

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Posouzení možnosti stavby malé vodní elektrárny

**vedoucí práce: Prof. Ing. Jan Mühlbacher, CSc.
autor: Bc. Ondřej Pytlík**

2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej PYTLÍK**
Osobní číslo: **E10N0094P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Technická ekologie**
Název tématu: **Posouzení možnosti stavby malé vodní elektrárny**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Nalezněte vhodnou lokalitu.
2. Zpracujte přibližný výpočet průměrných ročních výnosů el. energie.
3. Proveďte ekonomický rozbor návratnosti této stavby.
4. Proveďte předběžný technický návrh této elektrárny.

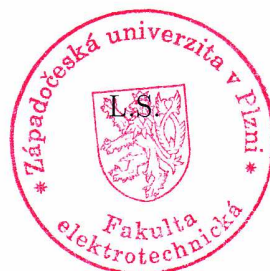
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


1. Škorpil, J., Kasárník, M. : Obnovitelné zdroje energie I. Vodní elektrárny
2. Bednář, J. : Malé vodní elektrárny 2. Turbíny
3. www.ekowatt.cz

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Jan Mühlbacher, CSc.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

V předkládané diplomové práci je popsána problematika získávání elektrické energie z vodního zdroje. Práce je především zaměřena na projekt výstavby malé vodní elektrárny u obce Nadryby. Je zde popsáno stavební i strojní řešení této elektrárny, ovládání, regulace a vyvedení výkonu do elektrizační soustavy. V závěru práce je vypočtena předběžná výroba elektrické energie a jsou vyčísleny náklady na stavbu, z nichž jsou vyhodnoceny ekonomické ukazatele.

Klíčová slova

Malá vodní elektrárna, hydroenergetický potenciál, průtok, spád, instalovaný výkon, jez, strojovna, přívodní kanál, odpadní kanál, rybí přechod, Semi-Kaplanova turbína, asynchronní generátor, řemenový převod, připojení k distribuční síti, průměrná roční výroba.

Abstract

Assessment of the possibility of building of a small hydro power plant

In this thesis the problem of obtaining electricity from a water source is described. The thesis is mainly focused on the project of build of a small hydroelectric power plant near the village Nadryby. There is described structural and mechanical solution of this power plant, control, regulation and power outlet to the electricity system. In the conclusion the electricity production is pre-calculated and construction costs are calculated. From these costs economic indicators are evaluated.

Key words

Small hydro power plant, hydroelectric power potential, water flow, head of water, installed capacity, weir, powerhouse, water inflow, water outflow, fish passage, Semi-Kaplan turbine, asynchronous generator, belt drive, grid connection, average annual production.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 31.4.2012

Bc. Ondřej Pytlík


.....

Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval panu Prof. Ing. Janu Mühlbacherovi, CSc. za vedení mé diplomové práce, rady a vstřícný přístup. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Josefu Peteříkovi ze společnosti Invelt – elektro, s. r. o. za cenné informace v oblasti elektro součástí MVE, panu Bc. Filipovi Jandovi z Povodí Vltavy, s. p. za pomoc při výběru vhodné lokality a Ing. Jiřině Grünwaldové z Českého hydrometeorologického ústavu za poskytnutí hydrologických dat.

Také bych rád poděkoval Bc. Petru Hyblerovi, který mi svými hydrologickými znalostmi z praxe pomohl orientovat se v této problematice a Bc. Veronice Štruncové, která mi pomohla s ekonomickými výpočty projektu MVE Nadryby.

Obsah

Úvod	9
Seznam symbolů.....	10
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	11
Seznam grafů.....	11
1 Základní informace o MVE.....	12
1.1 Princip funkce MVE.....	13
1.2 Dělení MVE	13
1.3 Stavební řešení MVE.....	14
1.3.1 Vtokové objekty.....	15
1.3.2 Přivaděče a odpady.....	16
1.3.3 Výrobní objekty.....	16
1.4 Strojní zařízení MVE.....	17
1.5 Turbíny	18
2 Zásady projektování MVE.....	22
2.1 Dispoziční řešení	22
2.2 Vtokové objekty	23
2.3 Přivaděče a odpady.....	23
2.4 Česle.....	24
2.5 Projektové práce a dokumentace	25
2.6 Legislativa	25
2.6.1 Přehled nejdůležitějších zákonů.....	26
2.6.2 Nejdůležitější vyhlášky a nařízení	26
3 Výběr lokality	27
3.1 Posouzení vhodnosti lokality	27
3.1.1 Hydroenergetický potenciál.....	27
3.1.2 Spád	27
3.1.3 Průtok.....	28
3.2 Nalezení vhodné lokality	28
3.3 Lokalita u obce Křenovy	28
3.3.1 Hydrologická data Křenovy.....	29
3.4 Lokalita u obce Nadryby	30
3.4.1 Hydrologická data Nadryby.....	32
4 Návrh MVE u obce Nadryby	33
4.1 Teoretické využití průtokových poměrů.....	34
4.1.1 Předběžný teoretický výkon turbíny a soustrojí	35
4.2 Stavební řešení.....	36
4.2.1 Dispoziční řešení.....	37
4.2.2 Přívodní kanál.....	38
4.2.3 Odpadní kanál.....	39
4.2.4 Rybí přechod.....	39
4.2.5 Strojovna.....	40

5	Strojní zařízení	41
5.1	Turbína	41
5.1.1	Výběr turbíny pro lokalitu Nadryby	43
5.1.2	Turbína Semi-Kaplan	45
5.2	Převod	47
6	Elektrotechnické zařízení	47
6.1	Generátor	47
6.1.1	Generátor pro lokalitu Nadryby	48
6.2	Elektrická zařízení pro regulaci a připojení do sítě	49
6.2.1	Řídící, regulační a měřicí systémy	50
6.2.2	Připojení MVE k distribuční síti	51
7	Průměrná roční výroba elektrické energie	52
7.1	Varianta I: Použití 2 turbín	53
7.2	Varianta II: Použití 3 turbín	54
8	Ekonomické hodnocení	55
8.1	Tržby z prodeje vyrobené elektrické energie	55
8.2	Náklady na výstavbu MVE Nadryby	56
8.3	Cash flow investičního projektu	57
8.3.1	Odpisy	58
8.3.2	Úroky z úvěru	58
8.4	Výpočet ekonomických ukazatelů efektivnosti investice	60
8.4.1	Diskontovaná doba návratnosti	60
8.4.2	Čistá současná hodnota	61
8.4.3	Vnitřní výnosové procento	62
	Závěr	63
	Seznam použitých zdrojů	65
	Přílohy	1
	Příloha 1. Zobrazení hydrologických poměrů v lokalitě Nadryby	1
	Příloha 2. Obrázková příloha	3
	Příloha 3. Ekonomické hodnocení	5

Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku malých vodních elektráren. V době, kdy se obrací stále větší pozornost na možnosti výroby elektrické energie z ekologicky čistých a nevyčerpatelných zdrojů, tj. zdrojů obnovitelných, jsou řešeny otázky související s MVE častěji. Ve skupině obnovitelných zdrojů zauímají v České republice MVE značnou část výroby elektřiny. Jejich výhodou je bezesporu vysoká účinnost přeměny energie vody na energii elektrickou, a to bez negativních dopadů na okolní prostředí. Stavba pro výrobu elektřiny z vodního zdroje je ve srovnání s ostatními zdroji méně finančně náročná a z důvodu dlouhé životnosti mají tyto elektrárny dobrou návratnost investic do nich vložených. Jelikož je v ČR velká část hydroenergetického potenciálu rozptýlena do menších říčních toků, je malých vodních elektráren na našem území velké množství.

Využívání vodního zdroje sahá až do středověku. Do poloviny 19. století se hydroenergetický potenciál toků využíval pomocí vodních kol k mechanickému pohonu zařízení mlýnů, pil a hamrů. Po vyvinutí první vodní turbíny, kterou byla Francoisova turbína, v letech 1848-1849 se začalo s využitím vodního zdroje k výrobě elektrické energie. Následoval vývoj dalších typů turbín, například v roce 1877 byla vyvinuta Peltonova turbína a v roce 1912 turbína Kaplanova. Tyto turbíny byly dále efektivněji vyvíjeny.

V první etapě rozvoje elektrizační soustavy na počátku 20. století bylo vystavěno velké množství MVE na našem území. Již v 30. letech 20. století bylo v provozu více než 10 000 MVE s celkovým instalovaným výkonem cca 200 MW. Tyto zdroje byly ovšem po výstavbě velkých vodních elektráren shledány neefektivními a polovina byla zrušena. Obrat v nahlížení na efektivnost MVE přišel v důsledku světové krize v roce 1973. Od té doby je malým vodním zdrojům věnována velká pozornost, která je v poslední době podpořena závazkem vůči Evropské unii ohledně výroby elektřiny z OZE ve výši 13 % do roku 2020.

V současnosti jsou nejvhodnější lokality pro výstavbu MVE již využity, a proto jsou nové projekty aplikovány na čím dál menší spády a průtoky. Pro tyto lokality jsou používány novější a efektivnější malé vodní turbíny, které vhodně využijí hydroenergetický potenciál toku. Stále ještě je mnoho starých MVE, které jsou osazeny malými Francoisovými turbínami. Tyto elektrárny jsou nyní hojně rekonstruovány a turbíny vyměněny za modernější Kaplanovy při minimálních stavebních úpravách.

Seznam symbolů

A_c [MWh].....	Celková vyrobená elektrická energie
CF.....	Cash Flow (peněžní tok)
ČSH [Kč].....	Čistá současná hodnota
DDN.....	Diskontovaná doba návratnosti
E [J.K ⁻¹].....	Měrná energie vodního toku
g [m.s ⁻²].....	Gravitační zrychlení, $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$
H [m].....	Čistý spád
H_b [m].....	Celkový spád
MVE.....	Malá vodní elektrárna
nn.....	Nízké napětí
OZE.....	Obnovitelné zdroje energie
P [W].....	Výkon
P_G [W].....	Výkon na generátoru
P_t [W].....	Teoretický hydroenergetický potenciál
P_T [W].....	Výkon turbíny
Q [m ³ .s ⁻¹].....	Průtok
Q_{nVE} [m ³ .s ⁻¹].....	Návrhový průtok vodní elektrárnou
Q_{max} [m ³ .s ⁻¹].....	Maximální průtok turbínou
Q_{min} [m ³ .s ⁻¹].....	Minimální průtok turbínou
Q_{MZP} [m ³ .s ⁻¹].....	Minimální zůstatkový průtok
Q_{90d} [m ³ .s ⁻¹].....	Průtok, který je minimálně 90 dní v roce
U_n [V].....	Jmenovité napětí
VC [Kč].....	Výkupní cena
VVP [%].....	Vnitřní výnosové procento
vn.....	Vysoké napětí
ρ_v [kg.m ⁻³].....	Hustota vody, $\rho_v = 998 \text{ kg.m}^{-3}$
η_G	Účinnost generátoru
η_P	Účinnost převodu
η_T	Účinnost turbíny

Seznam obrázků

<i>Obr. 1.1</i> Dělení vodních elektráren podle využívaného spádu: a) nízkotlaká, b) středotlaká, 14 c) vysokotlaká	14
<i>Obr. 1.2</i> Vtokové objekty jezové MVE 16	16
<i>Obr. 1.3</i> Ukázky strojoven: a) zakrytá strojovna MVE, b) polozakrytá strojovna MVE, 17 c) odkrytá strojovna MVE	17
<i>Obr. 1.4</i> Schéma členění části hydroagregátu..... 17	17
<i>Obr. 1.5</i> Rozdělení turbín podle průtoku oběžným kolem: a) centrifugální, b) centripetální, 20 c) axiální, d) radiálně - axiální, e) diagonální, f) se šikmým průtokem, g) tangenciální, h) s dvojnásobným průtokem	20
<i>Obr. 1.6</i> Schéma vstupních částí turbín: a) spirální, b) kašnová, c) kotlová, d) násosková, 21 e) přímoproudá	21
<i>Obr. 1.7</i> Základní druhy turbín: a) Francisova, b) Kaplanova, 22 c) Bánkiho, d) Peltonov	22
<i>Obr. 2.1</i> Hydraulicky účelné dispoziční řešení jezové příbřežní VE 23	23
<i>Obr. 3.1</i> Vyznačení toku u obce Křenovy..... 29	29
<i>Obr. 3.2</i> Vyznačení toku u obce Nadryby..... 32	32
<i>Obr. 4.2</i> Návrhová situace stavebního řešení..... 38	38
<i>Obr. 4.3</i> Příčný řez tokem, naznačující situaci odběru vody..... 39	39
<i>Obr. 5.1</i> Oblastní diagram použití malých vodních turbín..... 42	42
<i>Obr. 5.2</i> Schéma uspořádání turbíny Semi-Kaplan..... 46	46
<i>Obr. 6.3</i> Hlavní schéma elektrického zapojení MVE..... 50	50

Seznam tabulek

<i>Tabulka 3.1</i> M-denní průtok, Křenovy..... 30	30
<i>Tabulka 3.2</i> M-denní průtok, Nadryby 32	32
<i>Tabulka 3.3</i> N-leté průtoky, Nadryby 33	33
<i>Tabulka 7.1</i> Výroba elektrické energie pro Variantu I..... 53	53
<i>Tabulka 7.2</i> Výroba elektrické energie pro Variantu II..... 54	54
<i>Tabulka 8.1</i> Výkupní ceny elektrické energie 55	55
<i>Tabulka 8.2</i> Cenová nabídka od společnosti Hydrohrom, s. r. o..... 56	56
<i>Tabulka 8.3</i> Odhad výše ceny ostatních výdajů spojených s vybudováním MVE Nadryby..... 57	57
<i>Tabulka 8.4</i> Anuitní splátkové kalendáře 59	59
<i>Tabulka 8.5</i> Výchozí výpočty pro stanovení DDN, ČSH a VVP při úrokové sazbě 10 % p. a. 60	60

Seznam grafů

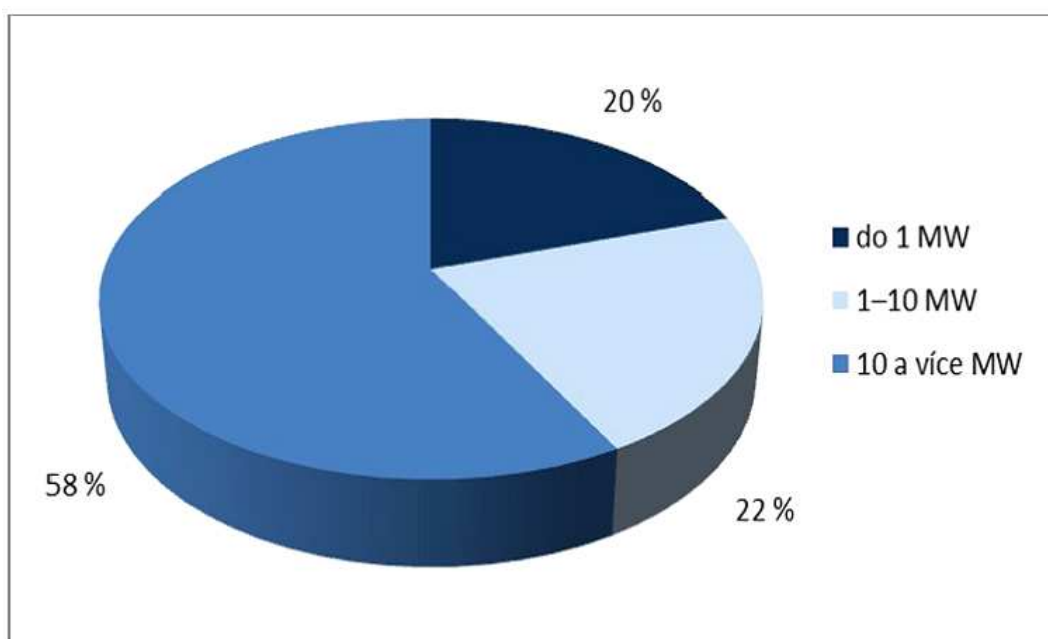
<i>Graf 1.1</i> Podíl výkonu vodních elektráren na hrubé výrobě elektřiny z OZE v roce 2010..... 12	12
<i>Graf 3.1</i> Odtoková křivka lokality Křenovy..... 30	30
<i>Graf 3.2</i> Odtoková křivka lokality Nadryby..... 33	33
<i>Graf 4.1</i> Vyznačení teoretického návrhového průtoku 35	35
<i>Graf 6.1</i> Zobrazení účinnosti a účinníku při různém zatížení..... 49	49
<i>Graf 8.1</i> Diskontovaná doba návratnosti investice..... 61	61

1 Základní informace o MVE

Malé vodní elektrárny (MVE) jsou vodní elektrárny s instalovaným výkonem do 10 MW. Budují se většinou jako průběžné bez akumulace, takže jejich provoz je závislý na okamžitých hydrologických podmínkách daného toku. Nemívají tedy schopnost regulovat v dlouhodobých cyklech průtok, a tím i výkon a výrobu elektrické energie. Nicméně na rozdíl od jiných ekologicky šetrných zdrojů (větrných nebo solárních elektráren) jsou zárukou nepřerušované kontinuální dodávky určitého garantovaného množství elektrické energie.

Obecně se MVE vyznačují několikanásobně delší ekonomickou životností, než je návratnost do nich vložených investičních prostředků. Elektrická energie v nich vyráběná je nejlevnější elektrickou energií dodávanou do elektrizační soustavy [3].

Vodní energie je nejvýznamnějším obnovitelným zdrojem pro výrobu elektřiny, zejména z důvodu vhodných parametrů pro regulaci elektrické soustavy. Hodnota instalovaného výkonu vodních elektráren v ČR je přes 1 GW a představuje 8 % celkového instalovaného výkonu zdrojů pro výrobu elektřiny. Na hrubé výrobě elektřiny se v roce 2010 podílela 3,25 %. Podíl na výrobě zelené elektřiny potom tvořil přes 47 % [1]. Z čehož instalovaný výkon MVE k lednu 2011 byl 296,8 MW. Jak ukazuje *Graf 1.1*, za rok 2010 činila hrubá výroba elektřiny z MVE 1 158 577 MWh, to je 42 % z celkové výroby vodních elektráren v ČR. Výroba z MVE tudíž zaujímá 1,63 % z celkové hrubé výroby elektřiny.



Graf 1.1 Podíl výkonu vodních elektráren na hrubé výrobě elektřiny z OZE v roce 2010 (Zdroj: MPO, ERÚ)

1.1 Princip funkce MVE

Voda přitékající přívodním kanálem roztáčí turbínu, která je na společné hřídeli s generátorem elektrické energie. Mechanická energie proudící vody se tak mění na základě elektromagnetické indukce (v otáčející se smyčce elektrického vodiče v magnetickém poli se indukují střídavé elektrické napětí) na energii elektrickou; ta se transformuje a odvádí do míst spotřeby [2].

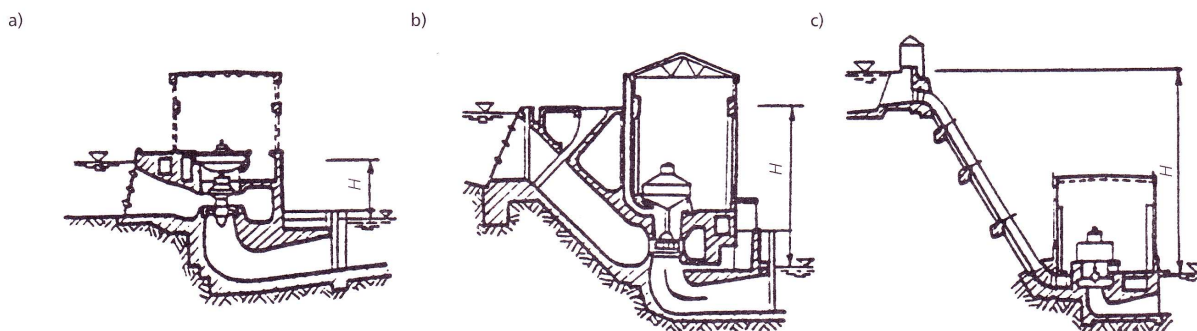
1.2 Dělení MVE

Malé vodní elektrárny se dělí podle různých hledisek:

- a) podle instalovaného výkonu
 - domácí vodní elektrárny (s instalovaným výkonem do 35 kW)
 - vodní mikroeletřárny (od 35 kW do 100 kW)
 - vodní minieletřárny (od 100 kW do 1 000 kW)
 - závodní nebo veřejné vodní elektrárny (od 100 kW do 1 MW)
 - průmyslové vodní elektrárny (od 1 MW do 10 MW)
- b) podle velikosti spádu
 - nízkotlaké (od 20 m)
 - středotlaké (od 20 m do 100 m)
 - vysokotlaké (nad 100 m)
- c) podle charakteru pracovního režimu
 - průtočné – pracují s přirozeným průtokem a využívají spád vzdutý jezem nebo energii vodního toku
 - akumulační – pracují s odběrem vody akumulované v nádrži
 - přečerpávací – přečerpávají akumulovanou vodu z dolní nádrže do horní
- d) podle umístění strojovny
 - hrázové – strojovna je umístěna v těle hráze nebo v přelivných bocích
 - jezové – strojovna je umístěna na břehu u jezu
 - členěné – mají rozdělenou strojovnu na více částí
 - pilířové – strojovna je umístěna v pilířích jezu nebo hráze
 - věžové – strojovna umístěna ve zvláštním objektu v nádrži nebo zdrži
 - podzemní – strojovna je umístěna pod zemí

e) podle řízení provozu

- s ručním ovládáním – řízen pouze ručně obsluhou
- částečně automatizované – řízeno částečně automatikou a částečně ručně obsluhou
- automatizované – plně automatizovaný provoz
- dálkové řízení – ovládání z velína



Obr. 1.1 Dělení vodních elektráren podle využívaného spádu: a) nízko tlaká, b) středotlaká, c) vysoko tlaká

1.3 Stavební řešení MVE

Podle způsobu získávání spádu, což v podstatě odpovídá technickému řešení využití vodní energie určitého úseku toku, lze uvažovat o následujících typech MVE:

- přehradní – spád je vytvořen přehradou. Jejich nádrže mají zpravidla dost velký zásobní objem, takže mohou pracovat jako špičkové regulační vodní elektrárny,
- jezové – spád je vytvořen jezem. Pracují vesměs jako průběžné elektrárny, pouze výjimečně při určitém zásobním objemu zdrže mohou být využívány pro omezený regulační provoz,
- derivační – využívá se spádu získaného vedením vody v tlakové derivaci (v potrubí, tlakové štole) nebo v derivaci s volnou hladinou (v otevřených derivačních kanálech, náhonech). Pracují nejčastěji jako průběžné elektrárny.

