

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Návrh rekonstrukce malé vodní elektrárny na Berounce**

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr AUBRECHT**  
Osobní číslo: **E19N0024K**  
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Téma práce: **Návrh rekonstrukce malé vodní elektrárny na Berounce**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky**

### Zásady pro vypracování

1. Popište stávající stav MVE.
2. Zhodnoťte současný provoz MVE.
3. Zpracujte návrh rekonstrukce MVE.
4. Zhodnoťte návrh po stránce energetické, ekonomické a ekologické.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

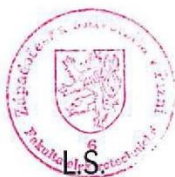
1. Škorpil J., Kasářík M.: Obnovitelné zdroje energie I – Vodní elektrárny. Skripta ZČU, 2000.

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Jan Škorpil, CSc.**  
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**  
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**



**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan



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

## **Abstrakt**

Cílem práce je návrh rekonstrukce malé vodní elektrárny na řece Berounce. Úvodní část je zaměřena na seznámení s problematikou získávání elektrické energie z vodních zdrojů; dále je popsán současný stav elektrárny se současnými výkony dodávanými do distribuční sítě a možnostmi získávání informací o aktuálním výkonu a předpokládaném průtoku vody. Následuje návrh rekonstrukce, který se snaží maximálně využít povolené hydrologické poměry dané lokalitou. Pro navrhované řešení je vypočtena teoretická výroba elektrické energie generované novou elektrárnou. Poslední část hodnotí navrhované řešení po stránce ekologické, energetické a ekonomické.

## **Klíčová slova**

Vodní elektrárna, derivační vodní elektrárna, jezová vodní elektrárna, přivaděč, vodní turbína, elektrický generátor, hydrologické poměry, kompenzace, kritérium aktualizovaného zisku

**Abstract**

The aim of this thesis is to design a reconstruction of a small hydroelectric power plant on the river Berounka. The introductory part of the thesis is focused on getting acquainted with the issue of obtaining electricity from a water sources. Furthermore, the present state of the power plant is described with the outputs supplied to the distribution network and the possibilities of obtaining information on the present output and predicting the water flow. Next, the paper focuses on the design of the reconstruction, where the effort is to make maximum use of the permitted hydrological conditions of the site. For the proposed solution the theoretical production of electricity generated by the new power plant is calculated. The last part evaluates the proposed solution in ecological, energy and economic terms.

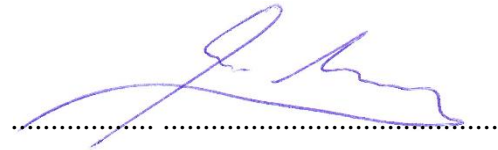
**Key words**

Hydroelectric power plant, derivative hydroelectric power plant, weir hydroelectric power plant, feeder, water turbine, electric generator, hydrological conditions, compensation, criterion of net present value

## Prohlášení

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.



podpis

V Plzni dne 25.5.2021

Bc. Petr Aubrecht

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Janu Škorpilovi, CSc za cenné připomínky a metodické vedení práce. Dále mému zaměstnavateli, firmě Stavmonta spol. s r. o., bez které by tato práce nemohla vzniknout. Rád bych poděkoval také své rodině a všem přátelům, kteří mě při psaní této práce podpořili, a bez jejichž pomoci by nebylo možné práci dokončit.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>11</b>
<b>1 VODNÍ ELEKTRÁRNA</b> .....	<b>13</b>
1.1 PRINCIP VODNÍ ELEKTRÁRNY .....	13
1.2 ROZDĚLENÍ PODLE INSTALOVANÉHO VÝKONU .....	14
1.3 ROZDĚLENÍ PODLE VYUŽITÍ SPÁDU .....	14
1.3.1 Nízkotlaká vodní elektrárna.....	14
1.3.2 Nízkotlaká vodní elektrárna s tlakovým přivaděčem .....	15
1.3.3 Vysokotlaká vodní elektrárna .....	15
1.4 ROZDĚLENÍ PODLE VYUŽITÍ VODNÍHO TOKU.....	16
1.4.1 Průtočná vodní elektrárna.....	16
1.4.1.1 Derivační vodní elektrárna.....	16
1.4.1.2 Jezová vodní elektrárna.....	17
1.4.2 Akumulační vodní elektrárna.....	17
1.4.2.1 Přehradová vodní elektrárna.....	17
1.4.2.2 Přečerpávací vodní elektrárna .....	18
1.4.3 Slapová vodní elektrárna.....	19
1.5 PŘIVADĚČE A ODPADY.....	19
1.5.1 Beztlakové přivaděče a odpady .....	19
1.5.1.1 Ustálené rovnoměrné proudění vody.....	20
1.5.1.2 Ustálené nerovnoměrné proudění vody.....	22
1.5.1.3 Neustálené proudění vody.....	23
1.6 VODNÍ TURBÍNY .....	23
1.6.1 Francisova turbína .....	24
1.6.2 Kaplanova turbína.....	25
1.6.3 Peltonova turbína .....	25
1.6.4 Bánkiho turbína.....	26
1.6.5 Archimedův šroub.....	26
1.7 PŘEVODY .....	27
1.7.1 Ozubený převod.....	27
1.7.2 Řemenový převod.....	28
1.7.3 Řetězový převod.....	28
1.8 ELEKTRICKÝ GENERÁTOR .....	28
1.8.1 Synchronní generátor .....	28
1.8.2 Asynchronní generátor .....	28
1.8.3 Kompenzace jalového výkonu.....	29
<b>2 HISTORIE LIBŠTEJNSKÉHO MLÝNA</b> .....	<b>30</b>
<b>3 SOUČASNÝ STAV LIBŠTEJNSKÉHO MLÝNA</b> .....	<b>32</b>
3.1 DERIVAČNÍ ELEKTRÁRNA MVE1 .....	33
3.2 JEZOVÁ ELEKTRÁRNA MVE2.....	34
3.2.1 Teoretický výkon MVE2.....	36
3.2.2 Náklady spojené s provozem MVE2.....	36
3.2.3 Reálný výkon MVE2.....	37
3.2.4 Předpověď hladiny řeky.....	39
<b>4 NÁVRH REKONSTRUKCE</b> .....	<b>40</b>
4.1 ENERGETICKÝ POTENCIÁL LOKALITY .....	40
4.2 VOLBA VODNÍ TURBÍNY .....	42
4.3 VOLBA GENERÁTORU .....	43



4.4	VOLBA KOMPENZAČNÍHO KONDENZÁTORU .....	45
4.5	UMÍSTĚNÍ NOVÉHO OBJEKTU MVE .....	47
4.6	ÚPRAVA VODNÍHO PŘIVADĚČE .....	48
4.7	OBJEKT MVE.....	49
4.8	ELEKTRICKÉ SCHÉMA.....	50
4.9	VYVEDENÍ ELEKTRICKÉHO VÝKONU .....	52
4.10	CELKOVÁ ÚČINNOST TECHNOLOGIE .....	52
4.11	SPOLUPRÁCE TŘÍ TURBÍN.....	53
4.12	TEORETICKÁ ROČNÍ VYROBENÁ ENERGIE .....	54
<b>5</b>	<b>ZHODNOCENÍ NÁVRHU REKONSTRUKCE .....</b>	<b>55</b>
5.1	ZHODNOCENÍ REKONSTRUKCE PO STRÁNCE EKOLOGICKÉ .....	55
5.2	ZHODNOCENÍ REKONSTRUKCE PO STRÁNCE ENERGETICKÉ.....	57
5.3	ZHODNOCENÍ REKONSTRUKCE PO STRÁNCE EKONOMICKÉ .....	58
5.3.1	<i>Investiční náklady.....</i>	<i>59</i>
5.3.2	<i>Provozní náklady po dobu životnosti.....</i>	<i>60</i>
5.3.3	<i>Tržby po dobu životnosti.....</i>	<i>60</i>
5.3.4	<i>Zhodnocení kritériem aktualizovaného zisku.....</i>	<i>62</i>
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>64</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....</b>	<b>66</b>

## Úvod

Cílem práce je návrh rekonstrukce malé vodní elektrárny na řece Berounce. Vodní mlýn v této lokalitě, zvané Libštejnský mlýn, má bohatou historii sahající až do 14. století. Původně sloužil mlýn pouze ke mletí, za účelem výroby elektrické energie byl mlýn přebudován až v 90. letech 20. století.

