro určení hlavních rozměrů Kaplanovy turbíny [1]

Schématické znázornění vypočtených hodnot je na obr. 4.14:



Obr. 4.14 Schéma výpočtových rozměrů Kaplanovy turbíny [7]

Průtok etalonovou turbínou (dle diagramu na obr 4.13):

$$Q' = 0,935 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.7)$$

Měrná spádová energie:

$$Y_T = g \cdot h = 9,81 \cdot 2,2 \quad (4.8)$$

$$Y_T = 21,582 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$

Skutečný průměr rotoru:

$$D_1 = \left(\frac{Q}{Q'}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{10}{Y_T}\right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{2,5}{0,935}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{10}{21,582}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (4.9)$$

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

Šířka vstupního kanálu (dle diagramu na obr 4.13):

$$\frac{B_0}{D_1} = 0,36 \quad (4.10)$$

$$B_0 = 0,36 \cdot D_1 = 0,36 \cdot 1\,349 \quad (4.11)$$

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

Průměr náboje (dle diagramu na obr 4.13):

$$\frac{D_N}{D_1} = 0,50 \quad (4.12)$$

$$D_N = 0,50 \cdot D_1 = 0,50 \cdot 1\,349 \quad (4.13)$$

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

Počet lopatek rotoru:

$$z = 3 + 0,00875 \cdot Y_T = 3 + 0,00875 \cdot 21,582 \quad (4.14)$$

$$z = 3,2$$

Dle výpočtu 3.36 volím 3 ks lopatek

Rozteč lopatek:

$$T = \frac{\pi \cdot D_1}{z} = \frac{\pi \cdot 1349}{3} \quad (4.15)$$

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

Délka lopatek:

$$L = \frac{T}{T/L} = \frac{1412,669}{0,8} \quad (4.16)$$

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

Kde:

T/L ... je poměrná rozteč lopatek [0,62-0,87] (dále uvažováno s hodnotou 0,8)

Celková účinnost soustrojí:

$$\eta_c = \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} = 0,92 \cdot 0,87 \cdot 0,92 \quad (4.17)$$

$$\eta_c = 0,7$$

Kde:

η_t ... je účinnost turbíny [0,92] (Dle diagramu na obr 4.13)

η_g ... je účinnost generátoru [0,85-0,97] (dále uvažováno s hodnotou 0,87)

η_{tr} ... je účinnost transformátoru [0,92-0,98] (dále uvažováno s hodnotou 0,92) [5]

Elektrický výkon vodního díla na prahu elektrárny:

$$P_T = g \cdot h \cdot Q \cdot \eta_c = 9,81 \cdot 2,2 \cdot 2,5 \cdot 0,736 \quad (4.18)$$

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

Kontrola maximální přípustné sací výšky:

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

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

$$h_s = 8,4 \text{ m}$$

(4.19)

Kde:

P_b ... je minimální atmosferický tlak okolí [95 kPa]

P_d ... je tlak nasycených par [4 kPa]

σ ... je Thomův kavitační součinitel [0,33] dle diagramu na obr 4.13

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 dokáže efektivněji využívat a regulovat proměnlivý průtok (podrobněji uvedeno v odstavci 3.3) a celkové množství vyrobené energie během jednoho roku by bylo vyšší než u použité Francisovy turbíny. Avšak rekonstrukce MVE s použitím Kaplanovy turbíny by byla finančně náročnější a návratnost investice delší. Následující kapitola je věnována ekonomickému rozboru obou variant řešení.

5. Ekonomické porovnání obou typů turbín

Projekt porovnává technická řešení se dvěma typy turbín. Stávající Francisova turbína prošla repasí, kdy při celkové rekonstrukci byla inovována automatická regulace přívodu vody v závislosti na proměnlivém průtoku řeky. Druhá varianta pro porovnání je rekonstrukce MVE s použitím Kaplanovy turbíny, která má lepší možnosti regulace a lepší účinnost, což je předpokladem vyšší roční výroby elektrické energie. [6]

Výsledkem porovnání obou turbín je ekonomické vyhodnocení, kde je sledováno, za jakou dobu by se měly vrátit investice vložené do projektu. To je provedeno na základě 4 porovnávacích kritérií:

- Rentabilita investice,
- Čistá současná hodnota,
- Index ziskovosti a
- Vnitřní výnosové procento.

5.1 Současná situace a vstupní údaje

Projekt je limitován současnou dispozicí MVE a nepočítá s žádnými úpravami toku řeky ani se stavebními úpravami stávající budovy MVE.