Při budování MVE na tocích se v České republice nejčastěji setkáváme s řešením jezových MVE, méně často již s řešením derivačních MVE.

Typ jezové MVE je z hlediska vlivu na průtokové poměry a okolní prostředí nejvhodnější. Provozem MVE u jezu se nenarušuje kontinuita průtoků ani co do velikosti, ani co do času. Tyto MVE pracují jako průběžné (tj. nepřetržitě). Mohou se budovat

u existujících jezů pevných nebo pohyblivých, v případě nových vodních děl je však třeba přednostně navrhovat jez pohyblivý. U pevného jezu by totiž bylo nutné počítat se zvýšením hladin nad jezem při velkých průtocích. U tohoto typu MVE je potřebné řešit často i objekty rybovodu, resp. biokoridoru k propojení toku pod jezem a nad ním pro možnost migrace ryb.

Hlavní stavební části MVE jsou:

- **vtokový objekt**, který bezprostředně navazuje na vodní tok, případně na nádrž nebo zdrž, vytvořenou na vodním toku přehradou nebo jezem. Slouží k odběru vody pro elektrárnu,
- **přivaděč a odpad**, které mohou být beztlakové (náhon, kanál, štola s volnou hladinou) nebo tlakové (potrubí, štola, šachta),
- **výrobní objekty MVE** – strojovna, provozní budova, rozvodna, případně jiné objekty pro doprovodná zařízení (montážní prostor, akumulátorovna apod.).

1.3.1 Vtokové objekty

Účelem vtokového objektu je zabezpečit dostatečný přítok vody z toku, ze zdrže nebo z nádrže do přivaděče vedoucího vodu do elektrárny. Vtokový objekt má být navržen tak, aby při odběru vody způsoboval minimální hydraulické ztráty a aby zabraňoval vnikání hrubých splavenin, plovoucích a unášených předmětů k turbínám.

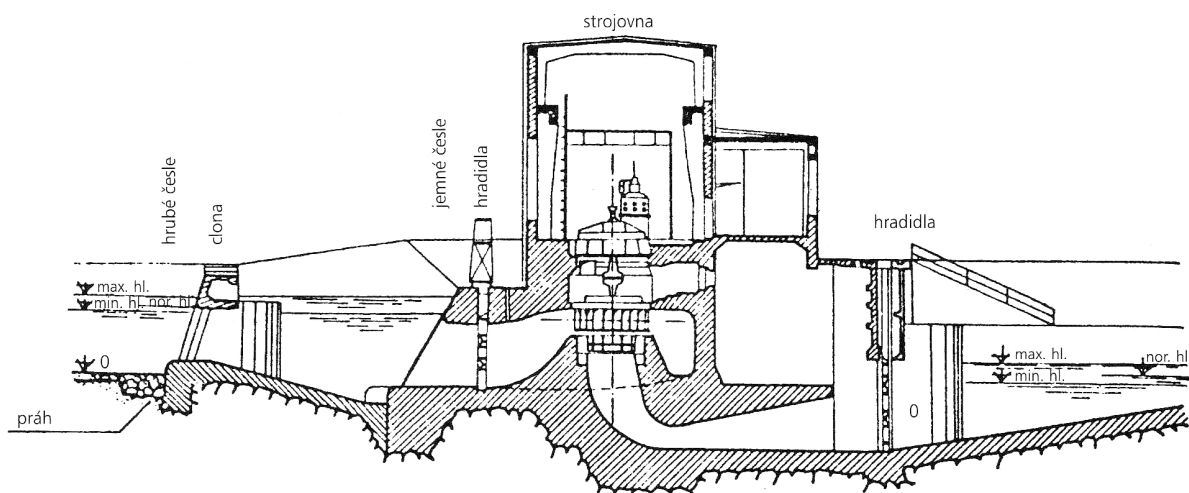
Podle výškového umístění vzhledem k hladině horní vody rozeznáváme vtokové objekty:

- **beztlakové** s volnou hladinou, upravené pro odběr vody z jezových zádrží, v nichž hladina vody kolísá jen velmi málo;
- **tlakové**, upravené pro odběr vody z přehradních nádrží nebo jezových zádrží, v nichž hladina vody při regulování odtoku významně kolísá.

Podle typu vodní elektrárny, již vtokový objekt slouží, rozeznáváme vtokové objekty:

- jezových vodních elektráren,
- vodních elektráren s beztlakovou derivací,
- vodních elektráren s tlakovou derivací.

Kompletní vtokový objekt (*Obr. 1.2*) se skládá z několika částí, které musejí společně zabránit vnikání splavenin, plovoucích nečistot, ledu a strhávání vzduchu do vtoků na turbíny.



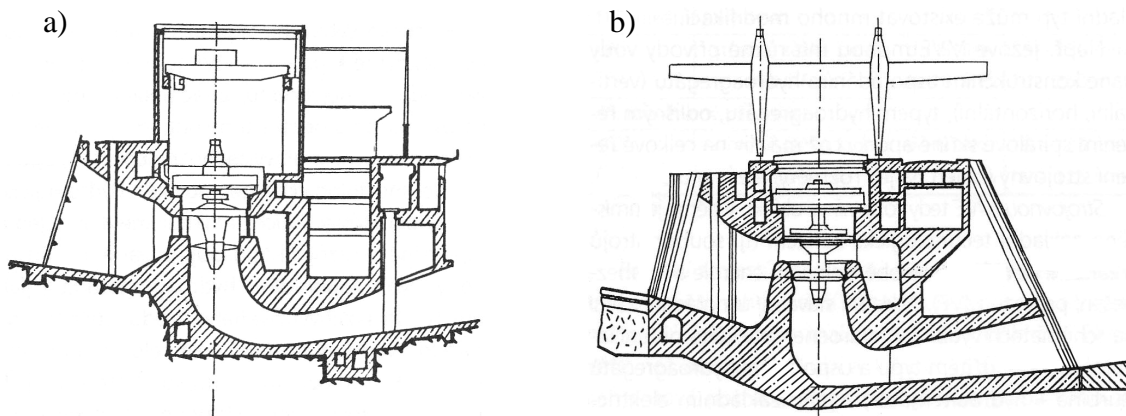
Obr. 1.2 Vtokové objekty jezové MVE

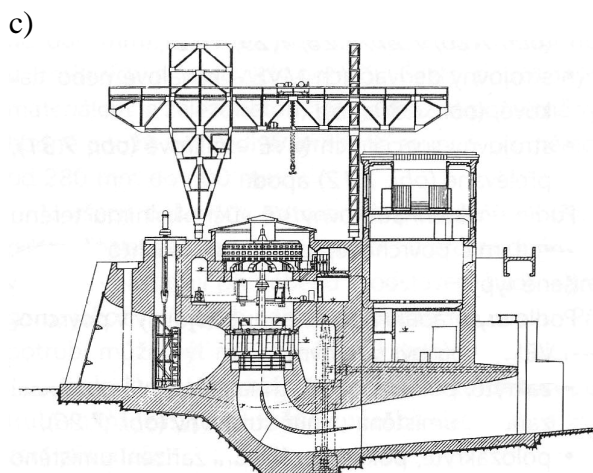
1.3.2 Přivaděče a odpady

Přivaděče a odpady MVE tvoří velmi často podstatnou část investičních nákladů při výstavbě velkých i malých vodních elektráren. Proto se jejich konstrukčním a dispozičním řešením věnuje velká pozornost. Z hlediska funkce se přivaděče a odpady MVE dělí na **beztlakové** a **tlakové** [3].

1.3.3 Výrobní objekty

Hlavní výrobní objekty MVE jsou: strojovna, rozvodna, případně jiné objekty pro doprovodná zařízení. Ve strojovně jsou umístěny hydroagregáty s pomocným zařízením. Strojovna se skládá z vrchní stavby a spodní stavby. Vrchní stavbou se rozumí část nad podlahou strojovny a spodní stavbou se rozumí část pod podlahou. Podle horní části strojovny mohou být dělené na: **zakryté**, **polozakryté** a **odkryté**.



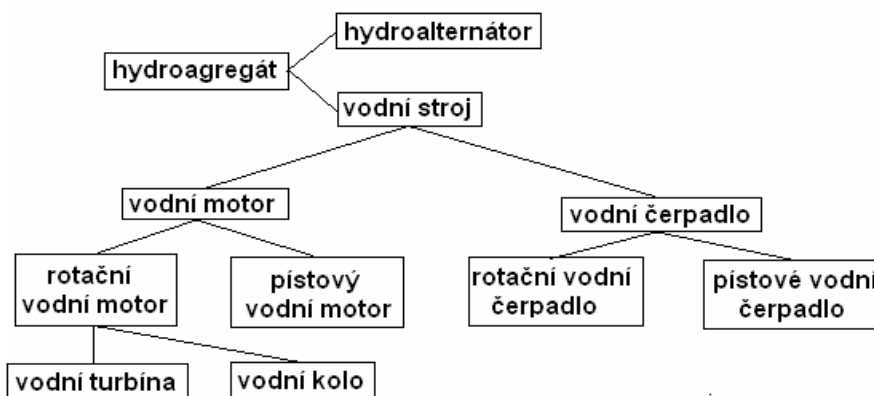


Obr. 1.3 Ukázky strojoven: a) zakrytá strojovna MVE, b) polozakrytá strojovna MVE, c) odkrytá strojovna MVE

Základní vybavení MVE tvoří turbína, hydroalternátor (elektrický generátor) a transformátor, které jsou doplněny početným technologickým zařízením potřebným k zajištění spolehlivého provozu [3].

1.4 Strojní zařízení MVE

K orientaci v pojmech je na Obr. 1.4 uvedeno schéma členění hydroagregátu.



Obr. 1.4 Schéma členění části hydroagregátu

Hydroagregát se skládá z vodního stroje (nejčastěji turbíny) a z hydroalternátoru nebo motorgenerátoru.

Vodní motor je zařízení sloužící k přeměně mechanické energie vody v mechanickou energii rotující hřídele (rotační motor) nebo pohybujícího se pístu (pístový motor).

Vodní čerpadlo přeměňuje mechanickou energii rotující hřídele nebo pohybujícího se pístu v mechanickou energii vody.

Vodní turbína je rotační vodní motor, jehož rotující částí je lopatkové oběžné kolo, kterému voda odevzdává svou mechanickou energii.

Hydroalternátor je vícepólový synchronní (příp. asynchronní) rotační stroj, který přeměňuje mechanickou energii rotující hřídele ve střídavý elektrický proud.

Motorgenerátor je vícepólový elektrický rotační stroj, nejčastěji s dvojím vinutím, který přeměňuje mechanickou energii rotující hřídele v energii elektrickou nebo opačně [3].

1.5 Turbíny

Vodní turbíny jsou nejvýznamnějšími hydrodynamickými motory. Jejich pracovním prvkem je oběžné kolo, ve kterém se využívá kinetické energie u rovnotlaké turbíny, popř. z části i energie tlakové u přetlakové turbíny [4].

Typy vodních turbín lze třídit podle různých hledisek:

- a) podle způsobu přenosu energie vody
- b) podle průtoku vody oběžným kolem
- c) podle polohy hřídele
- d) podle měrné energie
- e) podle výkonu
- f) podle vstupní části turbíny

a) podle způsobu přenosu energie vody:

- **přetlakové**
- **rovnotlaké**
- **mezní**

U turbín **přetlakových** vtéká voda z pevných zakřivených rozváděcích kanálů do kanálů oběžných, zakřivených v opačném směru než kanály rozváděcí. V rozváděcím ústrojí je pouze část tlakové měrné energie přeměněna v kinetickou měrnou energii vody. Zbývající (zpravidla) větší část tlakové měrné energie vody se změní v měrnou energii kinetickou až při průchodu lopatkovým prostorem oběžného kola. Voda u těchto turbín vyplňuje plně průtočné kanály oběžného kola [5].

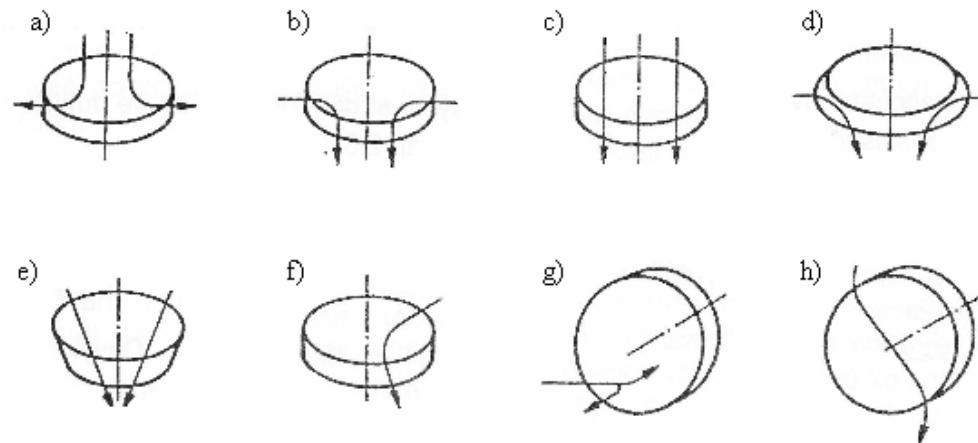
Jestliže se celá hodnota měrné energie mění v zařízení pro přívod vody k oběžnému kolu v kinetickou měrnou energii, potom je na vstupu i výstupu oběžného kola stejný tlak. Jde tedy o turbínu **rovnotlakou**.

Určitý přechod mezi přetlakovými a rovnotlakými turbínami tvoří dříve užívané turbíny **mezní**. Jde v podstatě o rovnotlakou turbínu, u níž jsou kanály oběžného kola

vytvořeny tvarovými lopatkami tak, že průtočný průřez kanálu je po celé délce zaplněn vodou a v žádném místě nedochází k odtrhávání proudu [4].

b) podle průtoku vody oběžným kolem:

- **centrifugální** (radiální odstředivé) – s vnitřním vtokem, voda protéká oběžným kolem směrem od hřídele (Founeyronova turbína)
- **centripetální** (radiální dostředivé) – s vnějším vtokem, voda protéká oběžným kolem směrem k hřídeli (historická Francisova turbína)
- **axiální** – voda protéká mezi lopatkami oběžného kola zhruba ve stejné vzdálenosti od jeho osy (Kaplanova turbína)
- **radiálně - axiální** – voda proudí oběžným kolem nejprve radiálně a po přiblížení k ose se mění směr proudění na axiální (moderní Francisova turbína)
- **diagonální** – voda protéká oběžným kolem v šikmém směru k ose hřídele (Dériazova turbína)
- **se šikmým průtokem** – voda vstupuje na lopatky oběžného kola z boční strany a vystupuje v osovém směru (turbína TURGO)
- **tangenciální** – voda proudí na lopatky oběžného kola v tangenciálním směru (Peltonova turbína)
- **s dvojím průtokem** – voda vstupuje do oběžného kola centripetálně a vystupuje centrifugálně (Bánkiho turbína)



Obr. 1.5 Rozdělení turbín podle průtoku oběžným kolem: a) centrifugální, b) centripetální, c) axiální, d) radiálně - axiální, e) diagonální, f) se šikmým průtokem, g) tangenciální, h) s dvojnásobným průtokem

c) podle polohy hřídele

- horizontální
- vertikální
- šikmé

d) podle měrné energie

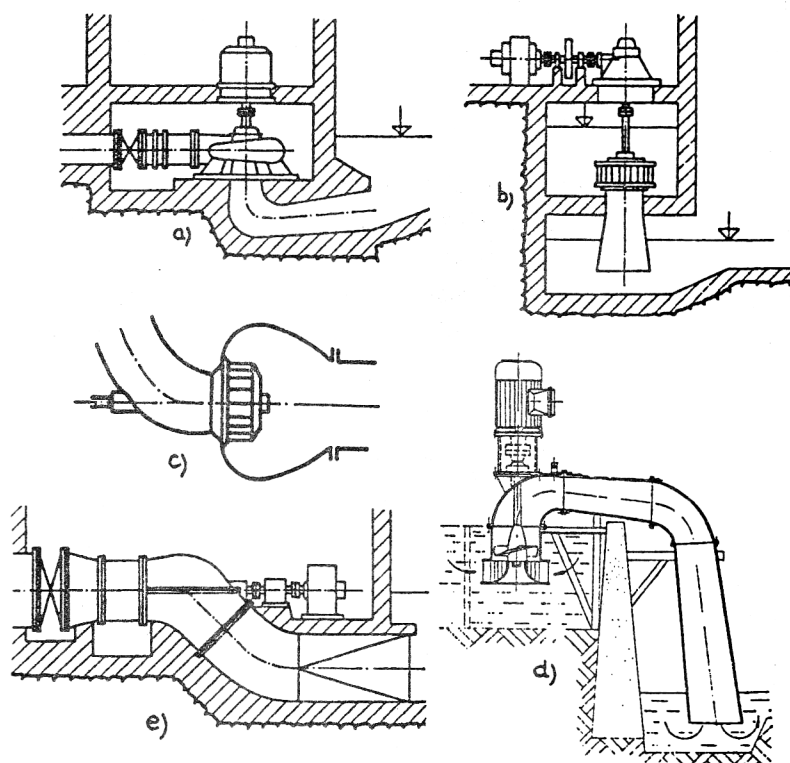
- nízkotlaké ($E \leq 200 \text{ J.K}^{-1}$)
- středotlaké ($E \leq 1\,000 \text{ J.K}^{-1}$)
- vysokotlaké ($E > 1\,000 \text{ J.K}^{-1}$)

e) podle výkonu

- velké ($P > 100 \text{ MW}$)
- střední ($P < 100 \text{ MW}$)
- malé ($P < 10 \text{ MW}$)
- drobné ($P < 1 \text{ MW}$)

f) podle vstupní části turbíny

- spirální – spirála před rozvaděčem
- kašnová – kašna s volnou hladinou
- kotlová – kotlové těleso na konci tlakového přívodu
- násoskové – zavzdušněním lze přerušit průtok
- přímoproudé – přímý průtok od vstupu po výstup

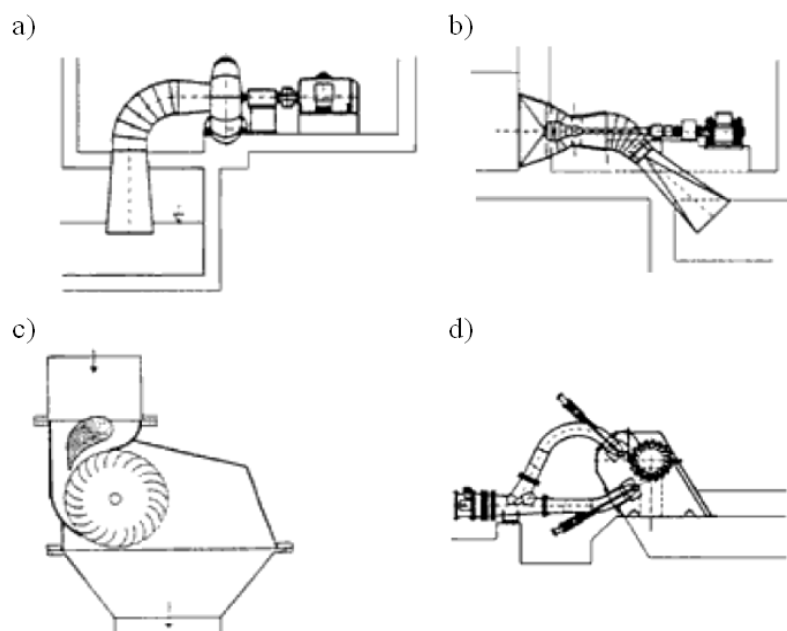


Obr. 1.6 Schéma vstupních částí turbín: a) spirální, b) kašnová, c) kotlová, d) násosková, e) přímoproudá

Turbíny používané v současnosti:

- **Bánkiho turbína** je konstrukčně jednoduchá a provozně spolehlivá rovnotlaká turbína. Lze využít pro spády od 1 do 50 m s rozsahem průtoku od 0,05 až do několika m^3 za sekundu,
- **Peltonova turbína** je vlastně robustní vodní kolo, nenahraditelné při vysokých spádech a malých průtocích. Je použitelná od průtoku 10 l/s a spádu větších než 40 m,
- **Francisova turbína** je určena pro velké průtoky, její účinnost bývá dostatečná při spádu od 10 m,
- **Kaplanova turbína** je unikátem v možnosti natáčet lopatky podle průtoku. Používá se pro spády 1 až 20 m, možný průtok je od 0,1 až několik m^3/s . Je velmi vhodnou volbou pro většinu MVE v našich podmínkách, ale náročná konstrukce se odráží ve vysoké ceně [6].

Výběr turbíny závisí na účelu a podmínkách celého vodního díla (elektrárny včetně vodní nádrže, řečiště či jiného zařízení usměrňujícího proud vody). Nejčastěji se osazují turbíny reakčního typu (Francisova nebo Kaplanova turbína), a to v bohaté paletě modifikací. V podmínkách našich řek se nejčastěji používají Kaplanovy turbíny s nastavitelnými lopatkami [2]. Obr. 1.7 ukazuje provedení elektráren se základními druhy turbín.