První část práce přibližuje teoretické informace o způsobech získávání elektrické energie z vodních děl. Ukazuje rozdíly mezi jednotlivými druhy vodních elektráren podle jejich velikosti a způsobu nakládání s vodou. Dále jsou popsány základní rozdíly současně používaných vodních turbín.

Druhá část sděluje historii této lokality již od prvních zmínek, které jsou úzce spjaté s hradem Libštejnem, díky němuž lokalita získala své jméno.

Ve třetí části je popsán současný stav Libštejnského mlýna. Jsou zde dvě elektrárny, první je osazena téměř původní Francisovou turbínou z roku 1932, ve druhé jsou dvě Bánkiho turbíny. Text se dále zabývá zhodnocením současného řešení s ohledem na činný výkon dodávaný do distribuční sítě a náklady spojenými s provozem.

Čtvrtá část se soustředí na návrh nového řešení vodní elektrárny, které by maximálně využilo potenciál tohoto místa. Rekonstrukce bere v úvahu hydrologické poměry, které jsou statisticky zpracovávány Českým hydrometeorologickým ústavem za posledních 70 let. Zohledňuje veškeré ztráty spojené s přeměnou potenciální a kinetické energie vody na elektrickou energii a přibližuje teoretické množství energie vyrobené v nově navrhovaném řešení.

Na závěr je provedeno zhodnocení celé rekonstrukce nové malé vodní elektrárny po stránce ekologické, energetické a ekonomické.

## Seznam symbolů a zkratk

$MVE$	Malá vodní elektrárna
$CHMI$	Český hydrometeorologický ústav
$ERÚ$	Energetický regulační ústav
$P$	Výkon [W]
$P_{el}$	Elektrický výkon [W]
$P_{mech}$	Mechanický výkon [W]
$\rho$	Hustota vody [ $l/m^3$ ]
$Q$	Průtok vody [ $m^3/s$ ]
$Q_{Berounka}$	Průtok vody v řece Berounce [ $m^3/s$ ]
$Q_{san}$	Sanační průtok [ $m^3/s$ ]
$g$	Gravitační zrychlení [ $m/s^2$ ]
$H$	Spád [m]
$\mu$	Účinnost [-]
$\mu_T$	Účinnost turbíny [-]
$\mu_z$	Účinnost ozubeného převodu [-]
$\mu_{\check{r}}$	Účinnost řemenového převodu [-]
$\mu_G$	Účinnost generátoru [-]
$S$	Plocha průtočného profilu kanálu [ $m^2$ ]
$C$	Rychlostní součinitel [-]
$K$	Modul průtoku [-]
$R$	Hydraulický poloměr [m]
$O$	Omočený obvod [m]
$I$	Sklon hladiny [-]
$n$	Součinitel drsnosti [-]
$b$	Šířka dna kanálu [m]
$B$	Šířka hladiny kanálu [m]
$h, h_1, h_2$	Hloubka kanálu [m]
$\Delta h$	Rozdíl hladin [m]
$m$	Sklon svahu kanálu [-]
$v$	Rychlost proudění v kanálu [m/s]
$L, L_{pk}$	Délka kanálu [m]

$\cos\varphi$	Účinník [-]
$n_n$	Jmenovité otáčky generátoru [ot/min]
$Q_c$	Výkon kompenzačního kondenzátoru [var]
FO	Frekvenční ochrana
AD	Přepět'ová ochrana
VO	Vektorová ochrana
PLA 33	Výkonový analyzátor
HSN 02	Auto-synchronizátor
$L_{kp}$	Vzdálenost elektrické přípojky [m]
$I_{max}$	Maximální elektrický proud [A]
$W_{el}$	Elektrická energie [kWh]
$Q_N$	Výhřevnost paliva [J/kg]
$M_U$	Množství paliva [kg/kWh]
$SO_2$	Oxid siřičitý
$NO_x$	Oxidy dusíku
CO	Oxid uhelnatý
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
NPV	Kritérium aktualizovaného zisku
$Z_{T_{\bar{z}}}$	Zisky za dobu životnosti [Kč]
$T_{\bar{z}}$	Doba životnosti [roky]
$N_p$	Provozní náklady [Kč]
V	Tržby [Kč]
$N_{ip}$	Investiční náklady [Kč]
r	Faktor času [-]

# 1 Vodní elektrárna

Vodní elektrárna patří mezi obnovitelné zdroje elektrické energie, která využívá stálého koloběhu vody na Zemi. Původem této energie je sluneční záření, které dopadá na naši planetu. Využívá přeměnu potenciální a kinetické energie vody v elektrickou energii. Při této přeměně nevznikají téměř žádné emise, proto je vhodným zdrojem energie v současném pojetí energetiky, která se snaží minimalizovat vznik skleníkových plynů.[1]

- **Potenciální (polohová) energie** v gravitačním poli Země závisí na hmotnosti (množství vody) a na výšce (velkosti rozdílů hladin).
- **Kinetická (pohybová) energie** je závislá na rychlosti proudění vody.

## 1.1 Princip vodní elektrárny

Na vodní tok plynule navazuje vtokový objekt, tvořený jezem nebo přehradou, který slouží k soustředění průtoku a zvýšení spádu. Voda je vedena přes hrubé a jemné česle, které slouží k zachycení mechanických nečistot (trávy, listí a klacků), aby se nedostaly do strojovny. Ve strojovně se hydraulická energie vody mění na mechanickou energii turbíny, která je dále přenášena přes hřídel na generátor, kde se mění v elektrickou energii. [2]

Výkon turbíny závisí na velikosti spádu, průtoku vody turbínou a její účinnosti.[1]

$$P = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H \cdot \mu \quad (1.1)$$

Kde:

$\rho$  – hustota vody

$Q$  – průtok

$g$  – tíhové zrychlení

$H$  – spád

$\mu$  – účinnost turbíny

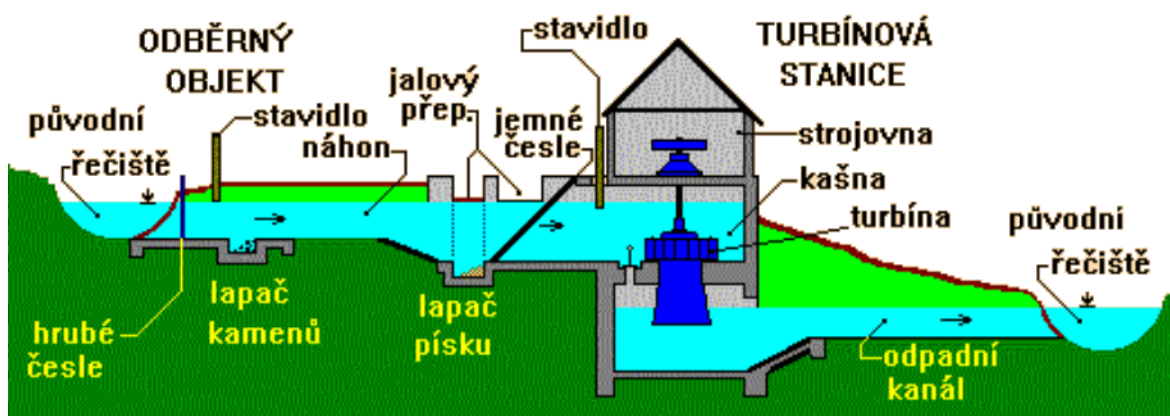
## 1.2 Rozdělení podle instalovaného výkonu

- Mikroelektrárny nebo mobilní zdroje – výkon pod 35 kW
- Drobné nebo minielektrárny – výkon od 35 do 100 kW
- Malé vodní elektrárny – výkon od 100 do 1000kW
- Malé vodní elektrárny průmyslové – výkon od 1 do 10 MW
- Elektrárny střední – výkon od 10 do 200 MW
- Elektrárny velké – výkon nad 200 MW