Vstupními parametry pro ekonomické porovnání obou variant jsou (platí pro oba typy turbín):

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

Celkový výkon vyplývající z hydroenergetického řešení:

- Výkon Francisovy turbíny $P_{T_{Fr}} = 34,5 \text{ kW}$
- Výkon Kaplanovy turbíny $P_{T_{Ka}} = 39,7 \text{ kW [6]}$

5.2 Francisova turbína – rozvaha a výsledovka

5.2.1 Aktiva – Francisova turbína

Předpokládané vyrobené množství elektrické energie (E_{290}) vychází ze vstupních hodnot hydroenergetického řešení a z výstupních energetických výkonů, tzn. průtoku $Q = 2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a užitého spádu $h = 2,2 \text{ m}$. Průměrný denní výkon Francisovy turbíny $P_{T_{Fr}} = 34,5 \text{ kW}$ je na základě informací od majitele po dobu 290 dní v roce. [6]

$$E_{290} = P_{T_{Fr}} \cdot t = 34,5 \cdot 290 \cdot 24 = 240\,120 \text{ kWh}, \quad \text{kdy dále bude uvažováno s} \quad (5.1)$$

$$E_{290} = 240 \text{ MWh}$$

Výkupní ceny elektřiny jsou stanoveny Energetickým regulačním úřadem (ERÚ) v následující tabulce:

ř./sl.	Podporovaný druh energie	Datum uvedení výroby do provozu		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 ve stávajících lokalitách	-	31.12.2004	2 152	1 392	1 646	1 268
101		1.1.2005	31.12.2013	2 759	1 999	2 416	1 794
102		1.1.2014	31.12.2014	2 705	1 945	-	-
103		1.1.2015	31.12.2015	2 652	1 892	-	-
104		1.1.2016	31.12.2016	2 600	1 840	-	-
105		1.1.2017	31.12.2017	2 258	1 498	-	-
106		1.1.2018	31.12.2018	2 214	1 454	-	-
110	Rekonstruovaná malá vodní elektrárna	-	31.12.2013	2 759	1 999	2 416	1 794
111		1.1.2014	31.12.2014	2 705	1 945	-	-
112		1.1.2015	31.12.2015	2 652	1 892	-	-
113		1.1.2016	31.12.2016	2 600	1 840	-	-
114		1.1.2017	31.12.2017	2 258	1 498	-	-
115		1.1.2018	31.12.2018	2 214	1 454	-	-
120	Malá vodní elektrárna v nových lokalitách	1.1.2006	31.12.2007	3 065	2 305	2 746	2 088
121		1.1.2008	31.12.2009	3 244	2 484	-	-
122		1.1.2010	31.12.2010	3 525	2 765	-	-
123		1.1.2011	31.12.2011	3 447	2 687	2 746	2 660
124		1.1.2012	31.12.2012	3 592	2 832	-	-
125		1.1.2013	31.12.2013	3 567	2 807	-	-
126		1.1.2014	31.12.2014	3 497	2 737	-	-
127		1.1.2015	31.12.2015	3 428	2 668	-	-
128		1.1.2016	31.12.2016	3 193	2 433	-	-
129		1.1.2017	31.12.2017	2 796	2 036	-	-
130	1.1.2018	31.12.2018	2 741	1 981	-	-	

Tabulka 5.1 Výkupní ceny a roční zelené bonusy na elektřinu pro MVE v roce 2017 [17]

Dle tabulky 5.1 spadá MVE Perknov do kategorie „Rekonstruované malé vodní elektrárny“. Ve sloupci „Datum uvedení výroby do provozu“ a hodnotu „do 31.12.2013“ jsou pro „Jednotarifní pásmo provozování“ následující bonusové hodnoty:

Výkupní cena Vc:	2 759 Kč/MWh
Zelené bonusy Zb:	1 999 Kč/MWh [17]

5.2.2 Výnos MVE – Francisova turbína

Hrubý odhad částky bez DPH ročního výnosu je dán součinem hodnot z odstavce 5.2.1 a tabulky 5.1.

$$Z_h = E_{290} (V_c + Z_b) = 240 (2759 + 1999) \quad (5.2)$$

$$Z_h = 1\,141\,920 \text{ Kč}$$

5.2.3 Pasiva – náklady na realizaci díla Francisovy turbíny

Následující tabulky ukazují skladbu a velikost nákladů vynaložených na celé dílo s rekonstrukcí Francisovy turbíny. Tyto náklady jsou stanoveny na základě podkladů od majitele MVE Perknov.

Tabulka 5.2 Náklady na stavební úpravy – Francisova turbína

Náklady na stavební úpravy	Cena [Kč]
Vyčištění přívodního a odpadního kanálu	70 000
Rekonstrukce stavidla	10 000
Výměna jemných česlí	10 000
Celkem:	90 000

Tabulka 5.3 Náklady na strojní vybavení – Francisova turbína

Strojní vybavení	Cena [Kč]
Repase Francisovy turbíny	130 000
Asynchronní generátor	70 000
Automatická regulace turbíny včetně elektroinstalace	260 000
Instalace zařízení	20 000
Celkem:	480 000

Tabulka 5.4 Náklady na projekt a poplatky – Francisova turbína

Projekt a poplatky	Cena [Kč]
Cena projektu	100 000
Celkem:	100 000

Tabulka 5.5 Roční provozní náklady – Francisova turbína

Roční provozní náklady	Cena [Kč]
Mazivo	8 000
Náhradní díly	10 000
Celkem:	18 000