Obr. 1.7 Základní druhy turbín: a) Francisova, b) Kaplanova, c) Bánkiho, d) Peltonova

2 Zásady projektování MVE

2.1 Dispoziční řešení

Dispoziční řešení jezových MVE je považováno za hydraulicky účelné, jestliže je plně přizpůsobeno proudění vody. Proto se dnes již v průběhu projektové přípravy ověřuje u každého významnějšího hydroenergetického díla tohoto typu jeho celková hydraulická vhodnost hydraulickým modelovým výzkumem. Podle zkušeností a výsledků výzkumu o průběhu proudění vody, vnímání, pohybu, ukládání splavenin a zimním režimu platí pro účelné dispoziční řešení nízkotlakého vodního díla na řece tyto obecné zásady:

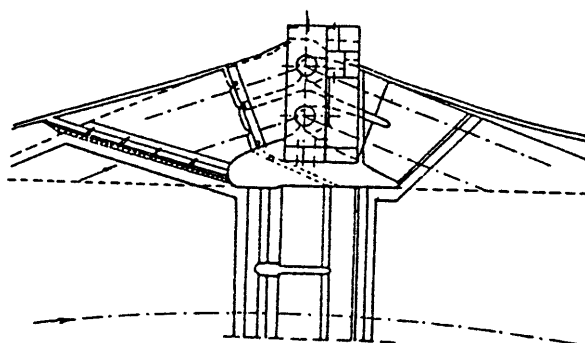
- pokud trasa řeky tvoří vlnovku, je účelné umístit zdymadlo (jez a vodní elektrárnu) blízko vrcholu říčního oblouku,
- vodní elektrárnu je vhodné umístit do konkávního oblouku břehu vedle jezu a dispozičně řešit tak, aby byla chráněna před splaveninami; zasazení do břehů je vhodné minimalizovat, břehová křídla musejí plynule navazovat na břehové linie v obou zdržích,

- do konkávních břehů je třeba situovat i odběry vody z toku,
- volná šířka toku by se měla v oblasti zdymadla měnit jen velmi plynule a neměla by být nikde menší, než je světlá šířka jezu.

2.2 Vtokové objekty

Řešení vtoku jezové VE úzce souvisí s volbou schématu a koncepce nízkotlakého vodního díla, s volbou typu strojovny a turbín i s celkovým dispozičním řešením.

U nejčastěji používaného břehového schématu nízkotlaké VE spočívá hydraulicky účelné řešení právě v natočení os vtoku a výtoku ve svislých osách turbín směrem od řečiště (Obr. 2.1).



Obr. 2.1 Hydraulicky účelné dispoziční řešení jezové příbřežní VE

Kompletní vtokový objekt skládající se z vtokového prahu, hrubých a jemných česlí, clony a hradidel, musí zabránit vnikání splavenin, plovoucích nečistot, ledu a strhávání vzduchu do vtoků na turbíny. Průtokový profil vtoku se navrhuje s takovými rozměry, aby v něm rychlost proudění nepřesahovala $0,8$ až $1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Vtoky do turbín mají mít plynulý tvar ve svislém i vodorovném řezu, aby vyvolávaly minimální odpory. Přední vtoková hrana má být zaoblená a ponořená pod minimální provozní hladinu tak, aby nedocházelo ke vzniku vírů a strhávání vzduchu do vtoků [3].

2.3 Přivaděče a odpady

Při konstrukci malých vodních elektráren se většinou navrhují beztlakové přivaděče (náhony), jsou totiž levnější než přivaděče tlakové. Z hlediska konstrukce se beztlakové přivaděče mohou dělit na otevřené a zakryté. Otevřené přivaděče se navrhují většinou jako kanály, a to nejčastěji s lichoběžníkovým nebo s obdélníkovým profilem. O tom, jaký typ průřezu se použije, rozhoduje situační řešení a velikost volného místa pro stavbu. Z konstrukčního hlediska je třeba při návrhu přivaděče splnit tyto požadavky:

- svahy přivaděče musejí být stabilní proti sesuvu a podemletí,
- přivaděčem nesmí prosakovat takové množství vody, které by mohlo ohrozit konstrukci přivaděče, nepříznivě změnit hladinu podzemní vody, nebo by se výrazněji projevilo na zmenšení výroby elektrické energie,
- u nasypných (nadzemních) částí přivaděčů musí být navrženo také převýšení, které zabrání přelití, nebo násyp musí být k přelití konstrukčně upravený opatřeními [3].

Nejjednodušším způsobem utěsnění přivaděče je použití plastové fólie, nebo opevnění svahu koryta betonovou těsnicí deskou, příp. panely. Při použití fólií se většinou vystačí se sklonem 1 : 2 až 1 : 1,75, zatímco při použití betonových panelů mohou mít svahy sklon až 1 : 1.

2.4 Česle

Česle mají za úkol zamezit, aby do hydraulického systému děl nevnikaly zároveň s odebíranou vodou takové mechanické nečistoty a předměty, které by mohly ohrožovat nebo komplikovat provoz. U nízkotlakých MVE navíc přistupuje i nutnost používat kromě jemných česlí i ochranné hrubé česle, schopné vzdorovat nárazům tuhých předmětů unášených vodou (kusů dřeva, ledových ker apod.). Hrubé česle jsou součástí beztlakového vtoku a jemné česle součástí vstupního profilu tlakového vtoku.

Při provozu vyvolávají hrubé česle i celý beztlakový vtokový objekt hydraulické ztráty, které vedou k poklesu užitého spádu turbíny. S tím je třeba při návrhu nízkotlakých děl předem počítat. Vzhledem k vznikajícím ztrátám se doporučuje, aby střední rychlost proudění ve vtokovém otvoru hrubých česlí nepřesáhla 0,6 až 0,7 m.s⁻¹. Vlastní hrubé česle tvoří mříž vertikálních česlic mezi dnovým prahem a nornou stěnou. Jednotlivé mříže mají zpravidla podobu silnostěnných trubek s vnějším průměrem 80 až 150 mm a vzdálenost mezi nimi je 300 až 600 mm.

Jemné česle bývají zpravidla zabudovány (pevně nebo s možností vyjímání po sekcích) do vstupního profilu tlakového vtoku nebo v jeho bezprostřední blízkosti. Nejčastěji bývají provedeny v podobě mříže vytvořené z jednotlivých česlic z páskové oceli. Pruty česlic mívají v příčném řezu rozměry 60 x 8 až 160 x 20 mm [6]. Naplaveniny zachycené na česlicích je nutno odklízet, aby nedocházelo ke zmenšení průtoku. Odklizení naplavenin se provádí buď ručně obsluhou, nebo v moderních MVE pomocí ramenových čistících strojů.

2.5 Projektové práce a dokumentace

Základním právním předpisem v oblasti výstavby je Zákon č. 50/1976 Sb., o územním plánování a stavebním pořádku (stavební zákon) ve znění pozdějších vyhlášek a zákonů. Je nutno věnovat pozornost zejména Vyhlášce č. 135/2001 Sb., o územně plánovacích podkladech a územně plánovací dokumentaci.

Projektová dokumentace je potřebná pro realizaci staveb a k získání všech stanovisek, která jsou nutná k získání povolení k výstavbě MVE. Jednotlivá stanoviska se získávají projednáváním a následným vyjádřením příslušného orgánu nebo organizace, které jsou ve smyslu stavebního zákona účastníky:

- územního řízení (1. fáze – získá se územní rozhodnutí),
- stavebního řízení (2. fáze – získá se stavební povolení).

Z nezbytně nutných projednání k získání stanovisek je možná vyjmenovat tato nejdůležitější:

- vodoprávní projednání na příslušné instituci spravující povolení, jíž přináležejí lokalita, v níž má být MVE vybudována,
- projednání podmínek výstavby a provozu MVE se schvalovacím orgánem státní správy,
- projednání na energetických rozvodných závodech o místě připojení a základních údajích připojení,
- výstavbu MVE je potřebné projednat se zástupci obcí, jejichž katastry jsou dotčené výstavbou.

Základní podmínkou pro realizaci MVE je získání pozemku pro výstavbu.

2.6 Legislativa

Pro provoz MVE je nutno získat licenci pro podnikání v energetice (živnostenský list se nevydává). Pokud nemá provozovatel vzdělání v oboru, je nutno absolvovat rekvalifikační kurz. Během provozu MVE je nutno dodržet zejména podmínky, které stanovil vodoprávní úřad v povolení k nakládání s vodami - především dodržování odběru sjednaného množství vody. Nedodržování minimálního průtoku přes jez by mělo být postihováno. Důležité je i odstraňování zachycených naplavenin na česlích (zejména dřeva a listí, ale i nejrůznějších odpadků) - je nutno zajistit jejich odvoz a likvidaci, vracení naplavenin do toku je zakázáno.

Rušení obyvatel hlukem by mělo být vyloučeno dobrým návrhem MVE [7].

2.6.1 Přehled nejdůležitějších zákonů

Zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon).

Zákon č. 180/2005 Sb., o podpoře využívání obnovitelných zdrojů energie. Vymezuje oblasti podpory OZE. Upravuje práva a povinnosti subjektů na trhu s elektřinou z obnovitelných zdrojů a podmínky podpory výkupu a evidence výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů.

Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon). Udává minimální průtok. Obvykle je pro toky s průtokem $0,5$ až $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ stanovován jako minimální průtok Q_{355d} . To je takový, který je v daném profilu vodního toku dosažen nebo překročen průměrně 355 dní v roce. Pro malé toky, je to Q_{330d} .

Zákon č. 114/1992 Sb., o ochraně přírody a krajiny

Zákon č. 100/2001 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí a o změně některých souvisejících zákonů (zákon o posouzení vlivů na životní prostředí)

Zákon č. 500/2004 Sb., správní řád [8]

Zákon č. 334/1992 Sb., o ochraně zemědělského půdního fondu [9]

2.6.2 Nejdůležitější vyhlášky a nařízení

Vyhlášky Ministerstva zemědělství:

č. 432/2001 Sb., o dokladech, žádosti o rozhodnutí nebo vyjádření a o náležitostech povolení, souhlasů a vyjádření vodoprávního úřadu

č. 470/2001 Sb., kterou se stanoví seznam významných vodních toků a způsob provádění činností souvisejících se správou vodních toků

č. 195/2002 Sb., o náležitostech manipulačních řádů a provozních řádů vodních děl

Vyhláška **č. 7590/2002 Sb.**, o technických požadavcích pro vodní díla

Nařízení vlády **č. 71/2003 Sb.**, o stanovení povrchových vod vhodných pro život a reprodukci původních druhů ryb a dalších vodních živočichů a o zjišťování a hodnocení stavu jakosti těchto vod. [8]

3 Výběr lokality

3.1 Posouzení vhodnosti lokality

Vhodné lokality pro výstavbu MVE vybíráme především na základě velikosti hydroenergetického potenciálu toku. Musíme však vzít v úvahu i následující údaje:

- možnost umístění vhodné technologie
- vhodné geologické podmínky
- možnost vybudování příjezdové cesty i pro těžkou techniku
- minimalizace rušení přilehlého okolí hlukem
- minimalizace míry zásahu do okolní přírody
- vyřešení majetkoprávních vztahů

3.1.1 Hydroenergetický potenciál

Každý vodní tok představuje určité množství vodní energie. Hydroenergetický potenciál vodního toku je základní údaj o toku určující, jakou energii (kWh/rok) unášejí jeho průtoky. Údaje o hydroenergetickém potenciálu povrchových vodních toků na určitém území slouží k celkovému přehledu o možnostech využití toků, resp. jejich potenciální energie [3]. Teoretický hydroenergetický potenciál lze vypočítat ze vzorce:

$$P_t = \rho_v \cdot g \cdot Q \cdot H_b \text{ [kW]} \quad (3.1)$$

kde: P_t je teoretický výkon na hřídeli turbíny [W]

ρ_v je konstanta hustoty vody $998 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

g představuje gravitační konstantu $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

Q značí průměrný roční průtok vodním strojem [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]

H_b udává celkový spád [m]

Tento vzorec je pouze teoretickým určením výkonu pro přeměnu energie s účinností 100 % .

3.1.2 Spád

Rozlišujeme dva druhy spádu, a to spád celkový (brutto) H_b a spád čistý (netto) H . Snahou je získat co nejvyšší hodnotu celkového i čistého spádu. To lze teoreticky provést výstavbou vzdouvací stavby (jezu, přehradu).

Celkový spád turbíny H_b je definován jednoduše jako rozdíl kót horní hladiny a kóty hladiny bezprostředně pod vodním dílem [10]. Určení čistého spádu je značně složitější. Čistý spád získáme odečtením ztrát od spádu celkového, a to ztrát výškových za česlemi, hydraulických ztrát v přivaděči, ztrát v odpadu, ztrát kinetické energie vody vstupujících do přivaděče a vystupujících z turbíny a dalších ztrát. Velkou roli hraje výběr vhodného přivaděče. Aplikace delšího přivaděče vnáší většími hydraulickými ztrátami nepřesnosti do výpočtu čistého spádu. Je třeba vzít v úvahu, že horní hladina není během roku konstantní, mění se s přirozeným průtokem vodoteče.

3.1.3 Průtok

Průtok Q [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] je definován jako celkové množství vody protékající turbínou za jednotku času. Toto množství představuje celkové množství vody potřebné pro provoz turbíny při zatížení. Protože průtok turbínou je podle zvoleného počtu strojů odvozen od návrhového průtoku vodní elektrárnou Q_{nVE} , jeví se jako prvořadé provést návrh celkového průtoku vodní elektrárnou.

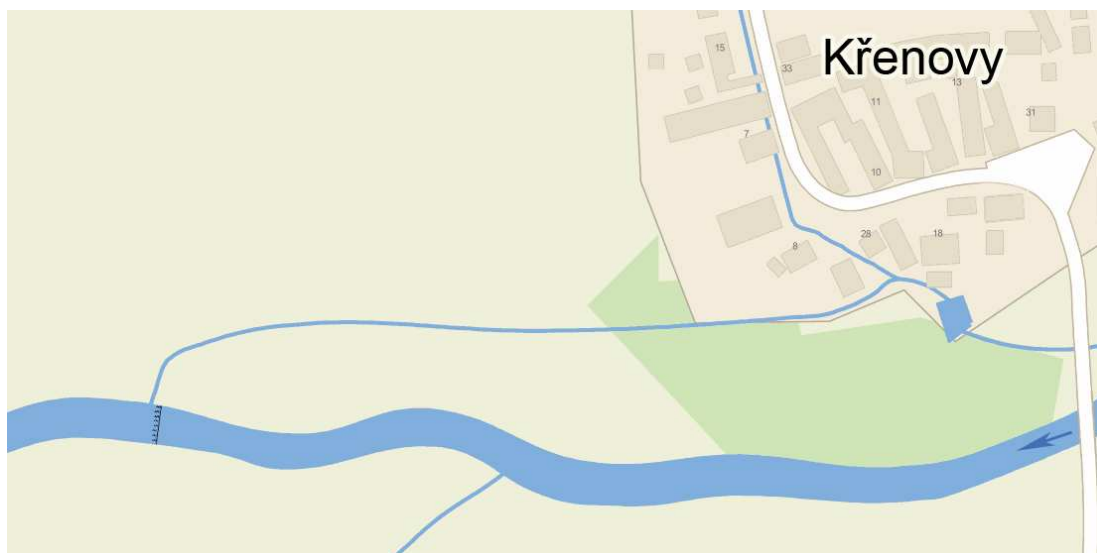
3.2 Nalezení vhodné lokality

Vhodná lokalita pro výstavbu byla hledána v okolí města Plzně na velkých řekách. Bohužel v dnešní době nejvhodnější lokality pro výstavbu MVE, tj. bývalé mlýny, u kterých by se dalo využít stavby strojovny, náhonů a odpadu, jsou již na MVE přestavěny. Též místa s největším spádem a vhodným průtokem jsou v okolí již elektrárnami osazeny. Z důvodu velkého rozmachu výstavby MVE není jednoduché najít nevyužité vhodné místo pro stavbu.

Pro účel této práce byly nalezeny dvě lokality. První vhodná lokalita je na řece Radbuze u obce Křenovy a druhá se nachází na řece Berounce u obce Nadryby. Tyto lokality jsou dále charakterizovány, porovnány a na vhodnější z nich je proveden návrh malé vodní elektrárny.

3.3 Lokalita u obce Křenovy

Jedná se o lokalitu s kamenným jezem u obce Křenovy. Obec se nachází zhruba 30 km od města Plzeň a spadá do okresu Domažlice. Jez je vybudován 300 m od Křenov na 58,2 ř. km řeky Radbuzy. Na *Obr. 3.1* je za jezem zobrazen přítok z bývalého potoka, který je ovšem v dnešní době již zasypán.



Obr. 3.1 Vyznačení toku u obce Křenovy

(Zdroj: <http://www.mapy.cz>)

K místu nevede žádná příjezdová cesta, kterou by bylo možno využívat v případě výstavby a spravování MVE. Také vedení distribuční sítě vysokého napětí 22 kV pro připojení MVE do elektrizační soustavy neprochází oblastí viditelné na výše uvedené mapě. Nejbližší možnost připojení MVE do elektrizační soustavy je vzdálená 450 m. Pro případnou realizaci projektu výstavby MVE je velice důležité vyřešení majetkoprávních vztahů. V místě jezu je zemědělská půda v soukromém vlastnictví dvou vlastníků. Každý vlastník má přílehlou část na jednom břehu řeky. V tomto se místě řeka příliš nekrotí, nezáleží tedy na tom, na jakou stranu by bylo vodní dílo umístěno. Případné umístění strojovny by bylo vhodnější na břehu v pravé části jezu z důvodu snadnějšího vybudování příjezdové cesty od obce Křenovy.

3.3.1 Hydrologická data Křenovy

plocha povodí:	465,69 km ²
průměrná dlouhodobá roční výška srážek:	690 mm
průměrný dlouhodobý roční průtok:	$Q_a = 2,59 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
celkový spád jezu:	$H_b = 2,08 \text{ m}$

teoretický hydroenergetický potenciál:

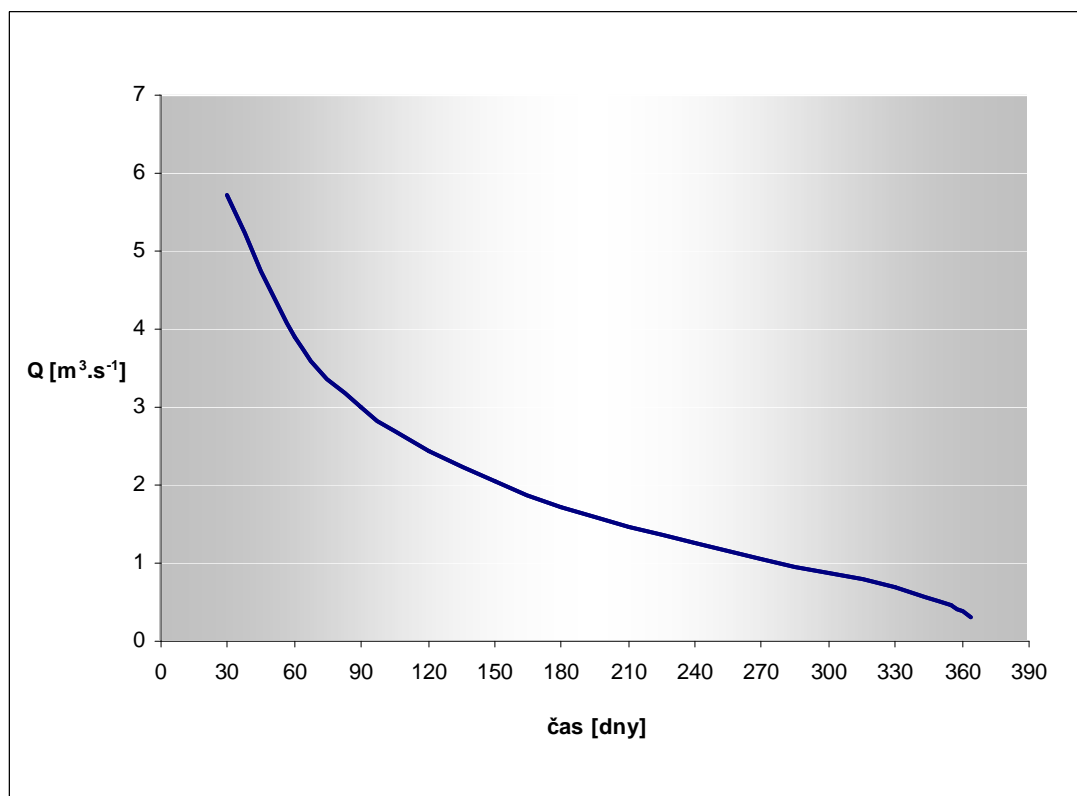
$$P_t = \rho_v \cdot g \cdot Q \cdot H_b = 998 \cdot 9,81 \cdot 2,59 \cdot 2,08 = \underline{52,743 \text{ kW}}$$

Tabulka 3.1 M-denní průtok, Křenovy

M-dnů	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
Q [m ³ .s ⁻¹]	5,72	3,89	3,00	2,44	2,04	1,73	1,47	1,26	1,06	0,87	0,68	0,47	0,32

(Zdroj: hydrologická data od ČHMÚ)

Pro lepší přehlednost byly hodnoty zpracovány do následujícího grafu.



Graf 3.1 Odtoková křivka lokality Křenovy

(Zdroj: Vlastní zpracování na základě hydrologických dat od ČHMÚ)

3.4 Lokalita u obce Nadryby

Obec Nadryby leží 15 km od města Plzeň, v okrese Plzeň-sever. Obec obtéká z jižní strany řeka Berounka a v blízkosti Nadryb jsou vybudovány dva široké jezy. Tyto jezy jsou od sebe vzdálené 1,2 ř. km. Vzdálenější jez po říčním toku od Plzně je již malou vodní elektrárnou osazen a je součástí Valentovského mlýna. Díky vodnatosti řeky je možné využít hydroenergetického potenciálu i prvního jezu pro výrobu elektrické energie.

Volný jez, který byl vybrán jako vhodná lokalita pro výstavbu MVE, se nachází na 120,03 ř. km. Je široký 6,7 m a dlouhý 13,7 m. Tento jez je v současné době v horším stavu, a to tak, že je v jedné své části provalený. Pod přepadem je u pravého břehu nános

zeminy, na kterém se vytvořil travní porost. Stav koryta v tomto místě způsobuje při vyšších hladinách nekontrolovatelné vylití řeky ze svého koryta do přilehlých soukromých polí. Mapa se zobrazením záplavové čáry je uvedena v *Příloze 1 na Obr. 1.* Z důvodu regulace a revitalizace toku si Povodí Vltavy, státní podnik nechal vypracovat projekt na návrh rekonstrukce jezu. Tento projekt byl zpracován Dr. Ing. Petrem Nowakem z Fakulty strojní ČVUT Praha v roce 2008. Při návrhu nového jezu bylo počítáno s možným budoucím využitím hydroenergetického potenciálu lokality.