## 1.3 Rozdělení podle využití spádu

### 1.3.1 Nízkotlaká vodní elektrárna

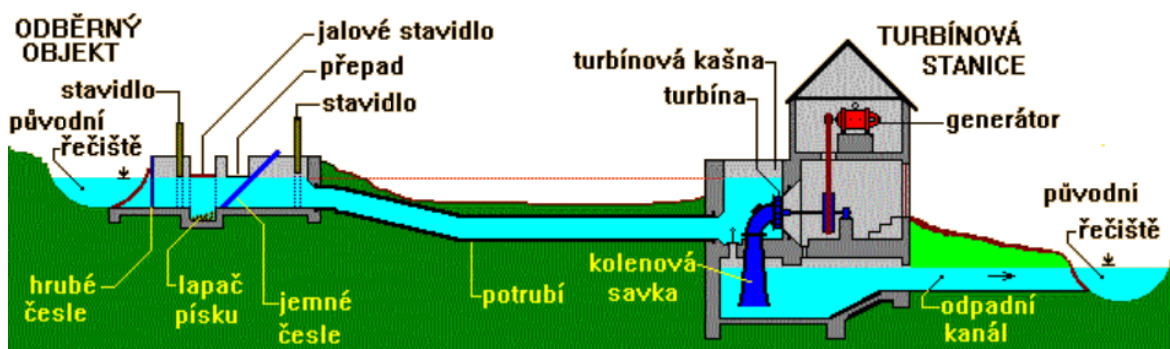
Tento typ elektráren se staví do spádu 20 m. Voda je ke strojovně vedena otevřeným přivaděčem, díky němuž získá větší spád. Po využití energetického potenciálu vody odchází voda do odpadního kanálu, který se dále napojuje opět na řečiště.[3]



Obr. 1.1 Nízkotlaké vodní dílo  
Obrázek převzat z [3]

### 1.3.2 Nízkotlaká vodní elektrárna s tlakovým přivaděčem

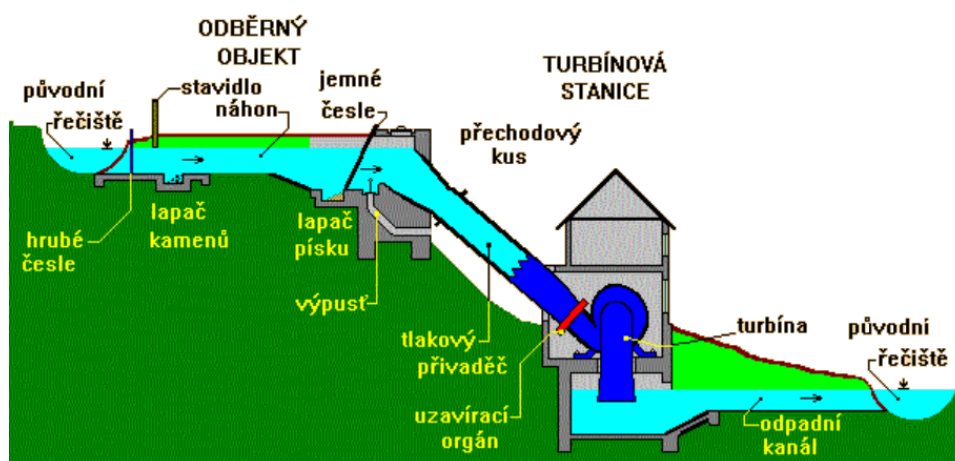
Tento typ elektráren se staví pro spád od 20 do 100 m. Voda je ke strojovně vedena tlakovým přivaděčem. Tlakového přivaděče se využívá, když nelze v terénu vytvořit otevřený přivaděč. Po využití energetického potenciálu vody odchází voda do odpadního kanálu, který se dále napojuje opět na řečiště.[4]



Obr. 1.2 Nízkotlaké vodní dílo s tlakovým přivaděčem  
Obrázek převzat z [4]

### 1.3.3 Vysokotlaká vodní elektrárna

Tento typ elektráren se staví pro spády větší než 100 m. Voda je ke strojovně vedena tlakovým přivaděčem, který je na svém konci regulovaný na menší průměr, čímž vznikne vyšší tlak.



Obr. 1.3 Vysokotlaké vodní dílo  
Obrázek převzat z [5]

## 1.4 Rozdělení podle využití vodního toku

### 1.4.1 Průtočná vodní elektrárna

Tento typ elektráren pracuje bez akumulace vody. Při překročení průtoku vody, na který je elektrárna dimenzovaná, je přebytečná voda nevyužita. Průtočné elektrárny se dělí na derivační a jezové.[1]

#### 1.4.1.1 Derivační vodní elektrárna

U derivační vodní elektrárny je část průtoku vody odvedena derivačním kanálem ke strojovně. Derivačního kanálu se používá, aby se trasa řeky zkrátila. To vede ke vzduť hladiny a získání většího potenciálu vody. Kanálem nelze odvést všechnu vodu daného toku. V přirozeném řečišti stále musí protékat minimální povolené množství vody.



Obr. 1.4 Derivační vodní elektrárna v Olešné



### 1.4.1.2 Jezová vodní elektrárna

Jezová vodní elektrárna je umístěná přímo v jezu vodního díla. Odpadní voda z této elektrárny vytéká přímo do podjezí vodního díla, což je přirozené řečiště daného toku. Díky tomu může za stejného průtoku zpracovat větší množství vody než derivační vodní elektrárna.



Obr. 1.5 Jezová vodní elektrárna v Nadrybech

### 1.4.2 Akumulační vodní elektrárna

Tento typ elektráren pracuje s akumulací vody. Podle způsobu akumulace rozeznáváme elektrárny přehradové a přečerpávací.

#### 1.4.2.1 Přehradová vodní elektrárna

U přehradové vodní elektrárny je vybudovaná přehradní část pro zadržení masu vody, dále je nakládáno s vodou různým způsobem. Vodní elektrárna je obvykle umístěná přímo pod přehradou a pracuje s potenciální a kinetickou energií vody v přehradě. Přehradní voda je často také využita jako zdroj pitné vody pro vodárny a technické vody pro zemědělství.



Obr. 1.6 Přeřadová vodní elektrárna ve Žluticích

#### 1.4.2.2 Přečerpávací vodní elektrárna

Přečerpávací elektrárny slouží jako akumulace energie z jiných zdrojů. Jsou tvořeny dvěma nádržemi vody umístěnými v rozdílné výšce. V části dne, kdy je elektrické energie přebytek, slouží vodní turbína ve strojovně elektrárny jako čerpadlo a čerpá vodu z níže položené nádrže do výše položené. V části dne, kdy je energie nedostatek, slouží turbína jako zdroj. Je využita potenciální energie vody v horní nádrži, která přetéká zpět do spodní.



Obr. 1.7 Přečerpávací elektrárna Dlouhé Stráně  
Obrázek převzat z [6]



### 1.4.3 Slapová vodní elektrárna

Slapové elektrárny ke své funkci využívají změnu vodní hladiny při přílivu a odlivu. Při přílivu proudí voda do zátok a fjordů, naopak při odlivu proudí zpět do moře. V cestě proudící vodě je postavena turbína, která energii proudící vody využívá.