Tabulka 5.6 Celkové náklady na rekonstrukci – Francisova turbína

Celkové náklady	Cena [Kč]
Náklady na stavební úpravu	90 000
Strojní vybavení	480 000
Projekt a polatky	100 000
Celkem:	670 000

5.2.4 Výsledovka – Francisova turbína

Pro stanovení celkové návratnosti investice jsou brány v úvahu níže uvedené předpoklady:

- Do veřejné sítě se prodá veškerá vyrobená energie
- Doba odepisování technologické části elektrárny je 10 let, tudíž patří do 3. odpisové skupiny. Tím je určena roční odpisová sazba při rovnoměrném způsobu odepisování pro první rok 5,5 % a pro další roky 10,5 %
- Doba odepisování stavební části je 30 let, tudíž patří do 5. odpisové skupiny. Tím je určena roční odpisová sazba při rovnoměrném způsobu odepisování pro první rok 1,4 % a pro další roky 3,4 %
- Celkové náklady ve výši 670 tis. Kč byly pokryty ze 60 % úvěrem (částkou 402 tis. Kč) a zbytek z vlastních zdrojů
- Úvěr je úročen 7,9 % s možností individuálních splátek a celý zisk jde ve prospěch úvěru. Splátka je nastavena na 9 137 Kč / měsíc
- Daň z příjmu fyzických osob je uvažována v následujících výpočtech ve výši 15 % zdanitelného základu konstantně během doby 30ti let [18]

Odpisy stavební části:

Odpis v prvním roce odepisování (O_1):

$$O_1 = N \cdot S_t = 190\,000 \cdot 1,4\% \quad (5.3)$$

$$O_1 = 2\,660 \text{ Kč}$$

Kde:

N ... jsou investiční náklady [Kč]

S_t ... je roční odpisová sazba [%]

Odpisy v dalších letech odepisování (O_n):

$$O_{2-30} = N \cdot S_t = 190\,000 \cdot 3,4\% \quad (5.4)$$

$$O_{2-30} = 6\,460 \text{ Kč}$$

Kde:

N ... jsou investiční náklady [Kč]

S_t ... je roční odpisová sazba [%]

Odpisy technologické části:

Odpis v prvním roce odepisování (O_1):

$$O_1 = N \cdot S_t = 480\,000 \cdot 5,5\% \quad (5.5)$$

$$O_1 = 26\,400 \text{ Kč}$$

Kde:

N ... jsou investiční náklady [Kč]

S_t ... je roční odpisová sazba [%]

Odpisy v dalších letech odepisování (O_n):

$$O_{2-10} = N \cdot S_t = 480\,000 \cdot 10,5\% \quad (5.6)$$

$$O_{2-10} = 50\,400 \text{ Kč}$$

Kde:

N ... jsou investiční náklady [Kč]

S_t ... je roční odpisová sazba [%]

Úroky placené (Ú_p):

$$U_p = D\check{c} \cdot \left(1 + \frac{\dot{U}_s}{100}\right) = 402\,000 \cdot \left(1 + \frac{7,9}{100}\right) \quad (5.7)$$

$$U_p = 433\,758 \text{ Kč}$$

Kde:

Dč ... je dlužná částka [Kč]

Ú_s ... je úroková sazba [%]

Úmor z dlužné částky (Ú_m):

$$\dot{U}_m = S - U_p = 9137 \cdot 12 - 433\,758 \quad (5.8)$$

$$\dot{U}_m = -324\,114 \text{ Kč}$$

Kde:

S ... je velikost roční splátky úvěru [Kč] [18]

Základ pro výpočet daně z příjmu fyzických osob (Z):

$$Z = T_r - N_p - O_{str} - O_{stav} - U_p = 1\,141\,920 - 18\,000 - 26\,400 - 2\,660 - 433\,758 \quad (5.9)$$

$$Z = 661\,102 \text{ Kč}$$

Kde:

T_r ... jsou tržby [Kč]

N_p ... jsou provozní náklady [Kč]

O_{str} ... jsou odpisy strojní [Kč]

O_{stav} ... jsou odpisy stavební [Kč]

Čistý zisk (Z_č):

$$Z_{\check{c}} = Z - (Z \cdot 0,85) = 661\,102 - (661\,102 \cdot 0,85) \quad (5.10)$$

$$Z_{\check{c}} = 561\,937 \text{ Kč}$$

Tok hotovosti (CF_t):

$$CF_t = Z_{\check{c}} + O_{str} + O_{stav} - INVEST \text{ NÁKLADY} = 561\,937 + 26\,400 + 2\,660 - 670\,000 \quad (5.11)$$

$$CF_t = -79\,003,30 \text{ Kč}$$

Struktura spočtených hodnot při použití Francisovy turbíny dle předchozích vzorců je znázorněna v následující tabulce ve výhledu na 30 let.