Jak je vidět níže na *Obr. 3.2*, kterým je mapa lokality v blízkosti vodního díla, k jezu vede cesta jak od příjezdové silnice do obce, tak přímo od Nadryb. Tato nezpevněná polní cesta je široká na průjezd vozu a byla by vhodná pro využití k výstavbě či spravování MVE. V případě potřeby se dá cesta zpevnit kamenným prohozem či jinými úpravami pro umožnění průjezdu stavební techniky. V blízkosti je také vedení distribuční sítě vn 22 kV, tudíž kabeláž pro připojení do sítě by nemusela být příliš dlouhá.

Zemědělská půda v blízkosti se dělí mezi tři majitele. V bezprostřední blízkosti jezu na levém břehu je půda vlastněna soukromou osobou, prakticky se jedná o malý pozemek přiléhající k levé straně jezu. Další pozemky, které by byly ovlivněny výstavbou na této straně, jsou v obecním vlastnictví. Také příjezdovou cestu vlastní obec Nadryby. Na pravém břehu je půda obecní, jen malou část nezasahující do bezprostřední blízkosti vody má ve vlastnictví soukromník. Případné vybudování strojovny MVE by bylo vhodnější na levém břehu řeky. Na tuto stranu je lepší příjezd ze silnice od obce. Taktéž v tomto místě není tolik stromů a keřů jako na druhé straně. Na pravém břehu není terén tak rovný, což by vedlo k nutně větším terénním úpravám než na straně druhé.



Obr. 3.2 Vyznačení toku u obce Nadryby (Zdroj: <http://www.mapy.cz>; vlastní úprava)

3.4.1 Hydrologická data Nadryby

plocha povodí:	5235,79 km ²
průměrná dlouhodobá roční výška srážek:	640 mm
průměrný dlouhodobý roční průtok:	$Q_a = 26,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
současný celkový spád jezu:	$H_b = 0,9 \text{ m}$
návrhový celkový spád jezu:	$H_b' = 1,7 \text{ m}$

teoretický (návrhový) hydroenergetický potenciál:

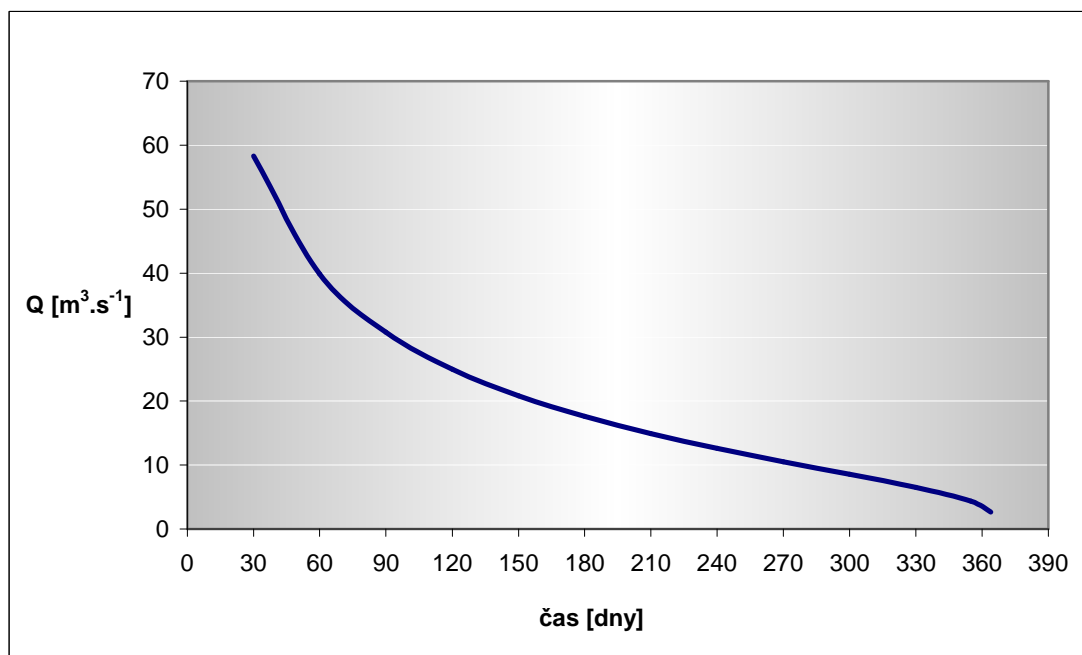
$$P_t = \rho_v \cdot g \cdot Q \cdot H_b' = 998 \cdot 9,81 \cdot 26,1 \cdot 1,7 = \underline{434,399 \text{ kW}}$$

Tabulka 3.2 M-denní průtok, Nadryby

M-dnů	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
Q [m ³ ·s ⁻¹]	58,3	39,9	30,8	25,0	20,8	17,6	14,9	12,6	10,5	8,53	6,52	4,33	2,66

(Zdroj: hydrologická data od ČHMÚ)

Pro přehlednost byly hodnoty z výše uvedené tabulky upraveny do grafické podoby.



Graf 3.2 Odtoková křivka lokality Nadryby

(Zdroj: Vlastní zpracování na základě hydrologických dat od ČHMÚ)

Pro posouzení vlivu vzdutí za velkých vod je důležité zjistit periodicitu N-letých vod.

Tabulka 3.3 N-leté průtoky, Nadryby

N-let	1	2	5	10	20	500	100
Q [m³.s⁻¹]	189	271	408	521,0	654	855	1027

(Zdroj: Studie opravy jezu Berounka - Nadryby)

4 Návrh MVE u obce Nadryby

Tato lokalita byla zvolena po zhodnocení hydroenergetických vlastností jezů u obcí Křenovy a Nadryby z několika níže uvedených pohledů.

Prvním důvodem je malý využitelný průtok v řece Radbuze u Křenov. Spád je zde sice větší a teoreticky využitelný i pro Bánkiho turbínu, která má jednoduchou konstrukci a snížila by náklady na výstavbu, ale elektrárna by byla značně omezena průtokem. Na tento průtok by bylo možno využít pouze jednu Bánkiho turbínu. U jiných projektů s podobným spádem je zřejmé, že instalovaný výkon elektrárny by dosahoval jen hodnoty okolo 20 kW.

Je nutno vzít v úvahu i to, že k jezu v Křenovech není žádná příjezdová cesta. Výstavba cesty by zvýšila náklady na realizaci MVE. Také větší vzdálenost od distribuční sítě, pro možnost připojení elektrárny elektrizační soustavy, navýší náklady v podobě delších výkopů a kabeláže.

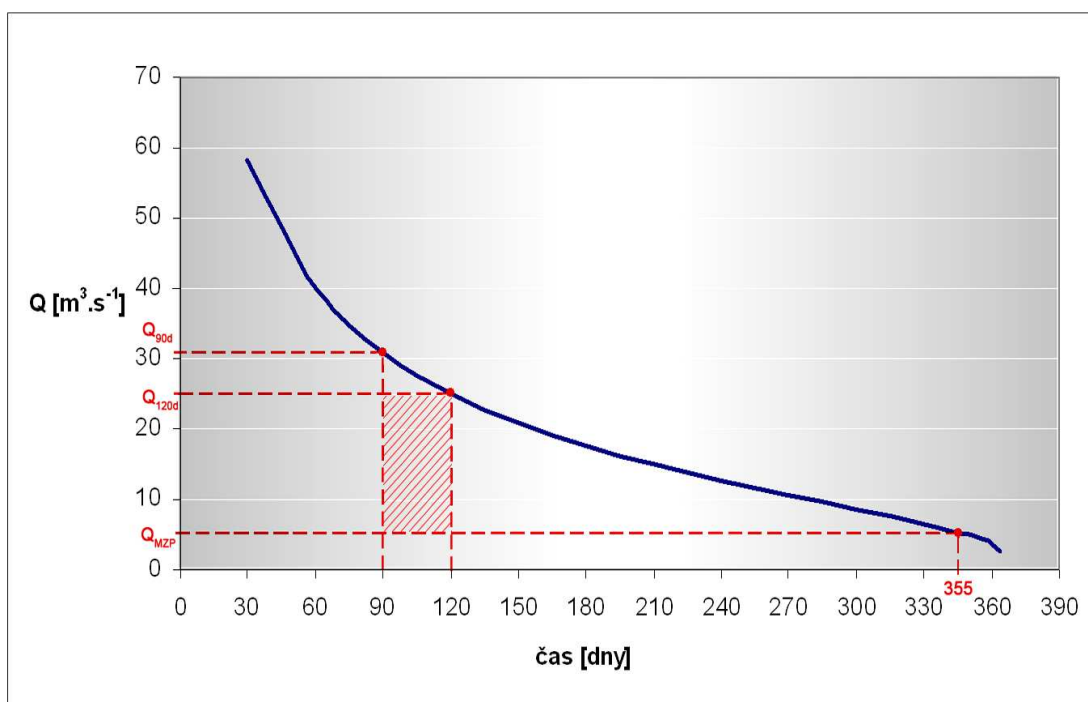
Lokalita u obce Nadryby byla tedy zvolena jak kvůli průtoku v řece Berounce, tak kvůli existenci příjezdové cesty a bližší možnosti připojení do elektrizační soustavy. Posledním důvodem vybrání této lokality je posouzení vhodnosti využití hydroenergetického potenciálu u připravovaného projektu návrhu jezu, který si nechalo vyprojektovat Povodí Vltavy, s. p.

Jelikož práce slouží pouze jako teoretická předprojektová příprava realizace elektrárny a pro posouzení možnosti využití toku, nebyla řešena možnost odkupu přilehlých pozemků od stávajících vlastníků. Je tedy předpokládáno, že v případě realizace by majitelé s prodejem svých pozemků souhlasili.

4.1 Teoretické využití průtokových poměrů

Při návrhu MVE je v první řadě důležité určit celkový průtok vodní elektrárnou Q_{nVE} . To však není jednoduché z důvodu velkých průtokových změn v průběhu roku a také značné difference mezi roky vodnými a suchými. Pro představu rozdílu hladin v různě vodných rocích je graficky zobrazeno kolísání hladiny v lokalitě Nadryby v *Příloze 1* na *Grafu 1.*. Správné určení Q_{nVE} je důležité, protože je snaha o co největší roční výrobu elektrické energie při minimálních provozních a investičních nákladech. Obecně se návrhový průtok vodní elektrárnou volí v oblasti mezi 90denní (Q_{90d}) a 120denní (Q_{120d}) vodou. Pro představu o velikosti návrhového průtoku je nejlepší vyznačit tyto hodnoty v odtokové křivce, jak je ku příkladu uvedeno v *Obr. 4.1*. U elektráren v blízkosti jezu, jako je v našem případě, se tento průtok určuje blíže hodnoty Q_{90d} . Pro přesné určení návrhového průtoku je nejlepší volbou získání hodnot M – denních průtoků od Českého hydrometeorologického ústavu.

Je důležité zohlednění minimálního zůstatkového průtoku, tj. průtoku vody, který musí vždy protékat v korytě řeky za místem odběru při provozu MVE. Tímto minimálním zůstatkovým průtokem se zabývá Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách, konkrétně § 36. Účelem stanovení Q_{MZP} je zachovat základní vodohospodářskou a ekologickou funkci toku pod vodním dílem. Dříve se průtok Q_{MZP} obecně určoval dle hodnoty Q_{330} , tedy z průtoku, který byl dosažen nebo překročen průměrně 330 dní v roce. Dnes stanovuje MZP vodoprávní úřad dle metodického pokynu č. ZP16/98. Pro stanovení hodnoty se vychází z průměrných denních průtoků z let 1931 – 1980 nebo 1931 - 1960. Pro náš případ bylo využito M - denních průtoků poskytnutých od ČHMÚ, který průměruje hodnoty z let 1931 – 1980. V případě průtokových poměrů u Nadryb je MZP dle pokynu ZP16/98 roven Q_{355d} . Tato rovnost platí pro lokality s průtokem Q_{355d} mezi $0,51 - 5,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



Graf 4.1 Vyznačení teoretického návrhového průtoku

(Zdroj: Vlastní zpracování dle poskytnutých dat od ČHMÚ)

Podle výše uvedených obecných postupů byly stanoveny hodnoty průtoků takto:
návrhový průtok vodní elektrárnou:

$Q_{nVE} = Q_{90d} - Q_{120d}$ v rozpětí mezi $30,8 - 25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, kdy Q_{nVE} se blíží k $30,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
minimální zůstatkový průtok: $Q_{MzP} = Q_{355d} = 4,33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Ovšem toto určení je pouze teoretické. V praxi je třeba přizpůsobit velikost průtoku elektrárnou hlnostem turbín, které nabízí výrobce pro daný spád. Je pak důležité vybrat turbínu od výrobce, který nabízí ideální variantu pro danou lokalitu. Často se nedá v našich řekách využít celého hydroenergetického potenciálu za použití jedné turbíny, existuje pak možnost rozdělení průtoku elektrárnou na větší počet turbín s určitou hlností.

4.1.1 Předběžný teoretický výkon turbíny a soustrojí

Ve stádiu, kdy ještě není vybrané vhodné turbosoustrojí, lze vypočítat orientační velikost výkonu MVE dle zjednodušených, základních vztahů.

Vztah pro **výpočet výkonu na hřídeli** turbíny je analogický jako vztah pro výpočet teoretického hydroenergetického potenciálu uvedeného výše. Jelikož přeměna energie vody na energii mechanickou, která je na hřídeli, není 100%, přibude ve vzorci ještě účinnost η_T , která se dle literatury pohybuje mezi 0,6 – 0,9. Největší účinnost, tj. 0,9 dosahují Kaplanovy

turbíny s větším výkonem. Pro náš případ je předběžně počítáno s účinností 0,8, která odpovídá menším Kaplanovým turbínám.

Pro přesnější určení výkonu se již při tomto výpočtu nepoužívá celkový spád H_b , nýbrž čistý spád využitelný turbínou H . Největší ovlivnění celkového spádu je způsobeno snížením hladiny v přívodním kanálu a současně jejím zvýšením v kanálu odpadním. Je tedy nutné hodnotu celkového spádu snížit. V našem případě byl spád snížen na 1,5 m.

$$P_T = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_T = 998 \cdot 9,81 \cdot 26,1 \cdot 1,5 \cdot 0,8 = \underline{306,634 \text{ kW}}$$

Pokud chceme určit **výkon na generátoru**, musíme ovšem tuto hodnotu výkonu na hřídeli turbíny upravit ještě o ztráty na převodech η_p a ztráty na samotném generátoru η_G . Účinnost řemenových převodů se pohybuje v intervalu 0,92 – 0,98 a účinnost generátoru mezi 0,84 – 0,97. Účinnost generátoru je značně závislá na velikosti zařízení a volbě typu generátoru.

$$P_G = P_T \cdot \eta_p \cdot \eta_G = 306,634 \cdot 0,95 \cdot 0,95 = \underline{276,737 \text{ kW}}$$

Jak již bylo uvedeno, tyto vypočítané hodnoty jsou pouze orientační a slouží pro představu o vhodnosti využití uvažované lokality. Tyto vzorce počítají pouze s jednou ideální turbínou na daný tok. V praxi ovšem není možné zvolit turbínu od výrobce, která je zcela vyhovující na spád a průtok v lokalitě a často je nutné pro využití celého průtoku volit větší počet turbín.

4.2 Stavební řešení

V případě přípravy zcela nového projektu výstavby MVE je třeba věnovat zvýšenou pozornost dispozičnímu řešení. Musíme si uvědomit všechna rizika a výhody, které lokalita nabízí, a z toho vyjít při rozhodování o umístění strojovny. Musíme zvážit, zda je pro nás vhodná stavba typické jezové elektrárny, nebo umístění stavby na uměle vytvořeném korytě. Obě umístění mají své výhody i nevýhody a nedá se obecně říci, která varianta je nejlepší. Vždy je třeba navrhovat stavební řešení pro danou lokalitu.

Pokud zvolíme stavbu jezové vodní elektrárny, budeme využívat pouze spádu vytvořeného vzduším vody na jezu. Voda se odebírá těsně před jezem a ústí zpět z elektrárny do jeho vývaňště. Strojovna je umístěna přímo na břehu vedle jezu. Tomuto typu elektrárny stačí tedy krátký přívodní kanál. Jezové malé vodní elektrárny se navrhují s pohyblivým jezem, tím lze zabránit zvyšování hladiny nad jezem při vyšších průtocích a minimálního

zůstatkového průtoku za malého průtoku. Výhodou tohoto řešení je menší náročnost na zastavěnou plochu. Ovšem umístěním strojovny blíže k hlavnímu toku řeky je elektrárna více ohrožena povodněmi. Další nevýhodou je také to, že stavbu i případné opravy je třeba realizovat při průtoku vody.

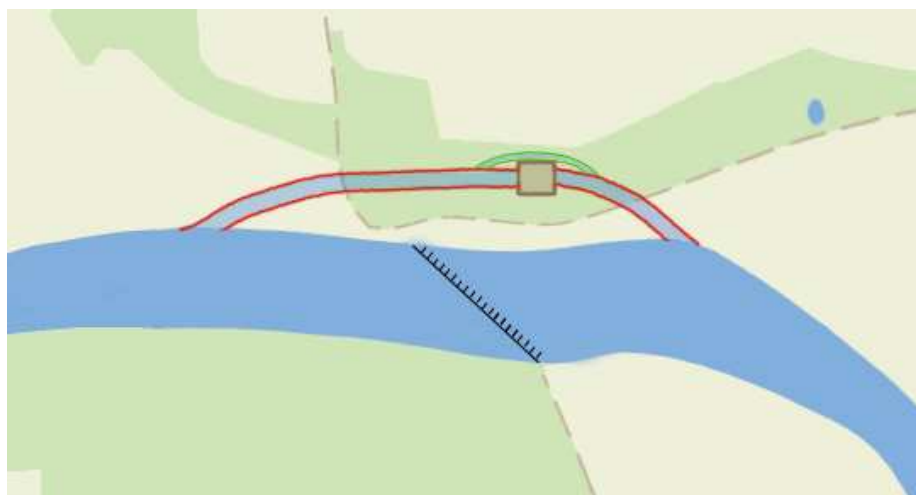
Pokud zvolíme odklonění části toku do umělého koryta, navýší se nám náklady na výstavbu o výkopové práce většího rozsahu, než by tomu bylo v prvním případě. Velkou výhodou této volby je však, že budova strojovny není tak ohrožena při případném vylití řeky ze svého koryta. V případě velkého či naopak malého průtoku lze průtok turbínou regulovat stavidlem na začátku přírodního kanálu. Tímto způsobem jsme schopni vždy zaručit MZP.

V případě přípravy projektu v Nadrybech, kde v uvažovaném místě není tok zásadně zakroucen, se na první pohled zdá lokalita vhodná pro volbu výstavby jezové MVE. Ale je třeba se na lokalitu podívat blíže. V místě případného umístění strojovny je dle záplavové čáry vidět, že toto území bude pravděpodobně zatíženo záplavami. Výstavba strojovny by byla v měkkém břehu složitá. Proto je vhodné uvažovat spíše stavbu strojovny dále od břehu hlavního toku. Vybudováním umělého koryta se sice mírně zvedne hladina vody v odpadním kanále, ovšem využije se delší části řeky, tudíž nejen spádu jezu. Spád využitelný turbínou nebude tedy o tolik snížen. Je ovšem nutné zvolit kompromis mezi oddálením strojovny od břehu a ekonomickou náročností vybudování náhonu a odpadu.

Jelikož ještě není rozhodnuto, zda bude projekt výstavby MVE zahrnut do projektu úpravy stávajícího jezu, je při návrhu stavebního řešení uvažován projekt výstavby MVE jako projekt samostatný. Pokud by se Povodní Vltavy, s. p. rozhodlo pro stavbu MVE, může zvolit řešení s umístěním strojovny ke břehu řeky. V opačném případě, kdy by byla výstavba prováděna samostatně po dokončení úpravy jezu, byla by výstavba na břehu hůře proveditelná kvůli nucenému zásahu do jezu. Také z důvodu nezahrnutí výstavby MVE do projektu rekonstrukce jezu, bylo rozhodnuto o řešení s krátkým náhonem a odpadním kanálem, jak je naznačeno na *Obr. 4.2*.

4.2.1 Dispoziční řešení

Kvůli co největšímu omezení ztrát je vhodné navrhovat vtokové objekty tak, aby voda při vtékání do náhonu prudce nenarážela na zadní hranu břehu vtoku, čímž by se tvořily víry. Jinými slovy, aby břeh koryta řeky přecházel plynule přes vtok do náhonu. To znamená, že osa vtoku má svírat s osou hlavního toku v řece co nejmenší úhel. Dle literatury je účelné, aby tento úhel nepřesáhl 30°. Pro využití většího spádu je budova strojovny umístěna blíže k vyústění zpět. Umělé koryto odebírá vodu a ústí v levém břehu řeky Berounky.



Obr. 4.1 Návrhová situace stavebního řešení

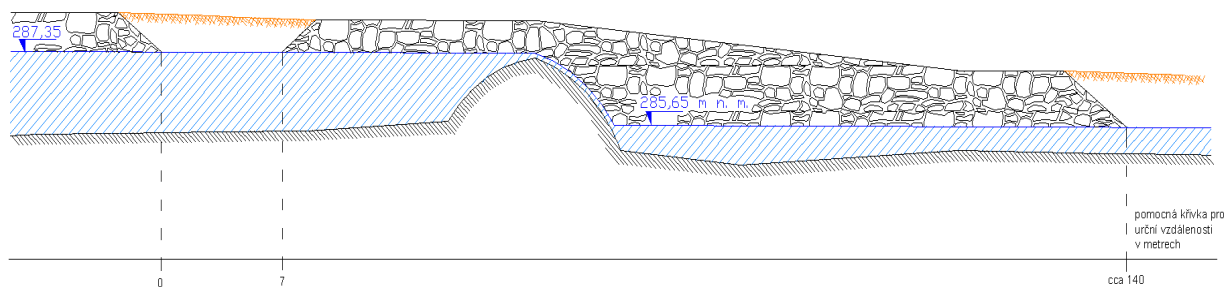
(Zdroj: Vlastní zpracování)

4.2.2 Přívodní kanál

Před vtokem do náhonu bude umístěna norná stěna s hrubými česlemi. Tato stěna bude půdorysně šikmá vůči podélné stěně náhonu tak, aby odváděla naplaveniny ke břenu. Na vtok do přívodního kanálu je vhodné umístit dvě stavidla pro regulaci průtoku v přivaděči. Přívodní kanál bude lichoběžníkového profilu. Je důležité, aby v přivaděči nebyly žádné velké výčnělky a nerovnosti, které by kladly odpor tekoucí vodě. Tato oblast má relativně pevné podloží, můžeme tedy navrhnout sklon přivaděče 1:1,5 bez opevnění svahů proti vymílání. V případě, že se při výkopových pracích rozhodne o opevnění proti sesuvu a průsaku vod, můžeme použít obklad folií. Navrhovaný přivaděč bude 2,2 m vysoký a jeho šířka bude u dna 5,3 m. Takto navržený kanál bude mít průtok $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Koryto bude vyhloubeno tak, aby rychlost vody v něm nepřesahovala $1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, což by způsobovalo vymílání zeminy. Celý přívodní kanál bude dlouhý 150 m.