Obr. 1.8 Slapová elektrárna, která se chystá v Británii  
Obrázek převzat z [7]

## 1.5 Přivaděče a odpady

Úkolem přivaděče je dovést vodu k turbíně elektrárny. Úkolem odpadu je odvést vodu od turbíny potom, co předala svou energii turbíně. Při navrhování přivaděčů a odpadů je důležité, aby v nich bylo spotřebováno co nejméně energie. Přivaděče také slouží k soustředění a dosažení většího spádu. Obvykle je snahou navrhovat přivaděče a odpady co nejkratší, protože dlouhé přivaděče odebírají část průtoku a snižují spád a v neposlední řadě zvyšují stavební náklady. [8]

Dělení přivaděčů a odpadů:

- Beztlakové
- Tlakové

### 1.5.1 Beztlakové přivaděče a odpady

Pro malé vodní elektrárny se obvykle navrhuje otevřené kanály, náhony a žlaby. Bývají totiž levnější než tlakové přivaděče. Pro návrh jsou důležité místní podmínky, to je např.

možnost získání pozemků pro přivaděč, výškové a směrové poměry trasy, koeficient vnitřního tření zeminy. Dále je důležité dbát na jejich těsnost, protože uniklou vodu není možné energeticky využít. Častým řešením přivaděče je jeho vedení po vrstevnici, což umožňuje soustředit potřebný spád. Výhodné je budovat přivaděč co nejpříměji, protože se tak vyhneme zvýšením hydraulických ztrát způsobených změnou proudění. Podle empirických zkušeností by oblouk přivaděče neměl mít menší poloměr, než vyjadřuje vzorec:

$$R_{min} = 11 \cdot v^2 \cdot \sqrt{S} + 12 \cdot m \quad (1.2)$$

Kde:

$R_{min}$  – poloměr oblouku vztažený k ose kanálu

$v$  – střední profilová rychlost v oblouku

$S$  – plocha průtočného průřezu v oblouku

$m$  – sklon svahu kanálu

Pro orientační návrh minimálního poloměru lze použít vztah:

$$R_{min} \geq 5 \cdot b \quad (1.3)$$

Kde  $b$  je šířka koryta ve dně.

Pro konstrukci svahů jsou důležité vlastnosti zeminy, ze které jsou svahy budovány. Pro předběžný návrh sklonu svahu, lze použít doporučené hodnoty z tabulek.

Návrh hydraulického profilu kanálu vychází z celého hydraulického obvodu vodní elektrárny. Důležitými parametry jsou například maximální kapacita kanálu nebo průběh hladin při různých provozních stavech. V přívodním a odpadním kanálu se během provozu mohou vyskytnout různé druhy proudění:

- Proudění ustálené rovnoměrné
- Proudění ustálené nerovnoměrné
- Proudění neustálené[8]

### 1.5.1.1 Ustálené rovnoměrné proudění vody

Obvykle bývá výchozím postupem pro řešení hydrauliky přívodního kanálu. Znamená to, že se provede výpočet kanálu za ustálených podmínek, kdy se proudění v kanálu v závislosti na čase nemění. Je charakterizováno stálým průtokem, stálým průtočným

průřezem podél kanálu, konstantními hloubkami vody a konstantním sklonem hladiny, rovnoběžným se sklonem dna. Základní rovnicí ustáleného proudění je tzv. Chézyho rovnice:

$$Q = S \cdot C \cdot \sqrt{R \cdot I} = K \cdot \sqrt{I} \quad (1.4)$$

Kde:

$Q$  – je průtok vody kanálem

$S$  – plocha průtočného profilu

$C$  – rychlostní součinitel

$R$  – hydraulický poloměr ( $R = S/O$ )

$O$  – omočený obvod

$I$  – sklon hladiny

$K$  – modul průtoku

Rychlostní součinitel  $C$  je funkcí povrchu drsnosti kanálu  $n$  a hydraulického poloměru  $R$ , na jeho správném určení závisí správnost celého výpočtu. Vztah pro jeho určení je:

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^y \quad (1.5)$$

Kde:

$n$  – součinitel drsnosti

$y$  – součinitel, který je 1/6 podle Manninga

$C$  – rychlostní součinitel

Přesná hodnota součinitele drsnosti  $n$  se určuje speciálním měřením, avšak u vodních elektráren lze použít hodnoty z tabulky, kde se hodnota pohybuje v mezích od 0,01 do 0,04.

V praxi se nejčastěji využívá lichoběžníkový profil kanálu. Plocha profilu se spočítá:

$$S = h(b + m \cdot h) = h^2(\beta + m) \quad (1.6)$$

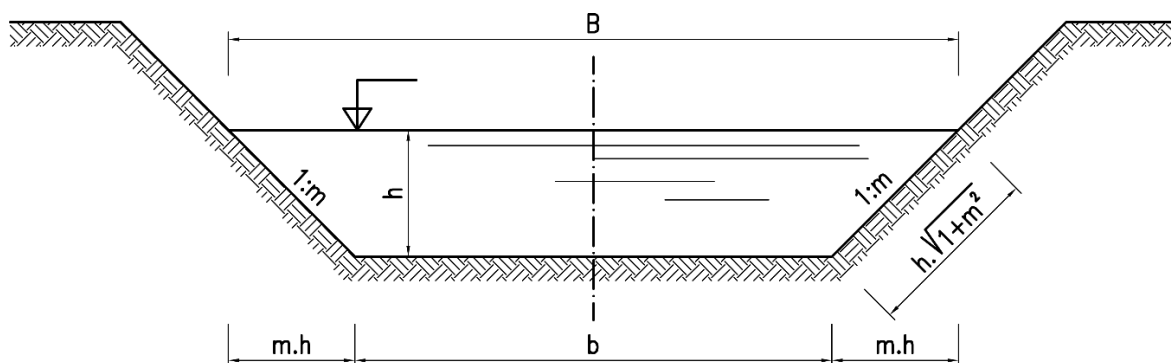
Omočený obvod:

$$O = b + 2h\sqrt{1 + m^2} = h(\beta + 2\sqrt{1 + m^2}) \quad (1.7)$$

Hydraulický poloměr:

$$R = \frac{S}{O} = \frac{h^2(\beta + m)}{h(\beta + 2\sqrt{1 + m^2})} \quad (1.8)$$

Kde  $\beta = b/h$



Obr. 1.9 Schématický příčný řez lichoběžníkovým kanálem

Hydraulicky nejvýhodnější profil musí mít při dané ploše  $S$  minimální omočený obvod  $O$  a maximální hydraulický poloměr  $R$ . Tomu odpovídá poměr:

$$\beta = \frac{b}{h} = 2\sqrt{1+m^2} - m \quad (1.9)$$

$$R_{max} = 0,5 \cdot h \quad (1.10)$$

Nejvýhodnější poměry  $\beta$  pro lichoběžníkové profily jsou uvedeny v tabulce 1.1

Tabulka 1.1

$m$	0,00	0,10	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	2,00	2,50	3,00
$\beta$	2,00	1,81	1,56	1,24	1,00	0,83	0,70	0,61	0,47	0,38	0,32

Jednou variantou pro výpočet plochy kanálu je určení rychlosti proudění tak, aby se střední rychlost proudění vody pohybovala v intervalu mezi maximální a minimální přípustnou rychlostí a byla hospodářsky výhodná. Plocha průtočného kanálu je dána rovnicí:

$$S = \frac{Q}{v} \quad (1.11)$$

Maximální rychlost vody je dána požadavkem na stabilitu dna a svahů kanálu. Nejvýhodnější přípustné rychlosti se volí s ohledem na druh zeminy, prakticky se rychlosti v přívaděcích a odpadech navrhuji v rozmezí 0,7 až 1,5 m.s<sup>-1</sup>.

Minimální rychlost se volí tak, aby se kanál nezanášel unášenými splaveninami. Usazování jílovitých částí představuje poměrně velké nebezpečí, při kterém hrozí postupné zanesení celého kanálu a tím vznik velkých hydraulických ztrát. Jako dostatečné rychlosti proudění vody, při nichž nehrozí zanášení kanálu, se uvádějí rychlosti v rozmezí 0,6 až 0,9 m.s<sup>-1</sup>. [8]

### 1.5.1.2 Ustálené nerovnoměrné proudění vody

Je charakterizováno stálým průtokem, avšak mění se rychlostí podél kanálu. Na začátku kanálu je zdrž s konstantní hladinou  $h_1$  a na konci je vodní elektrárna s proměnným odběrem vody, to znamená, že hladina  $h_2$  před vodní elektrárnou se mění v závislosti na

průtoku. Předpokladem je, že výpočet kanálu pro rovnoměrné proudění byl proveden pro navrhovaný průtok  $Q_p$ . Protože bude průtok celým kanálem stejný, hloubka kanálu na konci bude  $h_2$  rovna  $h_1$ . Jestliže bude průtok kanálem menší než navrhovaný  $Q < Q_p$ , bude  $h_2 > h_1$ . Pokud bude skutečný průtok kanálem větší než navrhovaný  $Q > Q_p$ , bude  $h_2 < h_1$ . Největší hloubka hladiny na konci kanálu nastane při odstavení vodní elektrárny ( $Q=0$ ) a bude:

$$h_2 = h_1 + L \cdot I \quad (1.12)$$

Kde:

$L$  – délka kanálu

$I$  – sklon kanálu

To znamená, že hladina na konci kanálu může vystoupit až nad úroveň břehů. Proto je potřeba vybudovat korunu hráze kolem kanálu vodorovnou nebo umístit před vodní elektrárnu jalový přeliv. Když se při omezení odběru vody elektrárnou hladina  $h_2$  zvýší nad úroveň přelivu, začne přes něj voda přetékat.