Tabulka 5.7 Hodnocení efektivnosti investice při použití Francisovy turbíny

Rok	Průměrná roční tržba [Kč/rok]	Roční provozní náklady [Kč/rok]	Odpisy Strojní zařízení [Kč/rok]	Odpisy Stavební část [Kč/rok]	Úroky placené z 402 000 tj 60% z 670 tis úvěr 7,9% na 5 let [Kč]	Úmor z dlužné částky [Kč]	Základ pro výpočet daně [Kč]	Hrubý zisk [Kč/rok]	Daň z příjmu 15% [Kč]	Čistý zisk [Kč]	CF cash flow - čistý zisk + odpisy [Kč]	CfT - kumulované cash flow [Kč]
1	1141920	18000	26400	2660	433758	-324114	661102		99165,3	561936,7	590996,7	79 003,30
2	1141920	18000	50400	6460	433758	-324114	633302		94995,3	538306,7	595166,7	516 163,40
3	1141920	18000	50400	6460	433758	-324114	633302		94995,3	538306,7	595166,7	1 111 330,10
4	1141920	18000	50400	6460	433758	-324114	633302		94995,3	538306,7	595166,7	1 706 496,80
5	1141920	18000	50400	6460	433758	-324114	633302		94995,3	538306,7	595166,7	2 301 663,50
6	1141920	18000	50400	6460				1067060	160059	907001	963861	3 265 524,50
7	1141920	18000	50400	6460				1067060	160059	907001	963861	4 229 385,50
8	1141920	18000	50400	6460				1067060	160059	907001	963861	5 193 246,50
9	1141920	18000	50400	6460				1067060	160059	907001	963861	6 157 107,50
10	1141920	18000	50400	6460				1067060	160059	907001	963861	7 120 968,50
11	1141920	18000		6460				1117460	167619	949841	956301	8 077 269,50
12	1141920	18000		6460				1117460	167619	949841	956301	9 033 570,50
13	1141920	18000		6460				1117460	167619	949841	956301	9 989 871,50
14	1141920	18000		6460				1117460	167619	949841	956301	10 946 172,50
15	1141920	18000		6460				1117460	167619	949841	956301	11 902 473,50
16	1141920	18000		6460				1117460	167619	949841	956301	12 858 774,50
17	1141920	18000		6460				1117460	167619	949841	956301	13 815 075,50
18	1141920	18000		6460				1117460	167619	949841	956301	14 771 376,50
19	1141920	18000		6460				1117460	167619	949841	956301	15 727 677,50
20	1141920	18000		6460				1117460	167619	949841	956301	16 683 978,50
21	1141920	18000		6460				1117460	167619	949841	956301	17 640 279,50
22	1141920	18000		6460				1117460	167619	949841	956301	18 596 580,50
23	1141920	18000		6460				1117460	167619	949841	956301	19 552 881,50
24	1141920	18000		6460				1117460	167619	949841	956301	20 509 182,50
25	1141920	18000		6460				1117460	167619	949841	956301	21 465 483,50
26	1141920	18000		6460				1117460	167619	949841	956301	22 421 784,50
27	1141920	18000		6460				1117460	167619	949841	956301	23 378 085,50
28	1141920	18000		6460				1117460	167619	949841	956301	24 334 386,50
29	1141920	18000		6460				1117460	167619	949841	956301	25 290 687,50
30	1141920	18000		6460				1117460	167619	949841	956301	26 246 988,50

5.3 Kaplanova turbína – rozvaha a výsledovka

5.3.1 Aktiva – Kaplanova turbína

Vyrobené množství elektrické energie (E_{290}) vychází ze stejných vstupních hodnot hydroenergetického řešení a z výstupních energetických výkonů jako při použití Francisovy turbíny tzn. průtoku $Q = 2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ užitném spádu $h = 2,2 \text{ m}$. Průměrný denní výkon Kaplanovy turbíny $P_{TKa} = 39,7 \text{ kW}$ je rovněž předpokládán po dobu 290 dní v roce a 24 hodin denně. [6]

$$E_{290} = P_{TKa} \cdot t = 39,7 \cdot 290 \cdot 24 = 276\,312 \text{ kWh} \quad \text{a dále bude uvažováno s} \quad (5.12)$$

$$E_{320} = 276 \text{ MWh}$$

Výkupní cena a roční zelené bonusy jsou totožné jako při použití Francisovy turbíny tzn:

Výkupní cena Vc : 2 759 Kč/MWh

Zelené bonusy Zb : 1 999 Kč/MWh

5.3.2 Výnos MVE – Kaplanova turbína

Hrubý odhad částky bez DPH ročního výnosu je dán součinem hodnot z odstavce 5.3.1 a tabulky 5.1.

$$Z_h = E_{290} (Vc + Zb) = 276 (2759 + 1999) \quad (5.13)$$

$$Z_h = 1\,313\,208 \text{ Kč}$$

5.3.3 Pasiva – náklady na realizaci díla Kaplanovy turbíny

Následující tabulky ukazují skladbu a velikost nákladů vynaložených na celé vodní dílo při náhradě stávající Francisovy turbíny za novou výkonnější Kaplanovou turbínou.

Na dodání a montáž Kaplanovy turbíny byly poptáni čtyři výrobci:

- Mavel, a.s.;
- Hydrohrom, s.r.o.;
- ČKD Blansko Holding, a.s.;
- Hydropol Project & Management a.s..