Na Obr. 4.3 je zakreslen vtok, výtok a upravený jez. Jez byl naznačen dle návrhu o úpravě jezu od Povodí Vltavy, s. p.

Řez: A-A



Obr. 4.2 Příčný řez tokem, naznačující situaci odběru vody (Zdroj: Vlastní zpracování)

4.2.3 Odpadní kanál

Odpadní kanál bude blíže k elektrárně vyhlouben více kvůli snížení hladiny v tomto místě, čímž se omezí vliv výšky hladiny za elektrárnou na užitný spád. Začátek odpadu by měl být pro jistotu zpevněn betonovým rámem nebo panely z důvodu víření vody vystupující ze savky turbíny. Odpadní kanál bude dlouhý zhruba 50 m.

4.2.4 Rybí přechod

Je nutné umožnit migraci ryb kolem MVE a zabránit vplutí vodních živočichů do turbíny. O zajištění migrace ryb kolem bariér mluví Zákon č. 254/2001 Sb. o vodách a o změně některých zákonů. Ten se také nazývá vodní zákon. Průtok rybovodem je v porovnání s průtokem v turbínách mnohem menší, nemusíme se tedy obávat snížení výkonu turbíny.

Při návrhu výstavby musíme dbát na optimální zvolení typu stavby. Nevhodně zvolený typ by mohl mít za následek, že ryby nebudou překonávat spád tímto korytem z důvodu velké strmosti kanálu, vysoké rychlosti vody či mělkosti stupňů. V tomto případě je vhodné vybudovat štěrbínový rybí přechod u budovy elektrárny z pravé strany. Umístění na opačnou stranu by vedlo přes příjezdovou cestu a vchod do strojovny. Umístění rybovodu je zobrazeno na Obr. 4.2 zelenou barvou. Tento typ je vhodný právě pro menší spády. Rybovod bude betonový s malým sklonem, cca do 5° z důvodu omezení rychlosti proudu vody. Bude obsahovat 5 až 6 překážek vzdálených od sebe 0,7 m. Výška hladiny bude cca 1 m a šířka koryta 1,5 m. Pro větší druhy ryb je možné vystavět v levé části jezu balvanitý skluz.

Náhradou za štěrbínový rybovod by mohl být biokoridor. Ten je sice pro ryby ideální stavbou, je však nutné, aby byl jeho kanál dlouhý.

Aby ryby vplouvaly do rybního přechodu a nedostaly se do prostoru turbíny, budou naváděny elektrickým plašičem ryb, který bude umístěn před jemnými česlemi. Umístění tohoto plašiče je požadováno Českým svazem rybářů. Toto zařízení přivádí časový impuls nízkého napětí do vodního toku.

4.2.5 Strojovna

Budova strojovny není u každé malé vodní elektrárny zcela stejná. Vždy je třeba ideálně přizpůsobit stavbu zvolené turbíně a počtu turbín. Při návrhu budovy je samozřejmě snaha o co největší snížení nákladů, tudíž vybudování strojovny malých rozměrů. Ovšem nesmí se zapomínat na prostor potřebný k montáži, opravě a údržbě strojních zařízení. Je tedy důležité naplánovat velikost stavby s ohledem na finance, ale i potřebný prostor kolem umístěných turbín a generátorů. V našem případě bude návrh dále proveden s více horizontálními S-turbínami typu Semi-Kaplan s převodem na výše umístěný generátor, strojovna bude tedy uzpůsobena tomuto uspořádání. Zobrazení budovy strojovny je v *Příloze 2.*, kde *Obr. 2* je technický výkres strojovny MVE Hýskov, která má stejnou koncepci jako navrhovaná strojovna v Nadrybech. Obecně lze budovu strojovny rozdělit na horní a spodní stavbu, tedy na část pod a nad povrchem země.

Spodní stavba

V této části strojovny jsou umístěna výrobní zařízení, tj. turbíny s generátory. Důležité je zamezit průsakům vody do budovy, z tohoto důvodu je stavba ze silného železobetonu. Spodní část budovy je rozdělena do dvou pater. V nejspodnějším patře jsou umístěny turbíny a první spodní patro je pouze malé průchodné podlaží u jedné stěny s generátory. Mezi těmito podlažími je krátké železné schodiště. Jak již bylo uvedeno výše, celková rozloha spodní části je závislá na velikosti a počtu turbín. Obecně se výška spodní stavby projektuje 1,5 až 2 násobkem průměru oběžného kola turbíny. Délka stavby, myšleno ve směru toku, je závislá na typu a orientaci turbíny. Šířka strojovny, myšleno napříč tokem, je závislá na počtu umístěných turbín a potřebnému volnému prostoru kolem těchto strojních částí. Lze vycházet z obecného vzorce $(k+1) \cdot l_a$, kde k je počet soustrojí, l_a je osová vzdálenost soustrojí a 1 je z důvodu volného prostoru.

Součástí spodní stavby jsou také vtokové objekty. Obdélníkové vtoky budou opatřeny jemnými česlemi a ty případně ramenovými čistícími stroji. Každý vtok do turbín bude obsahovat tlakový uzávěr vody pro případné uzavření a vypnutí turbíny. Tyto česle z pásové ocele budou skloněny v poměru 1 : 3. Celý obdélníkový vtok bude mít zakřivený strop

směrem dolů a bude navázán na ocelové kusy, které změni profil na kruhový. V tomto podlaží bude také umístěna jímka prosáklé vody z turbín, která povede napříč podlahou strojovny pod oběžnými koly.

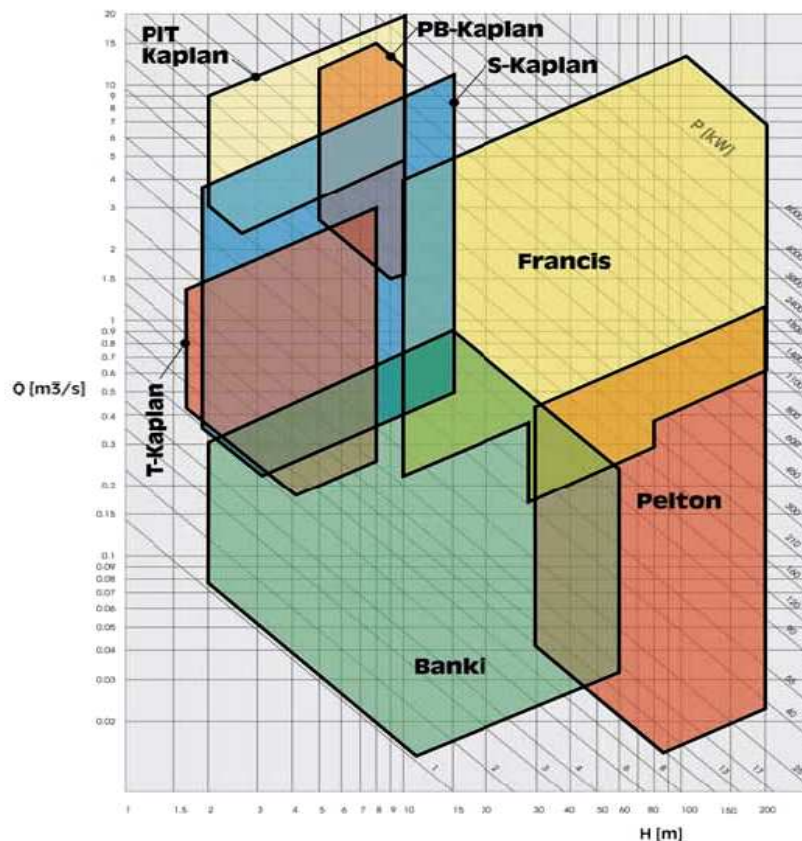
Horní stavba

Prostor mezi horní a spodní stavbou je rozdělen montážním prostorem. V dnešní době, kdy je řízení MVE automatické, případně lze řídit elektrárnu dálkově, není třeba stavět zvláštní místnosti pro obsluhu. V tomto případě bude tedy stačit jedno nadzemní patro. Tato část bude mít vstup vodotěsnými tlakovými dveřmi, které budou nad úrovní stoleté vody. Strop strojovny bude rovný z důvodu umístění demontovatelných nosníků pro zdvihací zařízení. Horní část strojovny vždy slouží především pro umístění elektrického zařízení. Rozvaděče nn a vn, řídicí systémy a transformátor 0,4/22 kV jsou umístěny podél zdí. Průchod do spodní části je umožněn pomocí krátkého železného schodiště.

5 Strojní zařízení

5.1 Turbína

Turbína je nejdůležitější částí každé malé vodní elektrárny. Je tedy důležité věnovat výběru optimální turbíny značnou pozornost. Při výběru jsou hlavními parametry spád a průtok. Nejvíce důležité však je, že uspořádání a natočení turbíny musí být vhodné pro dané stavební řešení budovy strojovny. Základní zvolení typu turbíny dle parametrů toku lze provést za pomoci oblastního diagramu použití turbín, který je uvedený na *Obr. 5.1*. Pokud s hydrologickými hodnotami dané lokality pracuje více typů turbín, je vhodné vybírat dle účinnosti jednotlivých turbín v případě kolísání průtoku, možnosti regulace a v neposlední řadě je důležité posouzení turbín z hlediska ekonomického. Po základním výběru typu turbíny je na řadě přesnější návrh parametrů, tj. velikost oběžného kola, hltnost turbíny, počet lopatek, výkon, velikost účinnosti a otáček turbíny. Z těchto parametrů a odtokové křivky dané lokality lze určit orientační velikost vyrobené elektrické energie. V praxi lze předběžného návrhu parametrů turbíny docílit několika způsoby, jakými jsou návrh dle charakteristik turbín, specifických otáček nebo dle diagramů poskytnutých výrobcem turbín.



Obr. 5.1 Oblastní diagram použití malých vodních turbín

(Zdroj: <http://www.ekowatt.cz/uspory/vodni-energie.shtml>)

Nejjednodušším a v současnosti nejvíce využívaným způsobem pro předběžný výběr turbíny je zvolení stroje dle nabídky výrobců turbín. V dnešní době je již větší počet výrobců rozličných typů turbín s různou oblastí použití. Každý výrobce se snaží co nejvíce optimalizovat použití svých turbín, vylepšit regulaci, zvýšit účinnost či vhodně nastavit cenu svých výrobků pro motivaci zákazníků. Po výběru typu turbíny stačí vybrat přesný model, který je nejvhodnější variantou pro uvažovanou lokalitu, z modelové řady výrobce.

V projektování malých vodních elektráren ovšem často nastává situace, kdy kvůli menšímu spádu nevyužijeme většinu možného průtoku za pomoci jen jedné turbíny. Turbíny použitelné pro malé spády mají totiž menší rozměry, tudíž pojmu i méně vody. V těchto případech je vhodné uvažovat použití většího počtu turbín pracujících paralelně. Tyto turbíny mohou být buďto rozdílných či stejných rozměru, tato volba je častější.

Volba většího počtu turbín má také velkou výhodu v možnosti regulace výroby elektrárny při kolísání průtoku. V době, kdy korytem teče celý návrhový průtok, mohou být v provozu všechny zvolené stroje. Ovšem v případě menšího průtoku je možné odstavení jedné z turbín a při tom stále jedna či dvě běží na plný výkon. Tuto výhodu lze také využít v případě nutné odstávky některé z turbín z nutnosti opravy či údržby.

5.1.1 Výběr turbíny pro lokalitu Nadryby

Při výběru turbín je vycházeno z hodnoty užitého spádu H 1,5 m a maximálního průtoku v přívodním kanále $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Pro tuto lokalitu připadají dle hodnot obecného použití v úvahu tyto typy turbín: Bánkiho, vírová a Kaplanova. Nyní je třeba najít výrobce turbín, které mohou být použity pro naši lokalitu, zhodnotit vhodnost použití a zvážit aplikaci jednotlivých typů turbín z technického a ekonomického hlediska.

Bánkiho turbína má velké ekonomické přednosti. Tato mírně přetlaková, pomaloběžná turbína s horizontální hřídelí je velmi jednoduchá, od čehož se odvíjí celková pořizovací cena. Použití Bánkiho turbíny je dle literatury [10] pro spády v rozsahu 1,5 - 200 m. Ovšem největší výrobce těchto turbín v ČR společnost CINK Hydro – Energy k. s., která používá velmi účinný systém Ossberger, uvádí použití svých turbín od 3 m. Přesto, že existují aplikace s individuálně vyprojektovanými a poté zhotovenými Bánkiho turbínami, jejich účinnost a výkon nedosahuje tak velkých hodnot, aby se vyplatila aplikace pouze této do budovy strojovny. Tato turbína je tedy pro danou lokalitu nevhodná.

Vírová turbína je v oblasti malých vodních turbín novinkou. Byla vyvinuta v roce 2000 vědeckým týmem, v jehož čele stál Prof. Ing. František Pochylý, CSc. z FSI VUT v Brně. Tato turbína je určena speciálně pro malé spády 1 – 3 m a v podstatě libovolné průtoky, které závisí na velikosti oběžného kola. Koncepce turbíny vírové ale používá z Kaplanovy pouze oběžné kolo. Díky odstranění rozváděcího kola se cena snížila cca na třetinu Kaplanovy turbíny. Turbína má 86% účinnost při testovacím spádu 2,5 m. Tato jedna turbína má výkon cca 3 kW. Pro danou lokalitu by tedy bylo třeba většího počtu turbín k dosažení maximálního možného výkonu. Tento typ turbíny je zatím ve fázi prvních instalací např. v elektrárně Dlouhé stráně. Výrobu zatím zajišťují pouze Strojírny Brno a turbína není zatím volně k prodeji.

Kaplanova turbína je nejrozšířenější turbínou v oblasti MVE. Její velkou předností je možnost natáčení lopatek oběžného i rozváděcího kola, čímž dosahuje velké účinnosti. Obecně se používá v lokalitách s malým spádem a velkým nestálým průtokem. Oblast použití je od 1 m do 70 m a průtoku již od $0,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Tato přetlaková turbína může být instalována se svislou, ale i vodorovnou osou otáčení. Ovšem možnost regulace pomocí natáčení lopatek oběžného kola značně zvyšuje cenu stroje. Pro případ návrhu MVE v Nadrybech je vhodná volba využití většího počtu zvláštního typu Kaplanovy turbíny, a to v uspořádání Semi-Kaplan. V tomto typu turbíny odpadá regulace pomocí rozváděcího kola, čímž se značně snižuje její cena.

Pro dodávku turbín typu Semi-Kaplan byl vybrán výrobce Hydrohrom, s. r. o., který je největším dodavatelem tohoto typu turbín pro ČR, má ovšem i velké zastoupení v evropském prodeji. Výrobce má velké zkušenosti s instalací turbín v oblasti malých spádů, jako je na řece Berounce u obce Nadryby. Jeho modelová řada obsahuje velké množství turbín s různým rozsahem velikosti oběžného kola. To je ovládáno automatickou regulací a turbína je vybavena gravitačním deskovým uzávěrem pro případ odstávky. V optimu při plném otevření dosahují turbíny Hydrohrom 80% účinnosti.

Při výběru turbíny pro danou oblast jsme především omezeni užitným spádem lokality, který je 1,5 m. Logicky nelze umístit do elektrárny turbínu s velikostí oběžného kola stejnou nebo dokonce větší než je hodnota užitného spádu. Je třeba také myslet na to, že s kolísáním průtoku se zároveň mění i hodnota spádu. Předpokládanou změnu spádu lze předběžně v našem případě odhadovat, jak ukazuje *Graf 2* v *Příloze 1*. Je vhodné zvolit turbínu s tak velkým oběžným kolem, aby mohla být v provozu i při větších průtocích, tudíž menších spádech. Pro případ navrhované elektrárny je vhodnou volbou velikost oběžného kola 1 000 mm. Fotografie turbíny je uvedena v *Příloze 2* na *Obr. 3*.

Technická data zvolené turbíny

výrobce:	Hydrohrom, s. r. o.
typ:	horizontální S-turbína typu Semi-Kaplan
model:	HH 1000 SSK
maximální hltnost:	$Q_{\max} = 3,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
minimální hltnost:	$Q_{\min} = 0,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
otáčky oběžného kola:	$n = 260 \text{ ot/min}$
maximální výkon turbíny:	$P_T = 64,5 \text{ kW}$
počet lopatek:	4

Jelikož tato turbína má relativně malou hltnost, v případě osazení elektrárny pouze jednou touto turbínou by nebyl využit celý možný průtok. Přívodní kanál k budově MVE je dimenzován na maximální průtok $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, v případě zvolení jedné turbíny s hltností $3,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ by byl tedy využit pouze zlomek průtoku a zbývající voda by tekla nevyužita kolem MVE. Při zvolení této varianty by byla vysoká návratnost investice na výstavbu MVE z důvodu malého instalovaného výkonu, elektrárna by vyrobila ročně relativně malé množství elektřiny. V případě, kdy se navrhuje zcela nová výstavba MVE, tedy nevyužije se starší výrobní budovy, je vhodné osazení větším počtem turbín i z ekonomického hlediska.

Větší počet turbín je také vhodný pro regulaci výroby při sníženém průtoku. V případě, že se hodnota průtoku vody v korytě snižuje, lze průtok těmito turbínami regulovat natáčením lopatek oběžného kola. Ovšem u Semi-Kaplanových turbín značně klesá účinnost se snižující se hodnotou průtoku, tedy s natáčením lopatek oběžného kola. Při provozu se tedy můžeme rozhodnout, zda je při sníženém průtoku výhodnější v dané situaci provozovat všechny turbíny přiškrcené, či odstavit jednu z turbín a ostatní využívat při plném výkonu. Výhoda většího počtu turbín se také prokáže při odstávce některé z turbín z důvodu opravy či údržby. V tomto případě běží ostatní turbíny a elektrárna stále vyrábí elektřinu.

Dále budou uvažovány dvě varianty technického návrhu MVE Nadryby:

Varianta I použití 2 x HH 1000 SSK

V tomto případě by maximální průtok elektrárnou byl $7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Elektrárna by dle odtokové křivky uvedené v *Grafu 3.2* a se zahrnutím sanačního průtoku pracovala na plný výkon přes 240 dní v roce.

Varianta II použití 3 x HH 1000 SSK

Při zvolení této varianty by maximální průtok elektrárnou byl $10,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Elektrárna by v tomto případě pracovala na plný výkon přes 210 dní v roce.

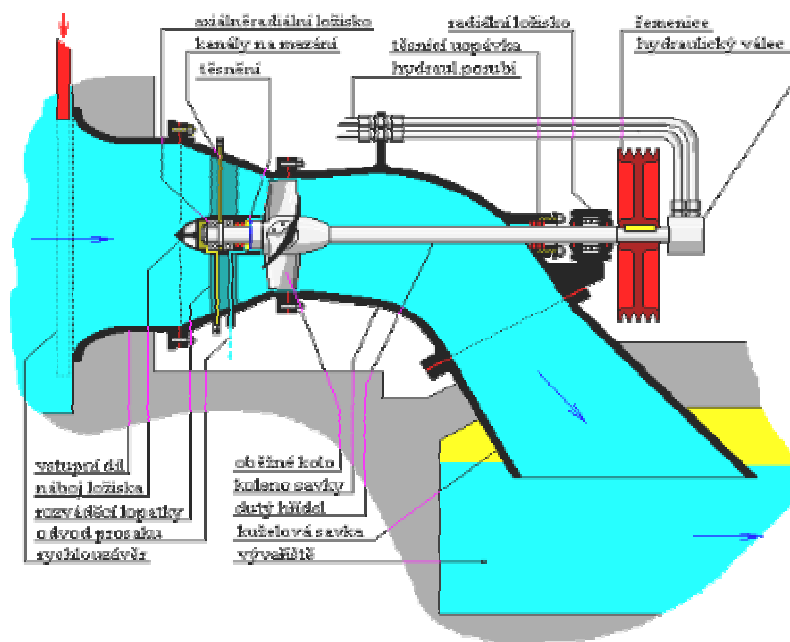
Varianta s větším počtem turbín nebude uvažována z důvodu velké počáteční investice a značných nároků na prostor v budově strojovny. To by vedlo k nevyhnutelně většímu zastavěnému území na břehu řeky.

5.1.2 Turbína Semi-Kaplan

Hlavním rozdílem od Kaplanovy turbíny je, že Semi-Kaplanova nemá složité, a tedy značně finančně nákladné ovládání rozváděcího kola. To ovšem způsobuje větší pokles účinnosti a výkonu při menších průtocích, na rozdíl od Kaplanovy turbíny. Tímto uzpůsobením se zvětšila hltlost při zanechání rozměrů oběžného kola a zvýšil se tedy i výkon. Použití turbíny je vhodné pro lokality bez akumulace, kde není příliš výrazné kolísání průtoku během roku.