S rostoucím průtokem se snižuje hladina  $h_2$ , až dosáhne kritické hodnoty. Další snížení hladiny již není možné, takže při dané hladině  $h_1$  na začátku kanálu, nemůže již větší průtok kanálem protéci. Zejména u dlouhých kanálů se volí navrhovaný průtok o 10 až 15% větší, protože se nelze spoléhat na odhad součinitele drsnosti kanálu. [8]

### 1.5.1.3 Neustálené proudění vody

Je důležité vzít v úvahu proudění vody vznikající při různých přechodných dějích, jako je manipulace s průtokem vody turbínou nebo okamžité vypnutí vodní elektrárny. Při náhlém zastavení průtoku vodní elektrárnou vzniká v přírodním kanálu kladná zpětná vlna, která ve svém čele může zvýšit hladinu nad úroveň břehů a může dojít k vylití vody a porušení břehu samotného. [8]

## 1.6 Vodní turbíny

Vodní turbína je točivý mechanický stroj, který přeměňuje potenciální, tlakovou či kinetickou energii vody na mechanickou energii.

Dělení vodních turbín:

Podle polohy hřídele:

- Horizontální
- Vertikální
- Šikmé

Podle tlaku:

- Rovnotlaké (akční) – k veškeré změně tlaku vody na rychlost dochází již před turbínou
- Přetlakové (reakční) – voda během své cesty turbínou mění svůj tlak

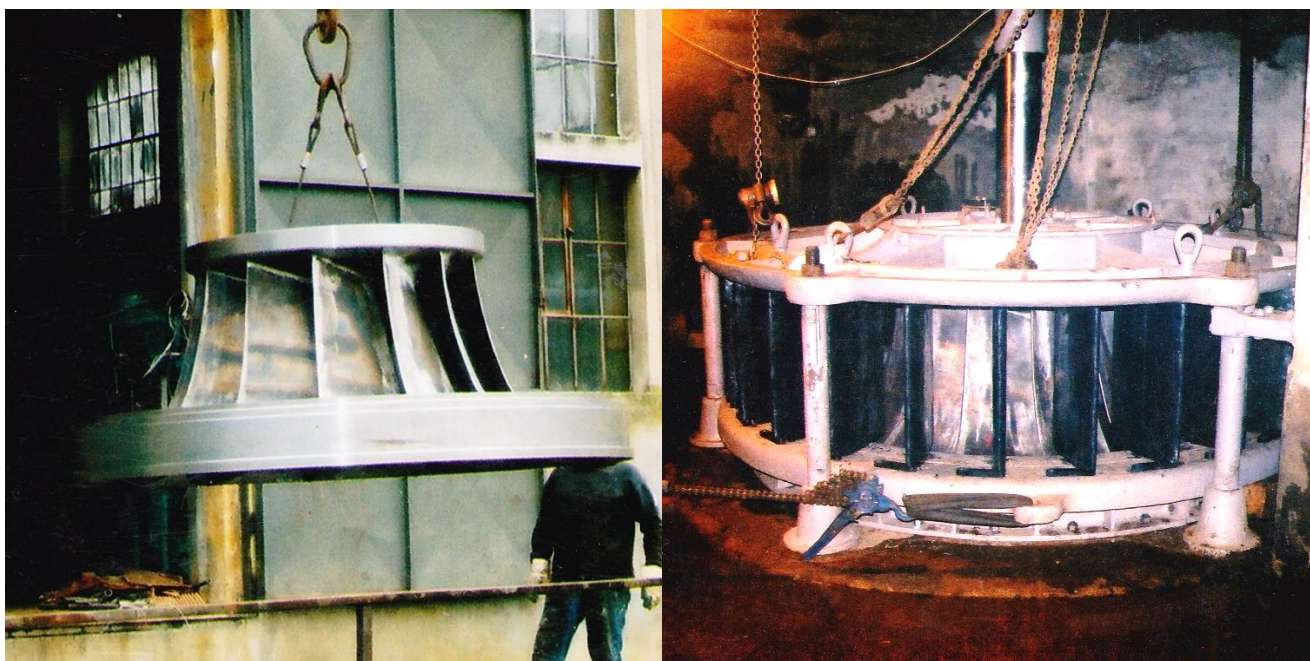
Podle orientace proudění vody:

- Axiální – voda vstupuje do turbíny axiálně a opouští ji axiálně
- Radiální – voda vstupuje do turbíny radiálně a opouští ji radiálně
- Radiálně-axiální – voda vstupuje do turbíny axiálně a opouští ji radiálně
- Tangenciální – voda dopadá na turbínu po tečně neboli tangentě

Dále lze vodní turbíny dělit podle vlastní konstrukce. [9]

### 1.6.1 Francisova turbína

Byla vynalezena Jamesem B. Francistem v roce 1849. Jedná se o přetlakovou turbínu s vertikálním nebo horizontálním uložením. Francisova turbína dnes patří k nevyužívanějším ve světě. Voda do turbíny vstupuje radiálně přes rozváděcí kola, která slouží k regulaci výkonu turbíny, vstupuje do oběžného kola, kterému předává svou energii a opouští oběžné kolo axiálně.



Obr. 1.10a,b Francisova turbína na MVE Darová – a)Oběžné kolo, b) Rozváděcí kolo



### 1.6.2 Kaplanova turbína

Byla vynalezena Viktorem Kaplanem v roce 1912. Jedná se o přetlakovou turbínu, voda vstupuje do turbíny axiálně a opouští ji axiálně. Rozváděcí lopatky statoru jsou podobná jako u Francisovy turbíny. Výhodou této turbíny jsou regulovatelné lopatky na oběžném kole, což umožňuje velice dobrou regulaci. Využívá se v místech, kde nelze zajistit stálý průtok nebo spád.



Obr. 1.11 Kaplanova turbína na MVE Nadryby

### 1.6.3 Peltonova turbína

Byla vynalezena Lesterem A. Peltonem v roce 1880. Jedná se o rovnotlakou turbínu, voda proudí tryskou a dopadá tečně na lopatky turbíny. Po obvodu může být nainstalováno větší množství trysek. Lopatky turbíny mají lžičkovitý tvar. Peltonova turbína se používá pro vysoký spád.



Obr. 1.12 Peltonova turbína s pěti tryskami  
Obrázek převzat z [10]

#### 1.6.4 Bánkiho turbína

Byla vynalezena Donátem Bánkim v roce 1917. Jedná se o přetlakovou turbínu. Voda vstupuje do turbíny radiálně a opouští ji také radiálně, znamená to tedy, že lopatky oběžného kola jsou obtékány ve dvou směrech, při každém průtoku odevzdá část své energie. Pro svou jednoduchou konstrukci se stala oblíbenou volbou amatérských zhotovitelů, kdy dosahuje dobré účinnosti.[8]



Obr. 1.13 Bánkiho turbína na MVE Nadryby

#### 1.6.5 Archimedův šroub

Tato turbína, jinak nazývána šneková turbína, byla popsána před více jak 2000 lety řeckým vynálezcem Archimedelem ze Syrakus. Původně se využívala jen jako čerpadlo, v posledních letech však nachází své uplatnění v hydroenergetice. Jedná se o přetlakovou axiální turbínu. Celý šnekový mechanismus je uložen v korytě náhonu pod úhlem  $20^{\circ}$ - $30^{\circ}$  a je roztáčen silou vyvolanou tíhou protékající vody.[11]



Obr. 1.14 Šnekové turbíny na MVE Kaceřov

## 1.7 Převody

Převody jsou u malých vodních elektráren z hlediska funkčnosti velice důležité. U velkých soustrojí se otáčky generátoru navrhují přímo na otáčky hřídele turbíny. U malých vodních elektráren je obvykle jako generátor použit asynchronní generátor s poměrně velkými jmenovitými otáčkami, například pro osmipólový stroj jsou jmenovité synchronní otáčky 750 ot/min. Je tedy nutné vhodným převodem upravit pomalé otáčky turbíny na potřebné rychlé otáčky generátoru. Na převody jsou kladeny vysoké požadavky – provozní spolehlivost, dlouhá životnost, vysoká účinnost. [8]

Druhy převodů:

- Ozubený převod
- Řemenový převod
- Řetězový převod

### 1.7.1 Ozubený převod

Tento převod se používá u většiny nízkospádových vodních elektráren. Podle druhu ozubení se rozlišují zuby přímé, šikmé a šípové. Na druhu ozubení závisí účinnost celkového převodu, která je okolo 97 %. [8]

### 1.7.2 Řemenový převod

Patří k nejrozšířenějším převodům. Nejčastěji se vyrábí z uhlíkových nebo polyamidových vláken. Z konstrukčního hlediska je lze rozdělit na řemeny ploché, klínové a ozubené.