Níže uvedené náklady společnosti Hydrohrom, s.r.o. byly vybrány jako nejvýhodnější z výběrového řízení, kde hlavním kvalifikačním kritériem byla nejnižší nabídková cena. Vyhodnocení výběrového řízení je blíže zpracováno v příloze č. 3.

Tabulka 5.8 Technické parametry turbíny HH 780 SSK, horizontální – Hydrohrom, s.r.o.

Technické parametry Kaplanovy turbíny společnosti Hydrohrom, s.r.o.		
Parametr	Hodnota	MJ
Spád Hu	2,20	m
Průtok Q max	2,20	m ³ /s
Průtok Q min	0,44	m ³ /s
Výkon Pt	40,8	kW
Výkon Pg	36,1	kW
Otáčky	333	ot/min

Tabulka 5.9 Náklady na stavební úpravy – Kaplanova turbína

Náklady na stavební úpravy	Cena [Kč]
Vyčištění přívodního a odpadního kanálu	70 000
Rekonstrukce stavidla	10 000
Výměna jemných česlí	10 000
Celkem:	90 000

Tabulka 5.10 Strojní vybavení – Kaplanova turbína

Strojní vybavení	Cena [Kč]
Nová Kaplanova turbína vč automatické regulace	1 650 000
Asynchroní generátor	119 808
Instalace zařízení	715 000
Celkem:	2 484 808

Tabulka 5.11 Projekt a poplatky – Kaplanova turbína

Projekt a poplatky	Cena [Kč]
Cena projektu	160 000
Celkem:	160 000

Tabulka 5.12 Provozní náklady za období jednoho roku – Kaplanova turbína

Roční provozní náklady	Cena [Kč]
Mazivo	8 000
Náhradní díly	10 000
Celkem:	18 000

Tabulka 5.13 Celkové náklady na realizaci – Kaplanova turbína

Celkové náklady	Cena [Kč]
Náklady na stavební úpravu	90 000
Strojní vybavení	2 484 808
Projekt a polatky	160 000
Celkem:	2 734 808

5.3.4 Výsledovka – Kaplanova turbína

Pro stanovení výsledovky jsou brány obdobné předpoklady návratnosti investice jako u Francisovy turbíny. Díky vyšším investičním nákladům se zvýšila měsíční splátka úvěru na 49 863 Kč. Celkové náklady ve výši 2 735 tis. Kč byly pokryty z 90 % úvěrem (2 461,5 tis. Kč) a zbytek z vlastních zdrojů [18]

Odpisy stavební části:

Odpis v prvním roce odepisování (O_1):

$$O_1 = N \cdot S_t = 250\,000 \cdot 1,4\% \quad (5.14)$$

$$O_1 = 3\,500 \text{ Kč}$$

Kde:

N ... jsou investiční náklady [Kč]

S_t ... je roční odpisová sazba [%]

Odpisy v dalších letech odepisování (O_n):

$$O_{2-30} = N \cdot S_t = 250\,000 \cdot 3,4\% \quad (5.15)$$

$$O_{2-30} = 8\,500 \text{ Kč}$$

Kde:

N ... jsou investiční náklady [Kč]

S_t ... je roční odpisová sazba [%]

Odpisy technologické části:

Odpis v prvním roce odepisování (O_1):

$$O_1 = N \cdot S_t = 2\,484\,808 \cdot 5,5\% \quad (5.16)$$

$$O_1 = 136\,664 \text{ Kč}$$

Kde:

N ... jsou investiční náklady [Kč]

S_t ... je roční odpisová sazba [%]

Odpisy v dalších letech odepisování (O_n):

$$O_{2-10} = N \cdot S_t = 2\,484\,808 \cdot 10,5\% \quad (5.17)$$

$$O_{2-10} = 260\,904 \text{ Kč}$$

Kde:

N ... jsou investiční náklady [Kč]

S_t ... je roční odpisová sazba [%]

Úroky placené (Úp):

$$U_p = Dč \cdot \left(1 + \frac{Ú_s}{100}\right) = 2\,187\,846 \cdot \left(1 + \frac{7,9}{100}\right) \quad (5.18)$$

$$U_p = 2\,360\,686 \text{ Kč}$$

Kde:

$Dč$... je dlužná částka [Kč]

$Ú_s$... je úroková sazba [%]

Úmor z dlužné částky (Úm):

$$U_m = S - U_p = 49\,863 \cdot 12 - 2\,360\,686 \quad (5.19)$$

$$U_m = -1\,762\,330 \text{ Kč}$$

Kde:

S ... je velikost roční splátky úvěru [Kč] [18]

Základ pro výpočet daně z příjmu fyzických osob (Z):

$$Z = T_r - N_p - O_{str} - O_{stav} - U_p = 1\,313\,208 - 18\,000 - 136\,664 - 3\,500 - 2\,360\,686 \quad (5.20)$$

$$Z = -1\,205\,642 \text{ Kč}$$

Kde:

T_r ... jsou tržby [Kč]

N_p ... jsou provozní náklady [Kč]