Tento horizontální rychloběžný stroj má savku ve tvaru S, což umožňuje umístění generátoru mimo turbínu. Generátor je v tomto případě umístěn za turbínou a je spojen pomocí hřídele s oběžným kolem buďto přímo nebo přes převod. Technické řešení do písmene S umožňuje využití spádu od 1,5 m do cca 5,5 m a průtoku od $0,25$ do $6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Turbína je umístěna ve spodní části budovy strojovny a za pomoci přechodového kusu je spojena s přírubou. Vtok turbíny se kuželovitě zužuje, čímž se zvyšuje rychlost vody. Dále voda vstupuje mezi rozváděcí lopatky, které upraví její rychlost a směr přítoku na lopatky. Umístění oběžného kola v nejužší části, kde má voda největší rychlost. Plášť je v místě oběžného kola mírně vyklenutý z důvodu umožnění natáčení lopatek. Nejčastější počet lopatek oběžného kola je 4, nové turbíny mají ovšem i 3 nebo 2. Zakřivení lopatek je takové, že se mezilopátkové kanály ve směru proudění zužují. Za oběžným kolem následuje savka uzpůsobená do písmene S. Ta z části využívá energii vody opouštějící prostor oběžného kola a transformací na zápornou tlakovou energii podporuje průtok turbínou. Vždy musí být okraj savky pod hladinou vody v odpadu, a to i při zastavené turbíně. U větších strojů může savka plynule přecházet do vodorovné polohy a dále ústít do odpadního kanálu. Obecné uspořádání Semi-Kaplanovy turbíny ukazuje *Obr. 5.2*.



Obr. 5.2 Schéma uspořádání turbíny Semi-Kaplan (Zdroj: <http://mve.energetika.cz>)

5.2 Převod

Jak již bylo uvedeno výše, z důvodu malého spádu lokality, který nevytvoří dostatečně velké otáčky turbíny pro připojení generátoru přímo k hřídeli turbíny, je zapotřebí použít převodu. Dodavatel turbín používá ve svých aplikacích plochý řemenový převod. V tomto případě je hřídel turbíny vyvedena přímo nad savku, do prostoru, kde se srovná tvar S, a přes rozváděcí kolo je plochým řemenem síla převáděna na hřídel generátoru umístěného nad touto řemenicí. Rozváděcí řemenice připojená k hřídeli turbíny je větší než-li řemenice připojená k hřídeli generátoru. Řemen je vedený vodorovně vzhůru, což minimalizuje ztráty v převodu. Výrobce instaluje řemen s opásáním otevřeným bez překřížení. Pro názornost je uvedena fotografie řešení s řemenovým převodem na generátor v *Příloze 2* na *Obr. 4*. Dodavatel uvádí hodnotu účinnosti 0,96 při použití plochého řemene k převodu.

6 Elektrotechnické zařízení

6.1 Generátor

Generátor je společně s turbínou nejvýznamnější součástí vodní elektrárny. Při výběru generátoru je třeba zohlednit důležité parametry, jako je spolehlivost, cena, účinnost a možnost regulace. Volba generátoru je pro každou elektrárnu specifická. Nevhodně zvolený generátor významně ovlivní výrobu elektrické energie, je tedy na místě věnovat výběru pozornost. Je především třeba vycházet z parametrů turbíny a předpokládaného umístění generátoru. Základem je rozhodnutí o vybrání synchronního nebo asynchronního generátoru.

Synchronní generátory se používají spíše u velkých vodních elektráren. Pro použití u MVE jsou nevhodné z důvodu složitosti regulace a vyšší pořizovací ceně. Určitou výhodou je možnost pracovat v ostrovním režimu, tzn. bez připojení do elektrizační sítě. To ovšem vyžaduje regulaci turbíny v závislosti na zatížení generátoru. S použitím tohoto typu generátoru je také nutné zajištění budícího stejnosměrného proudu a jeho regulace.

Asynchronní generátory jsou nejvíce používaným strojem v oblasti malých vodních elektráren. Tyto točivé stroje jsou málo náročné na údržbu a jsou velice spolehlivé. Tyto generátory se nejčastěji provozují v paralelním připojení k elektrizační síti a pro magnetizaci se používá výkon odebíraný ze sítě. Asynchronní generátor tedy odebírá ze sítě jalový výkon pro zajištění magnetické indukce stroje a dodává do ní výkon činný. Každá MVE si musí hlídat hodnotu účinníku, která by měla být v rozmezí 0,85 – 1. V případě nedodržení těchto hodnot platí provozovatel penále. Pro kompenzaci účinníku lze připojit

ke generátoru kondenzátorovou baterií. Na rozdíl od synchronního generátoru není potřeba fázování při připojování generátoru na rozvodnou síť. Při spouštění se roztočí generátor na štítkové otáčky před vpuštěním vody na lopatky turbíny. Napětí a frekvence je dána hodnotami z distribuční sítě, není zapotřebí tyto hodnoty regulovat.

6.1.1 Generátor pro lokalitu Nadryby

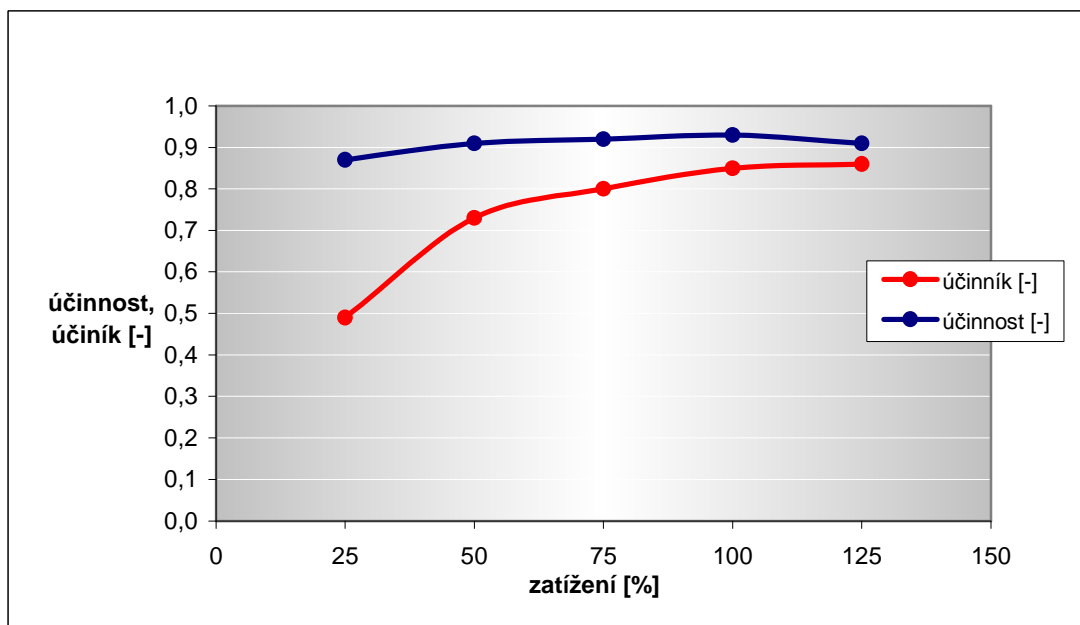
Pro zvolenou turbínu je vhodné použití asynchronního generátoru. Výrobce turbín nabízí možnost dodání turbíny společně s generátorem. V uspořádání S-turbíny je generátor umístěn mimo konstrukci turbíny. Hydrohrom, s. r. o. používá dva typy umístění asynchronního generátoru. První možnost je umístění generátoru za turbínou s přímým připojením na hřídel turbíny. Druhou možností je umístění generátoru do vyšší polohy a použití řemenového převodu. Ovšem pouze v lokalitách s většími spády je vhodné použití připojení generátoru na hřídel turbíny přímo. U malých spádů nedosahuje turbína dostatečně velkých otáček pro zvolení této varianty.

Navrhovaná elektrárna pracuje spíše s malým spádem, je tedy vhodnější umístění generátoru nad úrovní turbíny s použitím řemenového převodu. Příklad umístění generátoru je zobrazen na *Obr. 2 v Příloze 2*. Tato volba chrání do určité míry generátor při zaplavení strojovny.

Výrobce turbín bohužel neposkytl informace o dodávaném generátoru k turbíně HH 1000 SSK. Ovšem jelikož Hydrohrom, s. r. o. spolupracuje s výrobcem generátoru Siemens, s. r. o., lze dle hodnoty výkonu turbíny určit generátor z katalogu společnosti.

Technická data generátoru

výrobce:	Siemens, s.r.o.
typ:	třífázový asynchronní motor s rotorem nakrátko
model:	1LG4 280
jmenovitý výkon:	75 kW
otáčky:	1485
napětí/ frekvence:	400 V/50 Hz
počet pólů:	4
krytí:	IP 55
osová výška:	280 mm



Graf 6.1 Zobrazení účinnosti a účiníku při různém zatížení

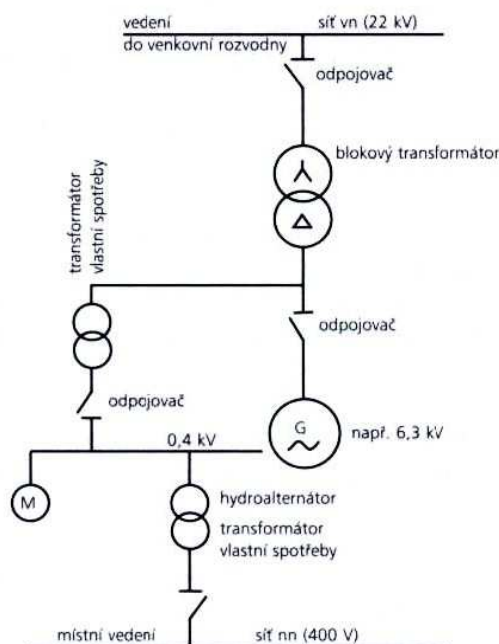
(Zdroj: Vlastní zpracování dle katalogu společnosti Siemens, s. r. o.)

Tento generátor patří do skupiny IE1, což označuje generátory se standardní účinností. Stroj má relativně dobré hodnoty účinnosti a účiníku a je u něho testována míra vibrací a hluku. Dodržuje všechny národní i mezinárodní normy a výrobce u něj zaručuje dlouhou životnost.

6.2 Elektrická zařízení pro regulaci a připojení do sítě

Tato elektrárna je řešena tak, že veškerý vyrobený výkon bude odváděn do elektrizační sítě. Elektrárna tedy pro svůj provoz potřebuje obvod, ve kterém bude naopak elektrickou energii ze sítě odebírat, např. na řízení elektrárny, pro ovládání čistících strojů nebo svícení. Připojení do blízkého distribučního vedení 22 kV může být snadno realizováno pomocí vn transformátoru a rozvaděče. V elektrárně bude také řešena kompenzace účiníku pomocí kompenzační baterie, aby byly splněny podmínky pro připojení MVE do sítě. Těmito podmínkami je dodržení hodnot účiníku 0,85 – 1, napětí na svorkách generátoru $\pm 5\% U_n$ a hodnota frekvence v rozmezí 48,5 – 50,5 Hz.

Prvky elektrického systému jsou generátory, vývody z generátoru, rozvodna generátorových vývodů, blokový transformátor, vývody z transformátoru, venkovní rozvodna, transformátor vlastní spotřeby, elektrické motory různých zařízení (jeřáb, čerpadla, ramenové čistící stroje), budiče generátorů a pomocná zařízení (odpojovače, vypínače, jističe apod.). Příklad hlavního schématu elektrického zapojení je uveden na Obr. 6.1.



Obr. 6.1 Hlavní schéma elektrického zapojení MVE

(Zdroj: [3])

Elektrický obvod lze rozdělit do dvou částí na nn a vn. Nízkonapěťová část obsahuje rozvaděč nn, rozvaděč řízení a ovládání, elektrické ochrany strojů měření, řídicí systémy, panely místního ovládání a kabelové rozvody. Do vysokonapěťové části spadá vn rozvaděč a transformátor.

6.2.1 Řídicí, regulační a měřicí systémy

Jako řídicí automatický systém bude použit systém PLC – soft, který je vhodný pro svoji rychlost, přesnost a názornost. Tento systém využívá ovládání řízení i regulování za pomoci počítače prostřednictvím vstupně – výstupních karet. Komunikace mezi přístroji je zde zajištěna pomocí běžných protokolů Modbus, Profibus, Interbus, TCP/IP apod. V rámci řídicích systémů jsou důležité i jistící obvody, které chrání turbíny v případě poruchy. Tento automatický systém kontroluje určitá měřená data a v případě potřeby odstaví elektrárnu a provede chybné hlášení.

Automatizace tohoto systému je dělena do dvou úrovní:

1. provozní úroveň: jedná se o zpracování vstupů a výstupů z měření a následné řízení a regulace, jde o plně automatickou úroveň
2. řídicí úroveň: řízení a regulace provádí obsluha MVE

Pro regulaci MVE bude využito automatického režimu, který bude regulovat elektrárnu dle snímaných hodnot. Natáčení lopatek oběžného kola bude řízeno hladinovou regulací pomocí snímačů výšky hladiny. Najetí elektrárny do provozu bude řízeno také automaticky a umožněno, pokud nebude žádné chybové hlášení. Turbína bude postupně otevírána a zaplavována vodou a po dosažení synchronních otáček se provede připojení generátoru k síti. Tímto způsobem bude řízena pouze první turbína, otevření další turbíny bude závislé na turbíně první.

Automatické odstavení bude prováděno postupným snižováním výkonu, zastavením oběžného kola, odpojením generátoru od sítě a zajištěním hydraulického rozvaděče. Doba najetí i odstavení elektrárny je automaticky nastavena s ohledem na minimalizaci rázových vln. Průtok elektrárnou bude vždy regulován, aby byl zajištěn sanační průtok v korytě řeky $4,33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

V tomto případě, kdy je generátor připojen do distribuční sítě paralelně, je třeba zajištění měření dodaného množství činného výkonu, ale také odebrané činné i jalové energie. K základním veličinám, které je třeba měřit, patří napětí, proud, výkon a účinník. Měření výkonů bude zajištěno pomocí přímého 4 - kvantového elektroměru, jehož výhodou je umožnění dálkového odečtu hodnot. Dále je nutné zajistit měření dalších neelektrických veličin za pomoci různých druhů snímačů. Další důležité sledované hodnoty při provozu MVE jsou např. poloha horní a dolní hladiny, otáčky turbíny, teplota ložisek apod.

6.2.2 Připojení MVE k distribuční síti

Připojení do vn sítě 22 kV je zajištěno pomocí silnoproudých zařízení. Tato zařízení umožňují mimo připojení k distribuční síti také přenos, transformaci, spínání a jištění. Také slouží k zajištění vlastní spotřeby MVE.

Připojení k distribuční síti bude zajištěno za pomoci venkovní přípojky, ta bude končit v rozvaděči vysokého napětí. Vstupní část této přípojky bude vybavena spínacími a jisticími přístroji. Před přípojkou bude umístěn třífázový transformátor 0,4/22 kV. Tento transformátor zajišťuje možnost připojení do sítě o napěťové hladině 22 kV. Transformátor je zapotřebí z důvodu přeměny hodnoty z generátoru, kde je napětí o velikosti 400 V. Toto zařízení bude společné pro všechny generátory v MVE. Společné připojení generátorů do jednoho transformátoru je vhodnější pro spolupráci nn generátorů s vn sítí.

7 Průměrná roční výroba elektrické energie

Při výpočtu roční výroby elektrické energie vycházíme z průtokových hodnot řeky Berounky u obce Nadryby uvedených v kapitole 3.4.1. Jak již bylo uvedeno výše, pro získání využitelného průtoku pro výrobu elektrické energie musíme od průtokových hodnot odečíst hodnotu sanačního průtoku, která činí $4,33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Dále vycházíme z hodnoty výkonu turbíny při plném otevření, kterou udal výrobce, a také z účinností generátoru a použitého plochého řemenového převodu.

Jelikož uvažujeme varianty s využitím většího počtu turbín, bude se průtok elektrárnou dělit v určitém poměru na více výrobních strojů. V případě snižujícího se průtoku budou turbíny postupně regulovány natačením lopatek oběžného kola a tím bude snižován průtok danou turbínou. Při dosažení hodnoty minimálního průtoku turbínou bude daný stroj odstaven z provozu. Protože účinnost u tohoto typu turbín rapidně klesá s průtokem oběžným kolem, vždy bude regulována pouze jedna turbína a ostatní zůstanou v provozu při plném výkonu.

Jako příklad je uveden výpočet výroby elektrické energie jednou turbínou při maximálním průtoku.

Nejprve určíme hodnotu výkonu na svorkách generátoru.

$$P_G = P_T \cdot \eta_p \cdot \eta_G = 64,5 \cdot 0,96 \cdot 0,92 = \underline{56,97 \text{ kW}}$$

Pro určení vyrobené elektrické energie je třeba hodnotu výkonu P_G vynásobit časem, po který tento výkon působil. Z odtokové křivky vyžijeme rozčlenění průtokových hodnot celého roku do 30denních časových úseků. Do vzorce je dosazena hodnota 720, tj. počet hodin za 30 dnů. Jedno turbosoustrojí vyrobí za 30 dní tedy:

$$A = P_G \cdot t = 56,79 \cdot 720 = \underline{41\,018,4 \text{ kW}}$$

Sečtením dílčích hodnot z celého roku získáme celkovou vyrobenou energii za rok.

7.1 Varianta I: Použití 2 turbín

V tomto případě by celkový instalovaný výkon MVE Nadryby byl 129 kW. Tato elektrárna může být v provozu 330 dní v roce, ostatní dny musí být z důvodu zajištění minimálního zůstatkového průtoku přes jez odstavena. Jak je vidět v *Tabulce 7.1*, 240 dní v roce mohou být obě turbíny plně otevřeny a elektrárna tedy poběží na plný výkon.

Z celkové doby, kdy elektrárna může být v provozu, musí být jedna turbína 30 dní regulována. Průtok turbínou bude v této době snížen a regulovaná turbína by pracovala přibližně na 76 % se 75% účinností. V dalších 60 dnech provozu MVE bude tato turbína odstavena z důvodu malého průtoku. Při minimálním průtoku, kdy elektrárna ještě může být v chodu, bude regulována i druhá turbína a poběží přibližně na 63 % s účinností 70 %.

Vypočtená průměrná hodnota vyrobené elektrické energie činí pro tuto variantu 815 206,75 kWh.

Tabulka 7.1 Výroba elektrické energie pro Variantu I

	M-dnů	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
	Q [m ³ .s ⁻¹]	53,97	35,57	26,47	20,67	16,47	13,27	10,57	8,27	6,17	4,20	2,19
Turbína I	Q _{TI} [m ³ .s ⁻¹]	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	2,19
	η _{TI} [%]	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,70
	η _{PI} [%]	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
	η _{GI} [%]	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
	P _{GI} [kW]	56,97	56,97	56,97	56,97	56,97	56,97	56,97	56,97	56,97	56,97	49,87
	A _{TI} [MWh]	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02
Turbína II	Q _{TII} [m ³ .s ⁻¹]	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	2,67	odstávka z důvodu malého průtoku	
	η _{TII} [%]	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,75		
	η _{PII} [%]	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96		
	η _{GII} [%]	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92		
	P _{GII} [kW]	56,97	56,97	56,97	56,97	56,97	56,97	56,97	56,97	53,44		
	A _{TII} [MWh]	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	38,48		
	A [MWh]	82,03	82,03	82,03	82,03	82,03	82,03	82,03	82,03	79,49	41,02	35,91
	A _c [MWh]	815,21										

(Zdroj: vlastní zpracování)

7.2 Varianta II: Použití 3 turbín

Celkový instalovaný výkon pro tuto variantu je 193,5 kW. Z Tabulky 7.2 vyplývá, že 210 dní v roce mohou být všechny 3 turbíny plně otevřeny a tedy pracovat na plný výkon. Turbína č. 3 musí být 30 dní regulována a 90 dní z celkové doby provozu bude odstavena. V době regulace by turbín pracovala na 36 % maximálního výkonu s činností 60 %. Regulace a odstávky turbín č. 1 a 2 jsou totožné s variantou I.

Při zvolení této varianty vychází hodnota vyrobené elektrické energie 1 130 558,4 kWh.

Tabulka 7.2 Výroba elektrické energie pro Variantu II

	M-dnů	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
	Q [m ³ .s ⁻¹]	53,97	35,57	26,47	20,67	16,47	13,27	10,57	8,27	6,17	4,20	2,19
Turbína I	Q _{TI} [m ³ .s ⁻¹]	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	2,19
	η _{TI} [%]	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,70
	η _{PI} [%]	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
	η _{GI} [%]	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
	P _{GI} [kW]	56,97	56,97	56,97	56,97	56,97	56,97	56,97	56,97	56,97	56,97	49,87
	A _{TI} [MWh]	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02
Turbína II	Q _{TII} [m ³ .s ⁻¹]	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	2,67	odstávka z důvodu malého průtoku	
	η _{TII} [%]	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,75		
	η _{PII} [%]	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96		
	η _{GII} [%]	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92		
	P _{GII} [kW]	56,97	56,97	56,97	56,97	56,97	56,97	56,97	56,97	53,44		
	A _{TII} [MWh]	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	38,48		
Turbína III	Q _{TIII} [m ³ .s ⁻¹]	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	1,27	odstávka z důvodu malého průtoku		
	η _{TIII} [%]	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,60			
	η _{PIII} [%]	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96			
	η _{GIII} [%]	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92			
	P _{GIII} [kW]	56,97	56,97	56,97	56,97	56,97	56,97	56,97	42,75			
	A _{TIII} [MWh]	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	30,78			
	A [MWh]	123,05	123,05	123,05	123,05	123,05	123,05	123,05	112,81	79,49	41,02	35,91
	A _c [MWh]	1 130,56										

(Zdroj: vlastní zpracování)

8 Ekonomické hodnocení

8.1 Tržby z prodeje vyrobené elektrické energie

Pro orientační vyčíslení roční tržby z výroby elektrické energie je třeba vycházet z hodnoty předběžné vyrobené energie za rok a výkupních cen elektřiny, které každoročně vydává Energetický regulační úřad.

Uvažovaná elektrárna je navržena tak, že veškerá vyrobená elektrická energie by byla odváděna do distribuční sítě. Pro potřeby výpočtu ročního zisku z prodeje elektřiny je využito vypočtené předběžné výroby pro obě uvažované varianty uvedené v *Kapitole 7*. Výkupní ceny elektřiny jsou uvažovány nejaktuálnější, tj. pro rok 2012. Tyto ceny jsou uvedeny v *Tabulce 8.1* a platí pro nově připojené MVE do elektrizační sítě do konce roku 2012. Výkupní ceny jsou pro MVE garantovány na období 30 let.