Nejčastěji využívané jsou klínové řemeny, které jsou však náročnější na přesnou výrobu. Při provozu se řemeny postupně protahují, a proto je nutné vždy měnit celou sadu řemenů. Účinnost se pohybuje okolo 98 %.[8]

### 1.7.3 Řetězový převod

Jedná se o nejúspornější možnost z hlediska potřebného místa pro realizaci. Pro převodová ústrojí se používají řetězy jednořadé a víceřadé. Účinnost převodu je až 98,5 %, se špatným mazáním a při malém počtu zubů však klesá. [8]

## 1.8 Elektrický generátor

Elektrický generátor slouží k výrobě elektrické energie. Mechanická energie přenášená na hřídeli turbíny je v generátoru přeměněna na energii elektrickou. Tedy až zde probíhá vlastní výroba elektrické energie. Ve vodních elektrárnách se nejčastěji používají generátory, které vyrábí střídavé elektrické veličiny. Rozlišujeme generátor synchronní a asynchronní.

### 1.8.1 Synchronní generátor

Synchronní generátory jsou takřka výhradními zdroji elektrické energie ve velkých elektrárnách. U současně vzniklých malých vodních elektrárnách se s ním málokdy setkáme, jelikož je spojen se složitou regulací a tím i vyšší pořizovací cenou a provozními náklady. Naopak se s nimi často můžeme setkat při rekonstrukci starých MVE. Hlavním důvodem byla možnost provozu elektrárny nezávisle na provozu napájecí sítě. [8]

### 1.8.2 Asynchronní generátor

Asynchronní generátor se nikterak neliší od běžného asynchronního motoru, který každý známe například z cirkulárky apod. Jednotlivé asynchronní generátory se liší výkonem, počtem jmenovitých otáček, provedením statorového a rotorového vinutí.

Výhodou použití asynchronních generátorů je jednoduchý postup připojení k napájecí síti. Stačí roztočit generátor pomocí turbíny lehce nad hodnotu jmenovitých otáček a poté přímo připojit generátor k síti.

Nevýhodou asynchronního stroje je vysoký odběr jalové energie z napájecí sítě, který je třeba kompenzovat. [8]

### 1.8.3 Kompenzace jalového výkonu

Pro zlepšení přenosových poměrů v síti je rozvodnými závody předepisováno povinné kompenzování jalového odběru asynchronního generátoru o výkonu vyšším jak 35 kW.

K tomu, aby byla ve stroji přeměněna mechanická práce na činnou složku elektrické energie, musí vzniknout i jalová složka, která je nezbytná pro vznik magnetického pole stroje. Rozvodná zařízení se tedy musí dimenzovat na hodnotu zdánlivého proudu. Spotřeba jalové energie v blízkosti induktivního stroje výrazně sníží zdánlivý proud v přívodním vedení. Pro kompenzování jalového výkonu se nejčastěji používá paralelní připojení kompenzačního zařízení. Nejčastěji to mohou být:

- Kondenzátorové baterie
- Synchronní kompenzátory
- Aktivní filtry

## 2 Historie Libštejnského mlýna

V podhradí hradu Libštejn, na břehu řeky Berounky stával mlýn. Dějiny tohoto mlýna jsou úzce spjaty s hradem Libštejnem a proto stáří původního mlýna je značné. Samotný hrad byl založen kolem roku 1360 a je pravděpodobné, že zanedlouho byl postaven i první mlýn u řeky.

V květnu roku 1430 vtrhli do zdejší krajiny Táboři a Sirotci, aby oblehli hrad Libštejn. Po neúspěšném obléhání vojska odtáhla od hradu a zanechala za sebou jenom spoušť, v té době byl vypálen i mlýn.

V roce 1516 vlastnili společně Libštejn a mlýn bratři Jan a Bernart, bratři z Valdštejna. Když se potom synové Jana z Valdštejna dělili o majetek, nalézají se zmínka „o mlýně pod zámekem na 3 kola a kus řeky“.

Dle zápisu v urbáři panství Zbirožského z roku 1652 je patrné, že řádění žoldáckých tlup v době třicetileté války bylo značné a mlýn opět přišel k velké újmě.

Tento mlýn byl obnoven až v roce 1726, kdy zde královská komora postavila mlýn o 4 složení a stoupu. V roce 1734 byl mlýn pronajat Matěji Černému ze Zbirohu. V roce 1735 strhly ledové kry jez u tohoto mlýna. Královská komora následkem toho zakoupila pozemky proti mlýnu a postavila zde nový jez. Roku 1767 prodala královská komora Kašparu Benediktovi Ledeburovi Podlibštejnský mlýn o čtyřech složení a stoupu.

V roce 1895 je na mlýně mlynář Václav Šott. V tomto roce byl postaven šikmo stojící, pevný, přepadový jez. Voda vzedmutá jezem přitékala ke žlabům, v prvním žlabu visela dvě vodní mlýnská kola a ve druhém žlabu jedno mlýnské kolo na spodní vodu. Těmito koly se hnala tři mlýnská složení.

2. září 1932 bylo uděleno povolení ke stavbě turbíny a přitom byla provedena výměna vodních kol za Francisovu horizontální turbínu. Mlýn byl v držení mlynáře Václava Šotta.

Po 2. světové válce byly ve mlýně instalovány dvě mlýnské stolice, nová reforma a další úpravy. Tyto úpravy však nebyly v činnosti dlouho, neboť mletí na mlýně skončilo, tak jako v jiných mlýnech v padesátých letech.