O_{str} ... jsou odpisy strojní [Kč]

O_{stav} ... jsou odpisy stavební [Kč]

Čistý zisk (Z_ξ):

$$Z_\xi = Z - (Z \cdot 0,85) = -180\,846 - (-180\,846 \cdot 0,85) \quad (5.21)$$

$$Z_\xi = -1\,024\,796 \text{ Kč}$$

Tok hotovosti (CF_t):

(5.22)

$$CF_t = Z_\xi + O_{str} + O_{stav} - INVEST NÁKLADY = -1\,024\,796 + 136\,664 + 3\,500 - 2\,734\,808$$

$$CF_t = -3\,619\,439,86 \text{ Kč}$$

Struktura vypočtených hodnot při použití Kaplanovy turbíny dle předchozích vzorců je znázorněna v následující tabulce ve výhledu na 30 let.

Tabulka 5.14 Hodnocení efektivity investice při použití Kaplanovy turbíny

Rok	Průměrná roční tržba [Kč/rok]	Roční provozní náklady [Kč/rok]	Odpisy Strojní zařízení [Kč/rok]	Odpisy Stavební část [Kč/rok]	Úroky placené z 2 461 500 tj 10% z 735tis úvěr 7,9% na 5 let [Kč]	Úmor z dlužné částky [Kč]	Základ pro výpočet daně [Kč]	Hrubý zisk [Kč/rok]	Daň z příjmu 15% [Kč]	Čistý zisk [Kč]	CF cash flow - čistý zisk + odpisy [Kč]	CFt - kumulované cash flow [Kč]
1	1313208	18000	136664	3500	2360686,3	-2E+06	-1205643		-180846	-1024796	-884632	- 3 619 439,86
2	1313208	18000	260905	8500	2360686,3	-2E+06	-1334883		-200232	-1134651	-865246	- 4 484 685,66
3	1313208	18000	260905	8500	2360686,3	-2E+06	-1334883		-200232	-1134651	-865246	- 5 349 931,46
4	1313208	18000	260905	8500	2360686,3	-2E+06	-1334883		-200232	-1134651	-865246	- 6 215 177,26
5	1313208	18000	260905	8500	2360686,3	-2E+06	-1334883		-200232	-1134651	-865246	- 7 080 423,06
6	1313208	18000	260905	8500				1025803	153870,5	871932,7	1141338	- 5 939 085,53
7	1313208	18000	260905	8500				1025803	153870,5	871932,7	1141338	- 4 797 748,01
8	1313208	18000	260905	8500				1025803	153870,5	871932,7	1141338	- 3 656 410,48
9	1313208	18000	260905	8500				1025803	153870,5	871932,7	1141338	- 2 515 072,95
10	1313208	18000	260905	8500				1025803	153870,5	871932,7	1141338	- 1 373 735,43
11	1313208	18000		8500				1286708	193006,2	1093702	1102202	- 271 533,63
12	1313208	18000		8500				1286708	193006,2	1093702	1102202	830 668,17
13	1313208	18000		8500				1286708	193006,2	1093702	1102202	1 932 869,97
14	1313208	18000		8500				1286708	193006,2	1093702	1102202	3 035 071,77
15	1313208	18000		8500				1286708	193006,2	1093702	1102202	4 137 273,57
16	1313208	18000		8500				1286708	193006,2	1093702	1102202	5 239 475,37
17	1313208	18000		8500				1286708	193006,2	1093702	1102202	6 341 677,17
18	1313208	18000		8500				1286708	193006,2	1093702	1102202	7 443 878,97
19	1313208	18000		8500				1286708	193006,2	1093702	1102202	8 546 080,77
20	1313208	18000		8500				1286708	193006,2	1093702	1102202	9 648 282,57
21	1313208	18000		8500				1286708	193006,2	1093702	1102202	10 750 484,37
22	1313208	18000		8500				1286708	193006,2	1093702	1102202	11 852 686,17
23	1313208	18000		8500				1286708	193006,2	1093702	1102202	12 954 887,97
24	1313208	18000		8500				1286708	193006,2	1093702	1102202	14 057 089,77
25	1313208	18000		8500				1286708	193006,2	1093702	1102202	15 159 291,57
26	1313208	18000		8500				1286708	193006,2	1093702	1102202	16 261 493,37
27	1313208	18000		8500				1286708	193006,2	1093702	1102202	17 363 695,17
28	1313208	18000		8500				1286708	193006,2	1093702	1102202	18 465 896,97
29	1313208	18000		8500				1286708	193006,2	1093702	1102202	19 568 098,77
30	1313208	18000		8500				1286708	193006,2	1093702	1102202	20 670 300,57

5.4 Charakteristiky úspěšnosti investice „Francis“ vs „Kaplan“

Zhodnocení efektivity a výnosnosti projektu bude v následujících odstavcích provedeno porovnáním dříve uvedenými čtyř kritérií a to: Rentabilitou investice, Čistou současnou hodnotou, Indexem ziskovosti a Vnitřním výnosovým procentem.