Tabulka 8.1 Výkupní ceny elektrické energie

Datum uvedení do provozu	Výkupní ceny elektřiny dodané do sítě v Kč/MWh	Zelené bonusy v Kč/MWh
Malá vodní elektrárna uvedená do provozu v nových lokalitách od 1. 1. 2012 do 31. 12. 2012	3 190	2 140

(Zdroj: Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 7/2011)

Protože v blízkosti navrhované MVE není žádný větší objekt, který by mohl odkoupit elektřinu z této elektrárny, je vhodné zvolit způsob prodeje elektrické energie provozovateli distribuční soustavy formou výkupních cen. Při zvolení této varianty musí provozovatel soustavy vykoupit veškerou vyrobenou elektřinu. Zatímco v případě zvolení druhé varianty výkupu, tj. formou zelených bonusů, si musí výrobce elektřiny najít odběratele sám. Volbou zelených bonusů je sice možné zvýšit tržby z prodeje, jelikož majitel elektrárny prodá elektřinu za smlouvenou tržní cenu a tato cena je navýšena zeleným bonusem, ovšem vystavuje se riziku, že neprodá 100 % své vyrobené elektřiny.

V případě, že vlastník elektrárny nalezne dodatečně vhodného odběratele, může změnit svůj způsob prodeje elektrické energie z formy výkupních cen na zelené bonusy a snížit tak návratnost celé investice. Tuto změnu formy výkupu lze provést jednou ročně.

Tržby z prodeje elektrické energie:**Varianta I**

$$T = VC \cdot A_c = 3190 \cdot 815,20675 = \underline{2\ 600\ 510\ Kč}$$

kde: VC je výkupní cena [Kč]

A_c představuje celkovou vyrobenou elektrickou energii [MWh]

Varianta II

$$T = VC \cdot A_c = 3190 \cdot 815,20675 = \underline{3\ 606\ 481\ Kč}$$

8.2 Náklady na výstavbu MVE Nadryby

Pro celkovou představu o velikosti investice je velmi důležité co nejpřesnější vyčíslení nákladů spojených s vybudováním MVE. V tomto případě není zahrnuta hodnota nákladů nutných k opravě jezu. Tato hodnota není zahrnuta z toho důvodu, že projekt na opravu a vyvýšení jezu nesouvisí s výstavbou MVE, o tento projekt se stará samo Povodí Vltavy, s. p. Do celkových nákladů také není započten případný odkup pozemků potřebných pro stavbu, jelikož tyto pozemky patří majiteli Valentovského mlýna, který má s výstavbou MVE zkušenosti a tuto projektovou přípravu může sám využít pro výstavbu v navrhované lokalitě.

Výrobce turbín společnost Hydrohrom, s. r. o. dodala cenovou nabídku na strojní i elektrotechnické části zahrnující asynchronní generátory od společnosti Siemens, s. r. o.

Tabulka 8.2 Cenová nabídka od společnosti Hydrohrom, s. r. o.

Položka	Varianta I	Varianta II
	Cena v Kč	
strojní části (vtok s provozním uzávěrem, turbína, regulace turbíny, savka a převod)	2 x 2 268 000	3 x 2 268 000
elektro části (NN, VN i ovládací část, hladinová regulace, kabeláž strojovny, kompenzace, rozvaděče a transformátor)	1 000 000	1 000 000
doprava, montáž a testování zařízení	750 000	900 000
asynchronní generátor Siemens 1LG4 280	2 x 160 000	3 x 160 000
Celkem	6 456 000	9 184 000

(Zdroj: vlastní zpracování dle cenové nabídky od dodavatele)

Cenové náklady ostatních stavebních i strojních částí a dalších nezbytných výdajů jsou odhadnuty dle podobných projektů a po konzultacích s odborníky z praxe.

Tabulka 8.3 Odhad výše ceny ostatních výdajů spojených s vybudováním MVE Nadryby

Položka	Varianta I	Varianta II
	Cena v Kč	
přívodní a odpadní kanál (200 m výkopových prací a odvoz materiálu)	2 000 000	2 000 000
rybí přechod u budovy strojovny (vybetonovaný s 5 přepážkami)	600 000	600 000
budova strojovny	2 750 000	3 000 000
česle (hrubé i jemné s ovládáním)	200 000	200 000
stavidla u vtoku do přívodního kanálu (s ovládáním)	350 000	350 000
ramenový čistící stroj (s ovládáním a samočinnou regulací)	2 x 700 000	2 x 700 000
jeřáb (závěsný na strop strojovny)	700 000	700 000
automatické ovládání a regulace	1 500 000	1 500 000
řídící systém PLC- soft	50 000	50 000
projekt a povolení	50 000	50 000
Celkem	9 600 000	9 850 000

(Zdroj: vlastní zpracování)

8.3 Cash flow investičního projektu

Při výpočtu peněžních toků se vyčíslují celkové provozní náklady a výnosy. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulkách pro obě varianty v Příloze 3. Tabulky obsahují prvních 13 období z třicetileté životnosti investice, ve kterých se mění hodnota finančních nákladů. Cash flow 13. až 30. období vykazuje stejný výsledek z důvodu splacení poskytnutého úvěru. Tabulka obsahuje počáteční investice na výstavbu MVE Nadryby a tento náklad je snížen o dotaci. Počáteční investice vyčíslené výše v Tabulce 8.2 a 8.3 jsou uvedeny

v období 0, jelikož je tato investice provedena před spuštěním provozu MVE. Celková investice do elektrárny je pro Variantu I 16 206 000,- a Variantu II 19 034 000,-. Čerpání dotace je v tomto případě možno od Ministerstva průmyslu a obchodu, konkrétně ze Státního programu na podporu úspor energie a využití obnovitelných zdrojů. Dotace z tohoto programu je čerpána v maximální výši 3 000 000 Kč.

Dále jsou uvedeny provozní tržby. To jsou výše uvedené tržby z prodeje vyrobené elektrické energie. V prvním roce provozu jsou provozní tržby sníženy z důvodu zkušebního provozu. Ve zkušebním provozu je uvažován 90% výkon každé turbíny.

Dále je důležité vyčíslení ročních nákladů spojených s provozem elektrárny. Jsou uvedeny náklady na spotřebu materiálu, např. na maziva, a náklady na výměnu spotřebních částí s případnými opravami. Veškerá vyrobená elektrická energie je prodávána, z tohoto důvodu má elektrárna elektrický obvod pro odběr elektřiny na svůj provoz. Náklady na tento odběr elektřiny jsou dále odhadnuty.

Jelikož je tato MVE navržena jako plně automatická a zčásti říditelná dálkově, může být přítomen pouze jeden zaměstnanec na částečný pracovní úvazek. Tento náklad na zaměstnance je vyčíslen v tabulce jako osobní náklady a zahrnuje i sociální a zdravotní pojištění placené zaměstnavatelem za zaměstnance ve výši 35 % hrubé mzdy.

8.3.1 Odpisy

V případě malé vodní elektrárny se jedná o dlouhodobý hmotný majetek zařazený do 5. odpisové skupiny. Doba odepisování MVE je stejná jako předpokládaná doba životnosti bez větších oprav, tj. 30 let. Roční odpisová sazba je pro první rok 1,4 a pro další roky 3,4. Roční odpis lze vypočítat dle vzorce:

$$O = \frac{V_S C \cdot S}{100} \quad (8.1)$$

kde: $V_S C$ je vstupní cena [Kč]

S představuje odpisovou sazbu pro příslušný rok

8.3.2 Úroky z úvěru

Pro financování výstavby MVE Nadryby je zvolen bankovní úvěr ve výši investičních nákladů snížených o poskytnutou dotaci. Projekty podpořené dotací z pravidla získávají od bankovních subjektů úvěry s nižšími úrokovými sazbami. V obou variantách je doba splatnosti úvěru 12 let s 3% úrokovou sazbou p. a.

Pro potřeby splácení úvěru je zpracován anuitní splátkový kalendář. Splátkový kalendář je pro obě varianty řešené MVE uveden v *Tabulce 8.4*. Anuita představuje roční splátku dlužné částky, která se skládá z úmoru a úroku. Úmor je množství peněz, o které se sníží samotný dluh. Výše anuity je každý rok stejná, pouze se mění poměr mezi úmorem a úrokem.

Výpočet anuity:

Varianta I

$$A_n = J \cdot \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] = 13\,206\,000 \cdot \left[\frac{0,03 \cdot (1+0,03)^{12}}{(1+0,03)^{12} - 1} \right] = \underline{1\,326\,702 \text{ Kč}}$$

kde: J je jistina (hodnota úvěru)

i představuje úrokovou sazbu

n značí dobu splatnosti úvěru

Varianta II

$$A_n = J \cdot \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] = 16\,034\,000 \cdot \left[\frac{0,03 \cdot (1+0,03)^{12}}{(1+0,03)^{12} - 1} \right] = \underline{1\,610\,809 \text{ Kč}}$$

Tabulka 8.4 Anuitní splátkové kalendáře

Rok	Varianta I				Varianta II			
	Stav úvěru	Úmor	Úrok	Anuita	Stav úvěru	Úmor	Úrok	Anuita
1	13 206 000	930 522	396 180	1 326 702	16 034 000	1 129 789	481 020	1 610 809
2	12 275 478	958 438	368 264	1 326 702	14 904 211	1 163 683	447 126	1 610 809
3	11 317 040	987 191	339 511	1 326 702	13 740 528	1 198 593	412 216	1 610 809
4	10 329 849	1 016 807	309 895	1 326 702	12 541 935	1 234 551	376 258	1 610 809
5	9 313 042	1 047 311	279 391	1 326 702	11 307 384	1 271 587	339 222	1 610 809
6	8 265 731	1 078 730	247 972	1 326 702	10 035 797	1 309 735	301 074	1 610 809
7	7 187 000	1 111 092	215 610	1 326 702	8 726 062	1 349 027	261 782	1 610 809
8	6 075 908	1 144 425	182 277	1 326 702	7 377 035	1 389 498	221 311	1 610 809
9	4 931 483	1 178 758	147 944	1 326 702	5 987 537	1 431 183	179 626	1 610 809
10	3 752 725	1 214 121	112 582	1 326 702	4 556 354	1 474 118	136 691	1 610 809
11	2 538 605	1 250 544	76 158	1 326 702	3 082 235	1 518 342	92 467	1 610 809
12	1 288 060	1 288 060	38 642	1 326 702	1 563 893	1 563 892	46 917	1 610 809
Celkem	13 206 000	2 714 428	15 920 428			16 033 999	3 295 709	19 329 708

(Zdroj: vlastní zpracování)

Jelikož je MVE financována z cizích zdrojů, je hodnota provozních nákladů zvýšena o nákladové úroky v celkové výši 2 714 428 Kč pro Variantu I a 3 295 709 Kč v případě Varianty II.

8.4 Výpočet ekonomických ukazatelů efektivnosti investice

Pro hodnocení efektivnosti investice do MVE je využito dynamických metod výpočtu. Tyto metody zohledňují faktor času a rizika, které je nutné vzít v úvahu v projektech s delší dobou životnosti. Riziko a čas totiž obecně znehodnocují budoucí výnosy a zvyšují náklady.

8.4.1 Diskontovaná doba návratnosti

Tabulka 8.5 Výchozí výpočty pro stanovení DDN, ČSH a VVP při úrokové sazbě 10 % p. a.

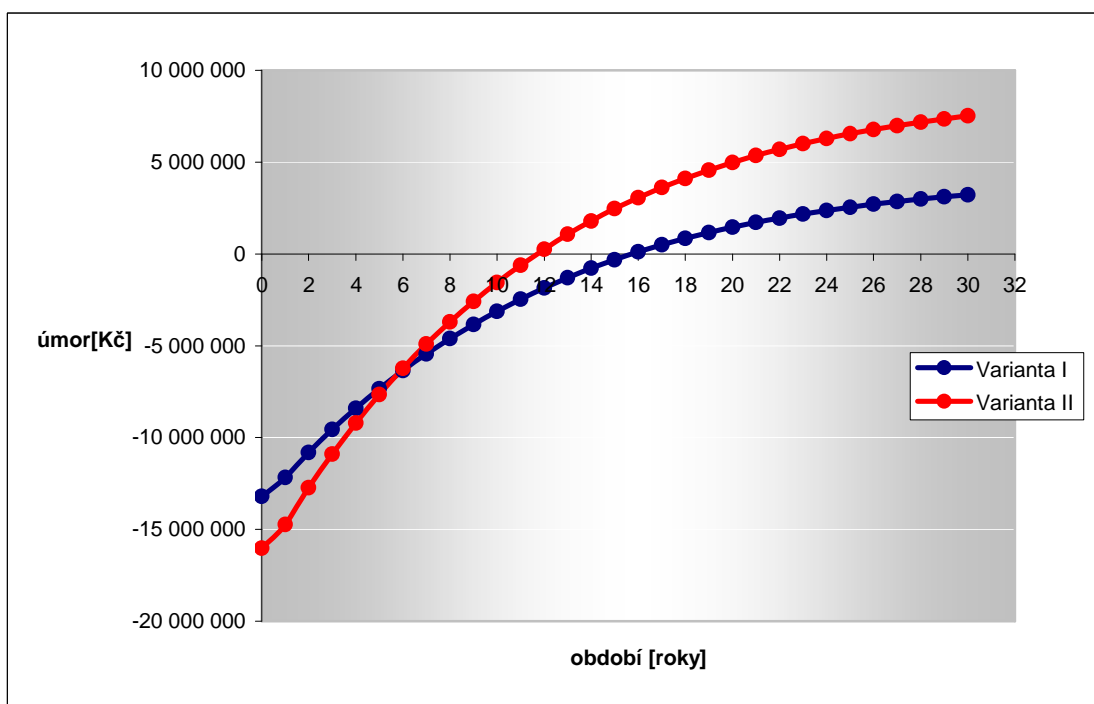
Rok	Varianta I				Varianta II			
	CF	Odúročitel	Diskontovaný CF	Kumulovaný CF	CF	Odúročitel	Diskontovaný CF	Kumulovaný CF
1.	1 139 223	0,90909	1 035 657	1 035 657	1 437 769	0,90909	1 307 063	1 307 063
2.	1 644 700	0,82645	1 359 256	2 394 913	2 413 927	0,82645	1 994 981	3 302 044
3.	1 667 990	0,75132	1 253 186	3 648 099	2 442 204	0,75132	1 834 864	5 136 908
4.	1 691 979	0,68301	1 155 644	4 803 743	2 471 330	0,68301	1 687 952	6 824 859
5.	1 716 687	0,62092	1 065 927	5 869 671	2 501 329	0,62092	1 553 128	8 377 988
6.	1 742 137	0,56447	983 391	6 853 062	2 532 229	0,56447	1 429 377	9 807 365
7.	1 768 350	0,51316	907 443	7 760 505	2 564 056	0,51316	1 315 766	11 123 131
8.	1 795 349	0,46651	837 544	8 598 049	2 596 837	0,46651	1 211 444	12 334 575
9.	1 823 159	0,42401	773 197	9 371 246	2 630 602	0,42401	1 115 632	13 450 207
10.	1 851 802	0,38554	713 950	10 085 196	2 665 380	0,38554	1 027 619	14 477 826
11.	1 881 306	0,35049	659 386	10 744 582	2 701 201	0,35049	946 754	15 424 581
12.	1 911 694	0,31863	609 124	11 353 707	2 738 096	0,31863	872 442	16 297 022
13.	1 942 994	0,28966	562 816	11 916 523	2 776 099	0,28966	804 137	17 101 159
14.	1 942 994	0,26333	511 651	12 428 174	2 776 099	0,26333	731 034	17 832 193
15.	1 942 994	0,23939	465 137	12 893 311	2 776 099	0,23939	664 576	18 496 769
16.	1 942 994	0,21763	422 852	13 316 163	2 776 099	0,21763	604 160	19 100 929
17.	1 942 994	0,19784	384 411	13 700 574	2 776 099	0,19784	549 236	19 650 166
18.	1 942 994	0,17986	349 465	14 050 039	2 776 099	0,17986	499 306	20 149 471
19.	1 942 994	0,16351	317 695	14 367 734	2 776 099	0,16351	453 914	20 603 386
20.	1 942 994	0,14864	288 814	14 656 548	2 776 099	0,14864	412 649	21 016 035
21.	1 942 994	0,13513	262 558	14 919 109	2 776 099	0,13513	375 136	21 391 171
22.	1 942 994	0,12285	238 689	15 157 795	2 776 099	0,12285	341 032	21 732 204
23.	1 942 994	0,11168	216 990	15 374 785	2 776 099	0,11168	310 030	22 042 233
24.	1 942 994	0,10153	197 264	15 572 048	2 776 099	0,10153	281 845	22 324 078
25.	1 942 994	0,09221	179 331	15 751 379	2 776 099	0,09221	256 223	22 580 301
26.	1 942 994	0,08390	163 028	15 914 406	2 776 099	0,08390	232 930	22 813 231
27.	1 942 994	0,07628	148 207	16 062 614	2 776 099	0,07628	211 754	23 024 985
28.	1 942 994	0,06934	134 733	16 197 347	2 776 099	0,06934	192 504	23 217 489
29.	1 942 994	0,06304	122 485	16 319 833	2 776 099	0,06304	175 004	23 392 493
30.	1 942 994	0,05731	111 350	16 431 183	2 776 099	0,05731	159 094	23 551 587

(Zdroj: vlastní zpracování)

Výpočet tohoto typu návratnosti je vhodnější než metoda prosté návratnosti, neboť bere

v úvahu faktor času a rizika, které jsou ve výše uvedené *Tabulce 8.4* uvedeny pod pojmem odúročitel. Přestože jsou u tohoto projektu garantované výkupní ceny na dobu 30 let, tyto finanční prostředky mohou být znehodnocovány inflací.

Časové určení návratnosti investice je dáno rovností kumulovaného CF a kapitálového výdaje. Pro Variantu I vychází diskontovaná doba návratnosti 16 let a pro Variantu II 12 let.



Graf 8.1 Diskontovaná doba návratnosti investice

(Zdroj: vlastní zpracování)

8.4.2 Čistá současná hodnota

Tento ukazatel porovnává současnou hodnotu očekávaných příjmů a současnou hodnotu kapitálových výdajů.

Výpočet ČSH při požadované úrokové sazbě 10 % p. a.:

Variantu I

$$ČSH_I = \sum_{n=1}^N CF_n \frac{1}{(1+i)^n} - K = 16\,431\,183 - 13\,206\,000 = \underline{3\,225\,183 \text{ Kč}}$$

kde: CF_n značí peněžní příjem v jednotlivých letech životnosti (roční čistý zisk + odpisy)

i je požadovaná úroková míra

n představuje jednotlivé roky životnosti

N zobrazuje dobu životnosti

K značí kapitálový výdaj

Varianta II

$$\check{C}SH_{II} = \sum_{n=1}^N CF_n \frac{1}{(1+i)^n} - K = 23\,551\,587 - 16\,034\,000 = \underline{7\,517\,587 \text{ Kč}}$$

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že obě varianty investičního projektu jsou přijatelné, neboť splňují požadované 10% zúročení a dokonce jej převyšují. Základní podmínkou při výběru investičního projektu podle ČSH je, aby byla tato hodnota kladná. Jako nejvýhodnější varianta je hodnocena ta, která dosahuje nejvyšší hodnoty ČSH. V našem případě je to Varianta II, tj. použití 3 turbín.

8.4.3 Vnitřní výnosové procento

Cílem této metody je určení takové úrokové míry, při níž se současná hodnota peněžních příjmů investice rovná současné hodnotě kapitálových výdajů. Tato hodnota je chápána jako minimální požadovaná výnosnost, které musí investiční projekt dosáhnout, aby nebyl ztrátový. VVP je úroková sazba, při které je čistá současná hodnota rovna nule.

V uvažovaném projektu bylo pro určení hodnoty VVP využito metody jednoduché lineární interpolace, která spočívá v určení dvou čistých současných hodnot při rozdílných úrokových sazbách.

Výpočet VVP:**Varianta I**

$$VVP_I = \acute{u}m_n + \frac{\check{C}SH_n}{\check{C}SH_n - \check{C}SH_v} \cdot (\acute{u}m_v - \acute{u}m_n) = 10 + \frac{3\,225\,183}{3\,225\,183 + 2\,086\,151} \cdot (15 - 10) = \underline{13,04 \text{ \%}}$$

kde: $\acute{u}m_n$ je úroková míra nižší (10 %)

$\acute{u}m_v$ představuje úrokovou míru vyšší (15 %)

$\check{C}SH_n$ značí čistou současnou hodnotu při nižší úrokové míře

$\check{C}SH_v$ je čistá současná hodnota při vyšší úrokové míře

Varianta II

$$VVP_{II} = \acute{u}m_n + \frac{\check{C}SH_n}{\check{C}SH_n - \check{C}SH_v} \cdot (\acute{u}m_v - \acute{u}m_n) = 10 + \frac{7\,517\,587}{7\,517\,587 + 109\,889} \cdot (15 - 10) = \underline{14,93 \text{ \%}}$$

Další metoda pro určení VVP je pomocí funkce MÍRA.VÝNOSNOSTI obsažené v softwaru Microsoft Excel. Touto funkcí vychází VVP_I 12,63 % a VVP_{II} 14,90 %. Vypočtená hodnota VVP se porovnává buďto s bankovní úrokovou sazbou nebo úrokovou sazbou bezrizikových cenných papírů (např. státních dluhopisů). Například emise státních dluhopisů ČR je zpravidla úročena úrokovou sazbou do 10 % p. a.

Závěr

Práce je zaměřena na problematiku malých vodních elektráren, které se k lednu 2011 s celkovým instalovaným výkonem 296,8 MW podílely na výrobě elektrické energie 1,63 % ze všech elektrických zdrojů. Základní informace o MVE a hodnotách produkce elektřiny tímto zdrojem jsem uvedl v první kapitole. V této kapitole jsem také rozepsal obecné dělení MVE a popsal hlavní stavební části těchto elektráren.