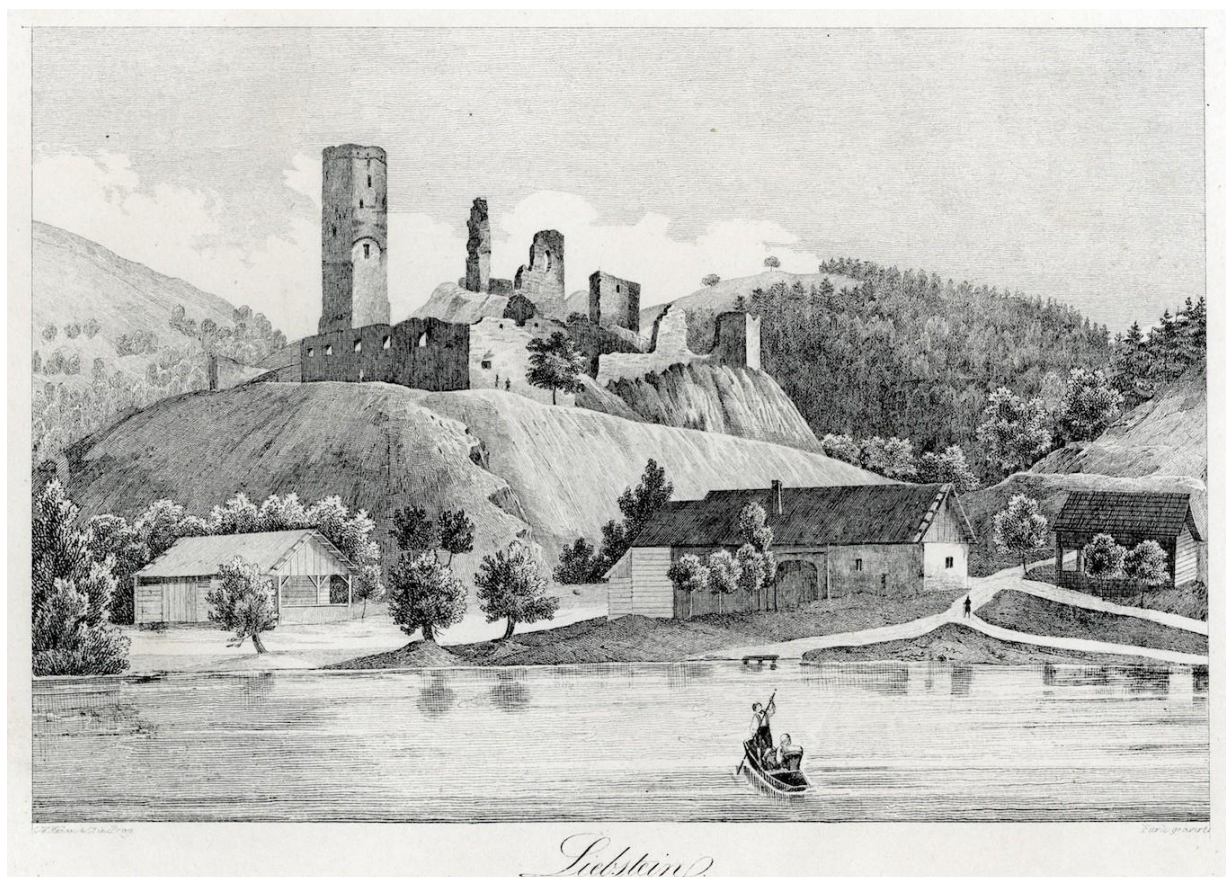
Když v roce 1953 Václav Šott, jakožto poslední mlynář na Podlibštejnském mlýně zemřel, ujal se mlýnské usedlosti jeho syn Vilém Šott, který na mlýně pouze soukromě hospodařil až do roku 1971.

Poslední majitel mlýna Vilém Šott prodal později tuto mlýnskou usedlost Úpravám uhlí Vřesová. Tato organizace však objekt dlouho nevlastnila. Po třech letech zaplavila velká



voda tento vybudovaný objekt a organizace prodala rekreační středisko Okresnímu průmyslovému podniku Rokycany.

Při úpravách byl rozbořen i starý mlýn a zůstala zde pouze turbína, která byla později spolu s jezem odkoupena za účelem výroby elektrické energie.[12]



**Obr. 2.1 Historická fotografie hradu Libštejn a přilehlých stavení (rok 1884)**  
Obrázek převzat z [13]

### 3 Současný stav Libštejnského mlýna

Vodní dílo leží na vodním toku Berounka na km řeky 105,79. Bývalý Libštejnský mlýn sestává z pevného jezu, který v délce 175 m přehrazuje šikmo tok Berounky a vzdouvá vodu o 1,7 až 2 m. Vlastní konstrukce jezu je kamenná a byla na ní provedena oprava se zřízením stabilizační stěny ze štětovic Larsen a ze železobetonových železničních pražců, čímž byla dosažena stabilizace celého objektu. Do samotného jezu je vestavěná malá vodní jezová elektrárna, zvaná MVE 2, která spolu s derivační elektrárnou, zvanou MVE 1, využívá průtok v Berounce do maximálního povoleného množství  $7 \text{ m}^3/\text{s}$  k výrobě elektrické energie. Derivační elektrárna MVE 1 stojí v objektu původní turbíny na pravém břehu řeky, kde odbočuje krátký náhon ústící do tohoto objektu a poté přechází do odpadního koryta, které ústí zpět do Berounky 520 m pod jezem. V MVE 1 je po provedení opravy osazena původní Francisova turbína horizontální konstrukce. MVE 2 je schválená jezová elektrárna, která byla provozována od kolaudace v r. 1996 do povodně v srpnu 2002. Po této povodni byla vystavěná ochranná zeď v délce 15 m k zabránění dalších následných škod při povodni a v nánosů bylo prokopáno odpadní koryto nezbytné pro provoz této elektrárny. Tímto je dnes převáděna voda z nadjezí do podjezí až po 60 m. V MVE 2 jsou osazeny dvě Bánkiho turbíny, technologická zařízení obou Bánkiho turbín jsou umístěna ve vodotěsné kobce, takže nehrozí nebezpečí zaplavení nebo jiného ohrožení zařízení.[14]



Obr. 3.1 Pohled na lokalitu Libštejnský mlýn



### 3.1 Derivační elektrárna MVE1

Objekt elektrárny je situován na pravém břehu řeky Berounky. Je přímo osazen na vtoku do náhonové části. Rozměry stavební části objektu jsou 6,6 x 5,6 m. Před vtokem jsou umístěna dvě stavidla, pravé je hlavní a levé je jalové. Turbína v objektu je původní Francisova horizontální turbína s průměrem oběžného kola 1600 mm, která zde byla nainstalována v roce 1932. Celá turbína byla v roce 1989 kompletně repasovaná. Hltnost turbíny je 5,0 m<sup>3</sup>/s a spád hladin je 1,7 m. Vyvedení výkonu hřídele je přes dva stupně převodů otáček na hřídel asynchronního generátoru. První převod je realizován pomocí ozubeného převodu za použití převodovky ze starého autobusu Škoda 706 RTO s převodovým poměrem 1:3. Druhý převod je realizován pomocí sady pěti klínových řemenů s převodovým poměrem 1:2,8. První řemenice je osazena na výstupu z převodovky a druhá řemenice je osezena na hřídeli generátoru. V průběhu let se generátor několikrát vyměnil za jiný typ, zvolený hlavně na základě dostupnosti. Jmenovité otáčky generátoru byly vždy voleny 750 ot/min, jednalo se tedy vždy o osmipólové asynchronní stroje. Vyvedení výkonu generátoru je přes rozvaděč RHMVE1, kde se nachází příslušné jištění, spínací a ochranné prvky pro provoz elektrárny. Následuje elektroměrový rozvaděč, kde provádí společnost ČEZ odečet dodané energie do napájecí sítě. Ve vzdálenosti 30 m od tohoto rozvaděče je umístěn transformátor 0,4/22kV, který vyvedenou energii dále přenáší ke spotřebě. V únoru roku 2020 došlo k vážnému poškození turbíny v objektu MVE1, kdy se oddělilo celé oběžné kolo Francisovy turbíny od hřídele a následně spadlo do výtokové savky. Z důvodu již dávno vypršelé životnosti celé stavby bylo rozhodnuto, že se původní technologie objektu MVE1 opravovat nebude a vytvoří se návrh rekonstrukce pro lepší využití energetického potenciálu této oblasti. To znamená, že v současné době je derivační elektrárna MVE1 mimo provoz.



Obr. 3.2 Budova MVE1



Obr. 3.3 Rozvaděče technologie MVE1+MVE2



Obr. 3.4 Převody MVE1



Obr.3.5 Generátor MVE1



Obr. 3.6 Turbína MVE1



Obr. 3.7 Rozebraná turbína MVE1

### 3.2 Jezová elektrárna MVE2

Objekt elektrárny MVE2 je vestavěn do opravené pravé části jezu cca 20 m od pravobřežní opěrné zdi jezu. Objekt má dvoukomorovou konstrukci a každé pole má světlost 2,0 m. Jsou zde instalovány dva kusy Bánkiho turbín o průměru 800 mm a délce 2 m. Hltnost turbín je  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$  a spád hladin je 2,0 m. Před turbínami jsou osazena dvě stavidla, která se ovládají zároveň pomocí jedné hřídele umístěné na ovládacím motoru. Technologická zařízení obou Bánkiho turbín jsou umístěna ve vodotěsné kobce. Obě turbíny jsou spojeny a jejich výkon je vyveden přes dva převodové stupně na hřídel asynchronního generátoru. První stupeň je tvořen ozubeným převodem za použití zdvihací převodovky z elektrického důlního bagru UNEX E303. Převodový poměr převodovky je 1:4. Druhý převodový poměr je tvořen sadou šesti klínových řemenů s převodovým poměrem 1:3. Druhá řemenice řemenového převodu je osazena přímo na hřídeli generátoru. Asynchronní generátor se podobně jako u MVE1 v průběhu let měnil, a to hlavně z důvodu spálení statorového vinutí.