5.4.1 Rentabilita investice

Celkový zisk z investice je určen rentabilitou, která je počítána jako poměr zisku k celkovým investičním nákladům. Čím větší procento rentability, tím je investice výhodnější. V našem případě je rentabilita počítána jen z prvních 10ti let, jelikož je investice splacena v obou případech do 6ti let.

[10]

Rentabilita investice (ROI):

$$ROI = \frac{Z\check{c}}{N} \cdot 100 [\%] \quad (5.22)$$

Tabulka 5.15 Rentabilita investice při použití Francisovy turbíny

Rentabilita investice Francisova turbína		
Čistý zisk [Kč]	Celkové investiční náklady [Kč]	ROI
561 937	670 000	84%
538 307	670 000	80%
538 307	670 000	80%
538 307	670 000	80%
538 307	670 000	80%
907 001	670 000	135%
907 001	670 000	135%
907 001	670 000	135%
907 001	670 000	135%
907 001	670 000	135%

Tabulka 5.16 Rentabilita investice při použití Kaplanovy turbíny

Rentabilita investice Kaplanova turbína		
Čistý zisk [Kč]	Celkové investiční náklady [Kč]	ROI
- 1 024 796	2 734 808	-37%
- 1 134 651	2 734 808	-41%
- 1 134 651	2 734 808	-41%
- 1 134 651	2 734 808	-41%
- 1 134 651	2 734 808	-41%
871 933	2 734 808	32%
871 933	2 734 808	32%
871 933	2 734 808	32%
871 933	2 734 808	32%
871 933	2 734 808	32%

Z výše uvedených hodnot je patrné, že použití Francisovy turbíny je z pohledu rentability výhodnější, což je zapříčiněno mnohem menšími počátečními náklady.

5.4.2 Čistá současná hodnota

Jako další kritérium pro hodnocení výnosnosti projektu je použita metoda čisté současné hodnoty, která vyjadřuje celkovou aktuální hodnotu všech peněžních toků. Doba investice je nastavena na 30 let. [10]

Čistá současná hodnota (ČSH):

$$\text{ČSH} = \text{SHCF} - N = \sum_{t=1}^Z \frac{Cf_t}{(1+i)^t} - N \text{ [Kč]} \quad (5.23)$$

Tabulka 5.17 Současná hodnota očekávaných peněžních příjmů při použití Francisovy turbíny

Čistá současná hodnota-Francisova turbína		
Rok	CF cash flow - čistý zisk + odpisy [Kč]	Diskontované CF[Kč]
1	590 997	573 783
2	595 167	561 002
3	595 167	544 662
4	595 167	528 798
5	595 167	513 396
6	963 861	807 218
7	963 861	783 707
8	963 861	760 881
9	963 861	738 719
10	963 861	717 203
11	956 301	690 852
12	956 301	670 730
13	956 301	651 194
14	956 301	632 228
15	956 301	613 813
16	956 301	595 935
17	956 301	578 578
18	956 301	561 726
19	956 301	545 365
20	956 301	529 481
21	956 301	514 059
22	956 301	499 086
23	956 301	484 550
24	956 301	470 437
25	956 301	456 735
26	956 301	443 432
27	956 301	430 516
28	956 301	417 977
29	956 301	405 803
30	956 301	393 983
SUMA		17 115 850
ČSH		16 445 850

Tabulka 5.18 Současná hodnota očekávaných peněžních příjmů při použití Kaplanovy turbíny

Čistá současná hodnota - Kaplanova turbína		
Rok	CF cash flow - čistý zisk + odpisy [Kč]	Diskontované CF[Kč]
1	- 884 632	- 858 866
2	- 865 246	- 815 577
3	- 865 246	- 791 822
4	- 865 246	- 768 760
5	- 865 246	- 746 369
6	1 141 338	955 852
7	1 141 338	928 012
8	1 141 338	900 982
9	1 141 338	874 740
10	1 141 338	849 262
11	1 102 202	796 254
12	1 102 202	773 062
13	1 102 202	750 546
14	1 102 202	728 685
15	1 102 202	707 461
16	1 102 202	686 856
17	1 102 202	666 850
18	1 102 202	647 427
19	1 102 202	628 570
20	1 102 202	610 262
21	1 102 202	592 488
22	1 102 202	575 231
23	1 102 202	558 477
24	1 102 202	542 210
25	1 102 202	526 418
26	1 102 202	511 085
27	1 102 202	496 199
28	1 102 202	481 747
29	1 102 202	467 715
30	1 102 202	454 093
SUMA		12 729 092
ČSH		9 994 284

Z výše uvedeného je dokázáno, že v obou případech je projekt považován za efektivní, avšak s použitím Francisovy turbíny je projekt efektivnější, díky větší hodnotě ČSH.