V druhé kapitole jsem se zabýval zásadami projektování staveb malých vodních elektráren. Informoval jsem o správném umístění MVE na toku a o vhodném tvarování vtoků. Dále jsem popsal tvarování přívodního a odpadního kanálu a zmínil důležitost a funkci česlí. V této kapitole jsem také uvedl základní projektovou dokumentaci potřebnou k zahájení výstavby MVE a legislativu vztahující se k projektování, výstavbě a provozu elektráren.

Praktická část mé práce, kterou je projektová příprava MVE, začíná ve třetí kapitole. Zde jsem nejprve uvedl obecné hodnocení vhodné lokality pro výstavbu a tyto postupy jsem dále aplikoval k nalezení vhodné lokality pro mnou vytvořenou projektovou přípravu. Pro výstavbu MVE jsem uvažoval 2 volné jezy na řekách v okolí Plzně. Vybranými vhodnými lokalitami jsou jez na řece Radbuze u obce Křenovy a jez na řece Berounce u obce Nadryby. U těchto lokalit jsem porovnával jak hydrologická data daných řek, tak i vhodnost výstavby MVE dle možnosti vybudování příjezdové cesty nebo možnosti připojení do elektrizační soustavy. Z posuzovaných hledisek jsem shledal jako vhodnější lokalitu pro výstavbu jez u obce Nadryby, kde je uvažována rekonstrukce stávajícího jezu Povodím Vltavy s. p.

Ve čtvrté kapitole jsem se zabýval vlastním návrhem MVE Nadryby od předběžných teoretických hodnot využití průtokových poměrů až po celkové stavební řešení navrhované elektrárny. Uvedl jsem vhodné umístění budovy MVE u řeky Berounky a provedl projektování přívodního i odpadního kanálu a rybího přechodu u budovy strojovny. Také jsem popsal vhodné stavební řešení budovy strojovny.

Po vyprojektování stavebního řešení jsem v páté kapitole vybral vhodné strojní zařízení pro MVE Nadryby. Zde jsem se rozepsal především o výběru turbín, ale také převodů ke generátorům. Pro tuto lokalitu s poměrně velkým průtokem a malým spádem jsem uvažoval 3 druhy turbín, a to turbínu Bánkiho, Kaplanovu a turbínu vírovou. Vybral jsem pro tento návrh turbínu Kaplanovu v její modifikaci Semi-Kaplan. Turbínu jsem vybral od výrobce Hydrohrom, s. r. o. a dále jsem uvažoval dvě varianty s použitím této turbíny. Ve Variantě I jsem uvažoval využití dvou turbín HH 1000 SSK a Variantě II tří těchto turbín.

Obecné zásady při výběru vhodného generátoru pro daný typ turbíny jsem rozebral v šesté kapitole. Asynchronní generátor je součástí dodávky od výrobce turbín společně s ovládací částí, hladinovou regulací, rozvaděči a transformátory. Dodávaný generátor společnosti Siemens, s. r. o. jsem popsal a uvedl jeho průběh účinnosti při různém zatížení. V této kapitole jsem také popsal řídicí, regulační a měřicí systémy vhodné pro projektovanou MVE. V závěru této kapitoly jsem charakterizoval připojení elektrárny k distribuční síti.

V kapitole sedmé jsem se věnoval průměrné roční výrobě elektrické energie pro obě varianty. Při zahrnutí účinností turbíny, generátoru i převodu vyšel výkon na svorkách generátoru jedné turbíny 56,97 kW. Z této hodnoty jsem vycházel při výpočtu vyrobené elektřiny, která vyšla pro Variantu I 815 206,75 kWh a pro Variantu II 1 130 558,4 kWh za rok. Při výpočtu jsem zohledňoval regulaci turbín závislou na průtokových hodnotách uvedených v odtokové křivce.

Na závěr jsem zhodnotil MVE Nadryby dle ekonomických ukazatelů. Roční tržby z prodeje elektrické energie při uvažování zvolení prodeje elektřiny formou výkupních cen jsou 2 600 510 Kč ve Variantě I a 3 606 481 Kč v případě Varianty II. V poslední kapitole jsem také uvedl cenovou nabídku strojních a elektrických částí od Hydrohrom, s. r. o. a provedl odhad dalších nákladů spojených s výstavbou této elektrárny. V příložených tabulkách jsem vyčíslil financování projektu a peněžní toky. Pro porovnání ekonomické efektivnosti obou variant jsem vypočetl diskontovanou dobu návratnosti, čistou současnou hodnotu a vnitřní výnosové procento. Z těchto ukazatelů vyplývá, že výstavba dle Varianty II, tj. použití 3 turbín, je vhodnější. Při této variantě se navrátí investice vložená do výstavby 12. rok provozu MVE a výnosové procento je 14,93 %. Při zvolení této varianty vydělá elektrárna majiteli za dobu svého provozu výrazně více, než-li v případě zvolení Varianty I.

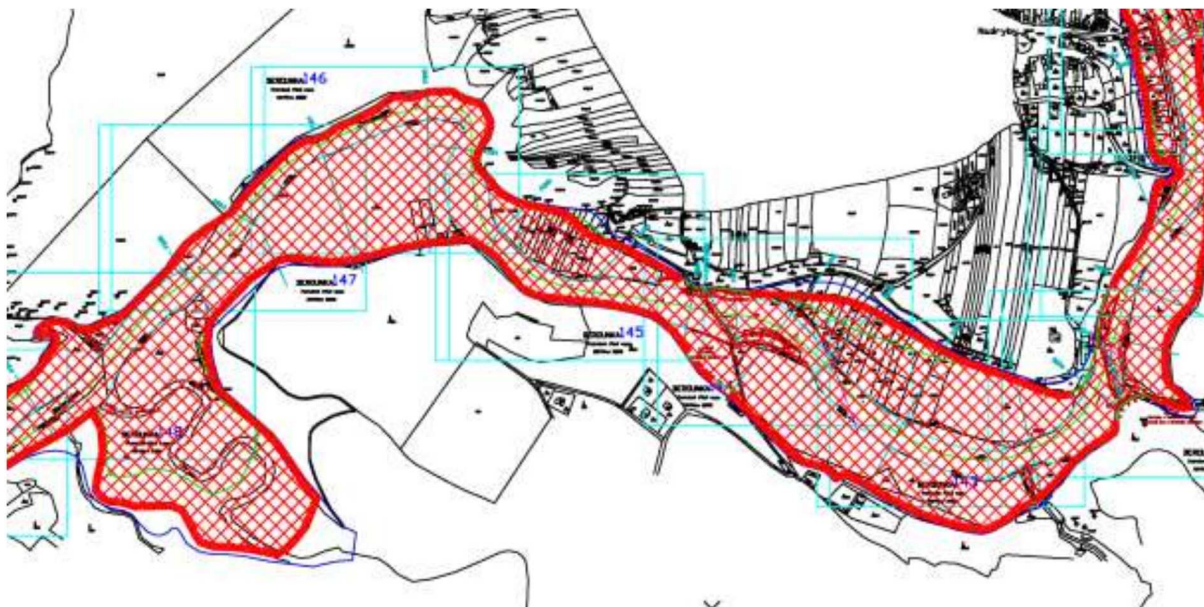
Tato diplomová práce může sloužit jako předprojektová příprava stávajícímu majiteli pozemků. Ten již MVE vlastní a není vyloučen jeho záměr vybudování další MVE právě v této lokalitě. Také může být zahrnuta do projektu výstavby jezu Povodím Vltavy s. p. v případě, že se podnik rozhodne využít spádu jezu pro výrobu elektrické energie.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Ministerstvo průmyslu a obchodu, odbor 05200, *Zpráva o plnění indikativního cíle výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie za rok 2010*, říjen 2011
- [2] <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/flash-model-jak-funguje-vodni-elektrarna.html>
- [3] Dušička, P., Gabriel, P. aj.: *Malé vodní elektrárny*, Jaga group, Bratislava 2003
- [4] Škorpil, J., Kasárník, M. *Obnovitelné zdroje energie I .díl vodní elektrárny*, Vydavatelství Západočeské univerzity, Plzeň 1997
- [5] Melichar, J. *Malé vodní turbíny*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2000
- [6] <http://home.zcu.cz/~tvystein/downloads/EKE/Mal%E9%20vodn%ED%20elektr%E1rny.pdf>
- [7] <http://www.energetika.cz/index.php?id=169>
- [8] <http://www.mpo.cz/dokument1169.html>
- [9] <http://www.calla.cz/data/energetika/ostatni/VodaaZP.pdf>
- [10] Holata, M., *Malé vodní elektrárny, projektování a provoz*, Academia, Praha 2002
- [11] Petr Nowak, *Studie opravy jezu Berounka - Nadryby*, Praha 2008
- [12] <http://mve.energetika.cz/>
- [13] <http://cink-hydro-energy.com>
- [14] <http://www.hydrohrom.cz>
- [15] <http://www.mpo.cz/dokument21405.html>

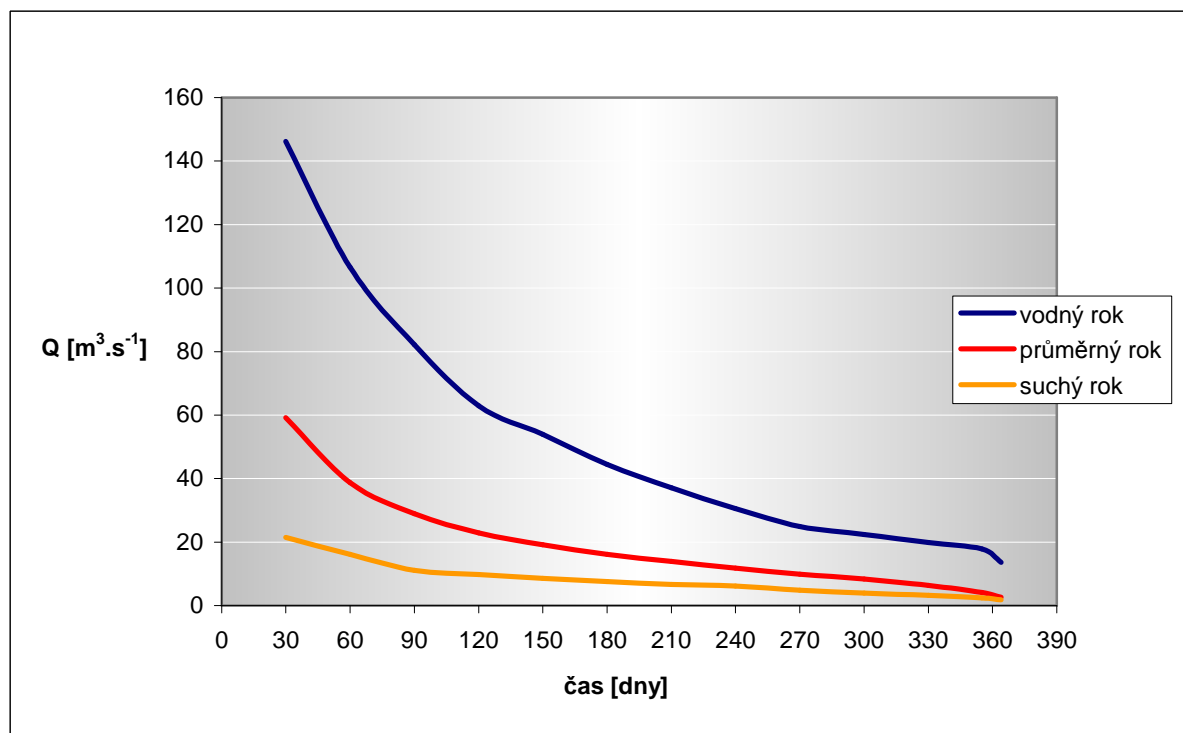
Přílohy

Příloha 1. Zobrazení hydrologických poměrů v lokalitě Nadryby



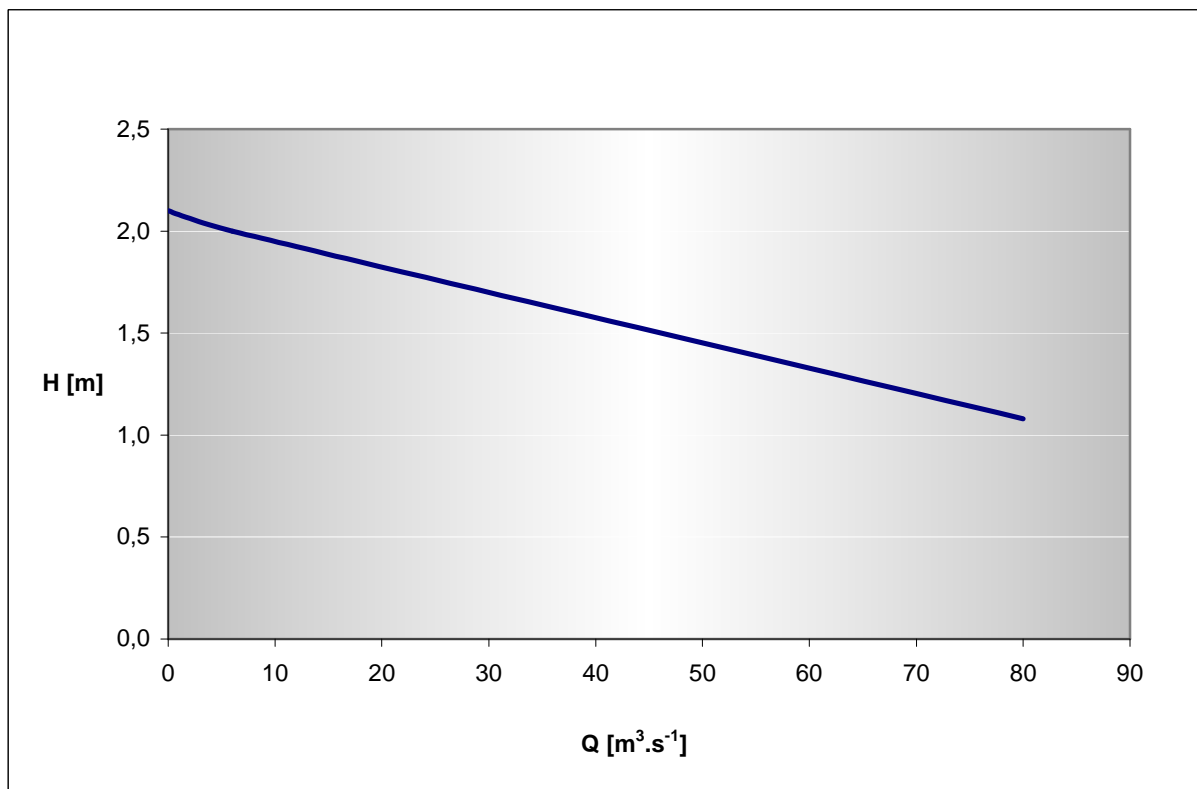
Obr. 1 Zobrazení záplavové čáry

(Zdroj: poskytnuto od Povodí Vltavy, s. p.)



Graf 1 Porovnání průtokových hodnot v různě vodných rocích

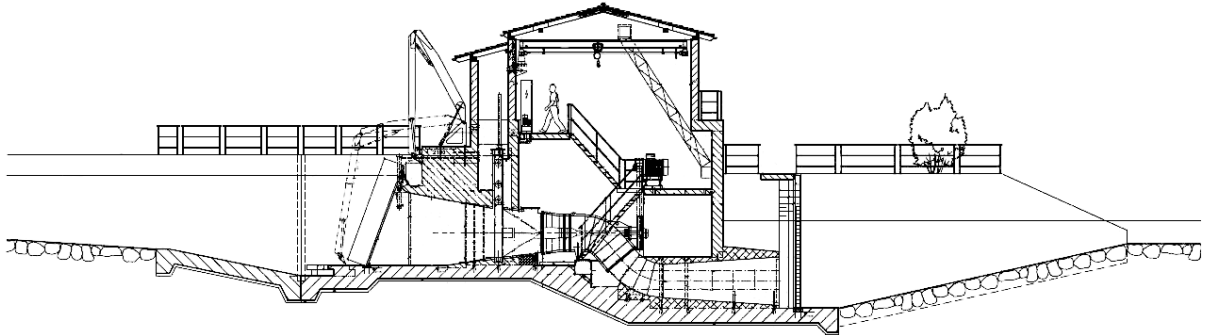
(Zdroj: vlastní zpracování dle poskytnutých dat od Povodí Vltavy, s. p.)



Graf 2 Předběžný odhad kolísání spádu

(Zdroj: vlastní zpracování dle poskytnutých dat od Povodí Vltavy, s. p.)

Příloha 2. Obrázková příloha



Obr. 2 Budova strojovny MVE Hýskov

(Zdroj: <http://www.hydrohrom.cz>)



Obr. 3 Pohled na oběžné lopatky turbíny Semi-Kaplan

(Zdroj: <http://www.hydrohrom.cz>)



Obr. 4 Fotografie řemenového převodu na generátor (Zdroj: <http://www.hydrohrom.cz>)

Příloha 3. Ekonomické hodnocení

Položka	Varianta I													Období 13-30 2024-2041
	Období 0	Období 1 2012	Období 2 2013	Období 3 2014	Období 4 2015	Období 5 2016	Období 6 2017	Období 7 2018	Období 8 2019	Období 9 2020	Období 10 2021	Období 11 2022	Období 12 2023	
Investice (investiční náklady, bez DPH a dotace)	-16 206 000													
Provozní tržby		2 080 408	2 600 510	2 600 510	2 600 510	2 600 510	2 600 510	2 600 510	2 600 510	2 600 510	2 600 510	2 600 510	2 600 510	2 600 510
VÝNOSY CELKEM provozní		2 080 408	2 600 510	2 600 510	2 600 510	2 600 510	2 600 510	2 600 510	2 600 510	2 600 510	2 600 510	2 600 510	2 600 510	2 600 510
Spotřeba materiálu		35 000	35 000	35 000	35 000	35 000	35 000	35 000	35 000	35 000	35 000	35 000	35 000	35 000
Spotřeba energie		15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000
Náklady na opravu a údržbu		65 000	65 000	65 000	65 000	65 000	65 000	65 000	65 000	65 000	65 000	65 000	65 000	65 000
Osobní náklady (mzdy+SZ a ZP)		216 000	216 000	216 000	216 000	216 000	216 000	216 000	216 000	216 000	216 000	216 000	216 000	216 000
Odpisy		226 884	551 004	551 004	551 004	551 004	551 004	551 004	551 004	551 004	551 004	551 004	551 004	551 004
Finanční náklady (úroky)		396 180	368 264	339 511	309 895	279 391	247 972	215 610	182 277	147 944	112 582	76 158	38 642	0
NAKLADY CELKEM provozní		954 064	1 250 268	1 221 515	1 191 899	1 161 395	1 129 976	1 097 614	1 064 281	1 029 948	994 586	958 162	920 646	882 004
HV provozní, hrubý tj. provozní výnosy - provozní náklady		1 126 344	1 350 242	1 378 995	1 408 611	1 439 115	1 470 534	1 502 896	1 536 229	1 570 562	1 605 924	1 642 348	1 679 864	1 718 506
Daňová sazba		0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
Daň z příjmu (absolutní výše)		214 005	256 546	262 009	267 636	273 432	279 401	285 550	291 884	298 407	305 126	312 046	319 174	326 516
HV čisté po odpočtu daně		912 339	1 093 696	1 116 986	1 140 975	1 165 683	1 191 133	1 217 346	1 244 345	1 272 155	1 300 798	1 330 302	1 360 690	1 391 990
PROVOZNÍ CASH FLOW = HV čisté+odpisy		1 139 223	1 644 700	1 667 990	1 691 979	1 716 687	1 742 137	1 768 350	1 795 349	1 823 159	1 851 802	1 881 306	1 911 694	1 942 994

Varianta II														
Položka	Období 0	Období 1	Období 2	Období 3	Období 4	Období 5	Období 6	Období 7	Období 8	Období 9	Období 10	Období 11	Období 12	Období 13-30
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024-2041
Investice (investiční náklady, bez DPH a dotace)		3 000 000												
Provozní tržby		2 524 537	3 606 481	3 606 481	3 606 481	3 606 481	3 606 481	3 606 481	3 606 481	3 606 481	3 606 481	3 606 481	3 606 481	3 606 481
VÝNOSY CELKEM provozní		2 524 537	3 606 481	3 606 481	3 606 481	3 606 481	3 606 481	3 606 481	3 606 481	3 606 481	3 606 481	3 606 481	3 606 481	3 606 481
Spotřeba materiálu		35 000	35 000	35 000	35 000	35 000	35 000	35 000	35 000	35 000	35 000	35 000	35 000	35 000
Spotřeba energie		15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000
Náklady na opravu a údržbu		65 000	65 000	65 000	65 000	65 000	65 000	65 000	65 000	65 000	65 000	65 000	65 000	65 000
Osobní náklady (mzdy+SZ a ZP)		216 000	216 000	216 000	216 000	216 000	216 000	216 000	216 000	216 000	216 000	216 000	216 000	216 000
Odpisy		266 476	647 156	647 156	647 156	647 156	647 156	647 156	647 156	647 156	647 156	647 156	647 156	647 156
Finanční náklady (úroky)		481 020	447 126	412 216	376 258	339 222	301 074	261 782	221 311	179 626	136 691	92 467	46 917	0
NAKLADY CELKEM provozní		1 078 496	1 425 282	1 390 372	1 354 414	1 317 378	1 279 230	1 239 938	1 199 467	1 157 782	1 114 847	1 070 623	1 025 073	978 156
HV provozní, hrubý tj. provozní výnosy - provozní náklady		1 446 041	2 181 199	2 216 109	2 252 067	2 289 103	2 327 251	2 366 543	2 407 014	2 448 699	2 491 634	2 535 858	2 581 408	2 628 325
Daňová sazba		0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
Daň z příjmu (absolutní výše)		274 748	414 428	421 061	427 893	434 930	442 178	449 643	457 333	465 253	473 410	481 813	490 468	499 382
HV čisté po odpocitu daně		1 171 293	1 766 771	1 795 048	1 824 174	1 854 173	1 885 073	1 916 900	1 949 681	1 983 446	2 018 224	2 054 045	2 090 940	2 128 943
PROVOZNÍ CASH FLOW = HV čisté+odpisy		1 437 769	2 413 927	2 442 204	2 471 330	2 501 329	2 532 229	2 564 056	2 596 837	2 630 602	2 665 380	2 701 201	2 738 096	2 776 099