5.4.3 Index ziskovosti

Index ziskovosti je kritérium založené na diskontovaném cash-flow a vyjadřuje současnou hodnotu peněžních toků vztahených k pořizovacím nákladům. [10]

Index ziskovosti (IZ):

- Pro Francisovu turbínu

$$IZ_F = \frac{SHCF}{N} = \frac{17\,115\,850}{670\,000} \quad (5.24)$$

$$IZ_F = 25,55$$

- Pro Kaplanovu turbínu

$$IZ_K = \frac{SHCF}{N} = \frac{9\,994\,284}{2\,734\,808} \quad (5.25)$$

$$IZ_K = 4,65$$

Při porovnání obou hodnot je opět výhodnější ta, jejíž index ziskovosti je vyšší. Tou je v tomto případě Francisova turbína.

5.4.4 Vnitřní výnosové procento

Posledním kritériem pro zhodnocení investice bylo zvoleno vnitřní výnosové procento, které udává, kolika procentní je výnos při ohledu na časovou hodnotu peněz. [10]

Vnitřní výnosové procento (VVP):

$$\sum_{t=1}^t \frac{Cf_t}{(1+VVP)^t} = N [\%] \quad (5.26)$$

Pro výše uvedený vzorec byla použita funkce v Excelu MÍRA.VÝNOSNOSTI.

- Pro Francisovu turbínu

$$VVP = 753\%$$

- Pro Kaplanovu turbínu

$$VVP = 9\%$$

Z výsledků je dokázáno, že i poslední případ hodnocení investice vychází lépe pro Francisovu turbínu.

6. Závěr

Diplomová práce řeší problematiku technicko-ekonomického hodnocení rekonstrukce malé vodní elektrárny s Francisovou turbínou. Úvodní část je věnována jednotlivým typům vodních děl a jejich charakteristickým rysům. Je doplněna o historický vývoj vodních motorů od starověku až po současnost. Jsou zde popsány a vysvětleny základní návrhové veličiny vodního díla. Pozornost je zaměřena na jednotlivé typy turbín používané v oblasti malých vodních elektráren.

V druhé části je popsána rekonstrukce a současný stav malé vodní elektrárny v Perknově, která byla zřízena na místě původního mlýna. Na příkladu této elektrárny je proveden návrh a výpočet hlavních rozměrů Francisovy turbíny dle teorie fyzikální podobnosti hydraulických stojů. Výsledky výpočtu jsou následně porovnány se skutečností. Vypočtený průměr oběžného kola $D_1 = 1095$ mm se od skutečnosti liší o 5 mm, což představuje odchylku 0,5 %. U sací výšky je výpočtem stanovena maximální přípustná hodnota $h_s = 5,2$ m. Skutečná hodnota sací výšky u Francisovy turbíny musí být vždy menší, což reálný rozdíl hladin 1,05 m bez problému splňuje. Celkový vypočtený výkon $P_T = 34,5$ kW (při maximálním průtoku $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) odpovídá současnému výkonu generátoru 10 - 35 kW při hltnosti turbíny $0,7 - 2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Další část je zaměřena na výpočet hlavních rozměrů a celkového výkonu variantního řešení s Kaplanovou turbínou, při využití stejného hydroenergetického potenciálu. Vypočtený výkon kaplanovy turbíny $P_{TKa} = 39,7$ kW byl porovnán s celkovým výkonem Francisovy turbíny $P_{Tfr} = 34,5$ 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 provedeno posouzení ekonomické výhodnosti při použití Francisovy a Kaplanovy turbíny. Jako vstupní hodnoty byly uvažovány výsledky výpočtů výkonů vyplývajících z hydroenergetických řešení. Pro porovnání byla zvolena čtyři kritéria hodnocení investice: Rentabilita investice, Čistá současná hodnota, Index ziskovosti a Vnitřní výnosové procento. Ve všech čtyřech případech vychází lépe varianta s Francisovou turbínou. Předpokládaná životnost soustrojí je nejméně 30 let.

V celkovém hodnocení se jeví ekonomicky výhodnější repase původní Francisovy turbíny, pro kterou se rozhodl i současný majitel MVE Perknov, přestože použití Kaplanovy turbíny je též vhodné řešení s nepatrně vyšším výkonem, včetně výsledného finančního efektu, ale návratnost investice je podstatně delší.

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
- [10] Synek, Miloslav, Jan Vojtek a Jaroslav Bláha; *Manažerská ekonomika: konstrukce a provoz*. 5., aktualizované a doplněné vyd. Praha: Grada, 2011, 471s., ISBN 978-80-247-3494-11

7.2 Internetové zdroje

- [11] Sdružení Cech provozovatelů MVE; *Cech provozovatelů MVE* [online] [cit. 19-3-2015] URL: <<http://www.cechmve.cz>>
- [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 encyklopedia; *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/Francisova turb%C3%ADna](http://cs.wikipedia.org/wiki/Francisova_turb%C3%ADna)>
- [16] Wikipedia; *Kaplanova turbína* [online] [cit. 3-4-2015]
URL: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Kaplanova turb%C3%ADna](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>>
- [18] iDnes; Úvěrová kalkulačka [online] [cit. 4-3-2017]
URL: <<http://kalkulacky2.idnes.cz>>

8. Seznam zkratk

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
- Příloha č. 3 – Výběrové řízení na dodávku a montáž Kaplanovy turbíny
- Příloha č. 4 – Cenové nabídky jednotlivých společností