Vždy byl zvolen typ na základě dostupnosti s co největší podobností štítkových údajů. Současně instalovaný generátor je od firmy MEZ Frenštát se synchronními otáčkami 750 ot/min a jmenovitým výkonem 75 kW. Vyvedení elektrického výkonu z generátoru jde do rozvaděče RHMVE2, který je umístěn v objektu MVE1 vedle RHMVE1. Zde se nachází příslušné jištění, spínací a ochranné prvky pro provoz elektrárny. Součástí tohoto rozvaděče je zároveň skříň RJMVE2, která slouží ke kompenzaci jalového výkonu pomocí kondenzátorových baterií. Dále je veden výkon stejně jako u MVE1, tzn. přes elektroměrový rozvaděč k transformátoru a dále ke spotřebě.



Obr. 3.8 Budova MVE2



Obr. 3.9 Generátor MVE2



Obr. 3.10 Převody MVE2



Obr. 3.11 Turbína MVE2

### 3.2.1 Teoretický výkon MVE2

Teoretický elektrický výkon celého objektu MVE2 lze spočítat použitím rovnice (1.1)

$$P = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H \cdot \mu \quad (3.1)$$

Kromě účinnosti turbíny je třeba vzít v úvahu účinnost převodových stupňů a účinnost generátoru a zahrnout ji do výsledné účinnosti.

Účinnost Bánkiho turbíny závisí na plnění stroje, což je poměr mezi aktuálním průtokem vody a jmenovitým průtokem, na který je turbína navržena. Energetická účinnost turbíny se pohybuje mezi 70 – 85 %, pro výpočet zvolme  $\mu_T = 80 \% = 0,8$ .

Účinnost převodových stupňů je uvedena v kapitole 1.7. Pro ozubený převod je  $\mu_Z = 97 \% = 0,97$  a pro řemenový převod je  $\mu_{\text{ř}} = 98 \% = 0,98$ .

Účinnost asynchronního generátoru je obvykle uváděna na štítku stroje a vztahuje se ke jmenovitému výkonu motoru, s klesajícím výkonem klesá i účinnost přeměny mechanické energie na elektrickou. Pro stroje o výkonu okolo 70 kW se udává účinnost mezi 85 - 94 %, pro výpočet zvolíme  $\mu_G = 90 \% = 0,9$ .

Po dosazení do rovnice (3.1) získáme vztah:

$$P_{el} = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H \cdot \mu_T \cdot \mu_Z \cdot \mu_{\text{ř}} \cdot \mu_G \quad (3.2)$$

Kde:

$\rho$  – hustota vody - 1000 l/m<sup>3</sup>

$Q$  – průtok – 2,0 m<sup>3</sup>/s

$g$  – tíhové zrychlení – 9,81 m.s<sup>-2</sup>

$H$  – spád hladin – 2,0 m

$$P_{el} = 1000 \cdot 2 \cdot 9,81 \cdot 2 \cdot 0,8 \cdot 0,97 \cdot 0,98 \cdot 0,9 = 26,86 \text{ kW} \quad (3.3)$$

Výpočet je prováděn pro jmenovitý průtok a spád. Při zvýšení průtoku v řece Berounce se horní hladina zvýší, tím pádem se zvýší i spád hladin a průtok turbínou. Ve výsledku to znamená zvýšení vyvedeného výkonu z generátoru.

### 3.2.2 Náklady spojené s provozem MVE2

Téměř veškeré úkony spojené s provozem této elektrárny jsou potřeba dělat ručně. Spuštění a připojení elektrárny k napájecí síti probíhá tak, že se musí ručním ovládním otevřít hlavní stavidla. K připojení k síti dojde automaticky ve chvíli, kdy se otáčky generátoru dostanou do nadsynchronního stavu, to vyhodnotí instalované fázovací relé od firmy Hydrohrom HSN 02, které sepne hlavní stykač a přifázuje generátor k síti. Jemná

regulace průtoku turbínou je možná nastavit ručně pomocí uzavírání hlavních stavidel. Jediný úkon, který se v elektrárně děje automaticky, je odpojení generátoru od napájecí sítě a uzavření hlavních stavidel. K takové situaci může dojít při poruchách v napájecí síti, například při bouřce nebo silném větru, nebo při poklesu výkonu generátoru, kdy se generátor dostane do motorického chodu, což je nejčastěji způsobeno zanášením česlí.

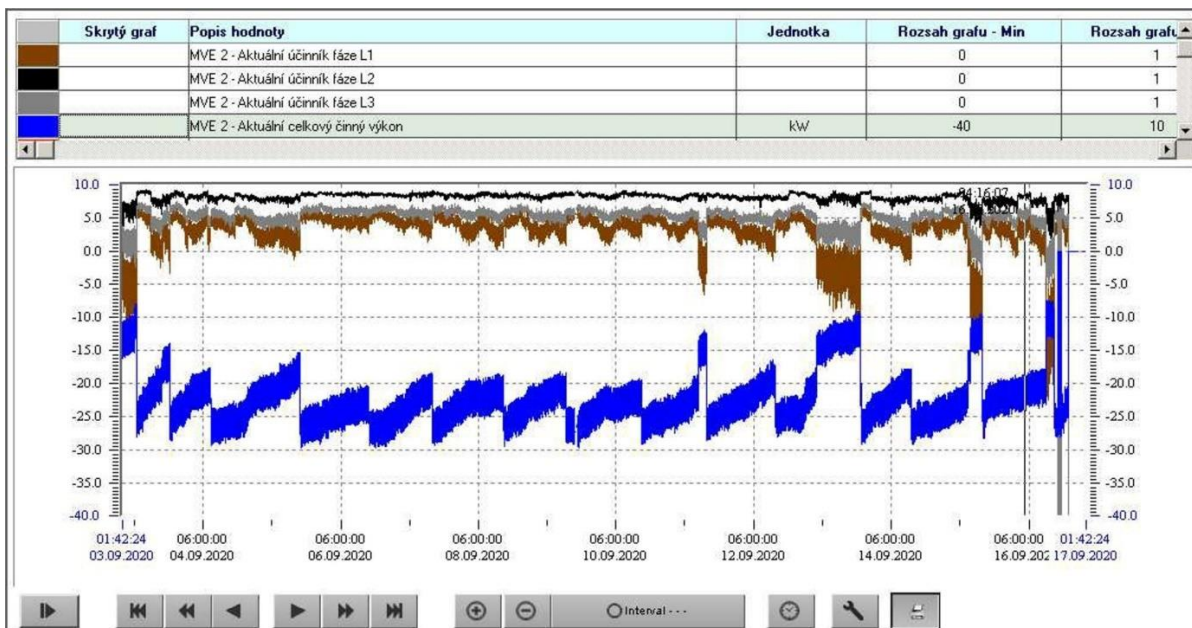
Zanášení česlí a s ním spojené čištění představuje nejvyšší položku v nákladech spojených s provozem. Elektrárna nedisponuje automatickým čištěním česlí, proto je třeba česle čistit ručně. V letních a zimních měsících je potřeba provést vyčištění česlí každé 2 až 3 dny. V jarních a pozimních měsících je ale potřeba toto čištění provádět častěji. Hlavně na podzim, kdy z listnatých stromů opadá velké množství listů, je třeba čistit česle každý den a ani to někdy nestačí. Vzhledem k tomu, že oba soukromí majitelé bydlí od lokality elektrárny více než 25 km, je s náklady na čištění spojen čas strávený na cestě, čas hrabání, který je závislý na míře zanešení česel a pohybuje se od 10 do 50 minut, cena paliva a v neposlední řadě amortizace dopravního prostředku.

Další dodatečné náklady jsou spojeny s nečekanými opravami strojního zařízení jako jsou například nové klínové řemeny, výměna vadných částí elektroinstalace apod.

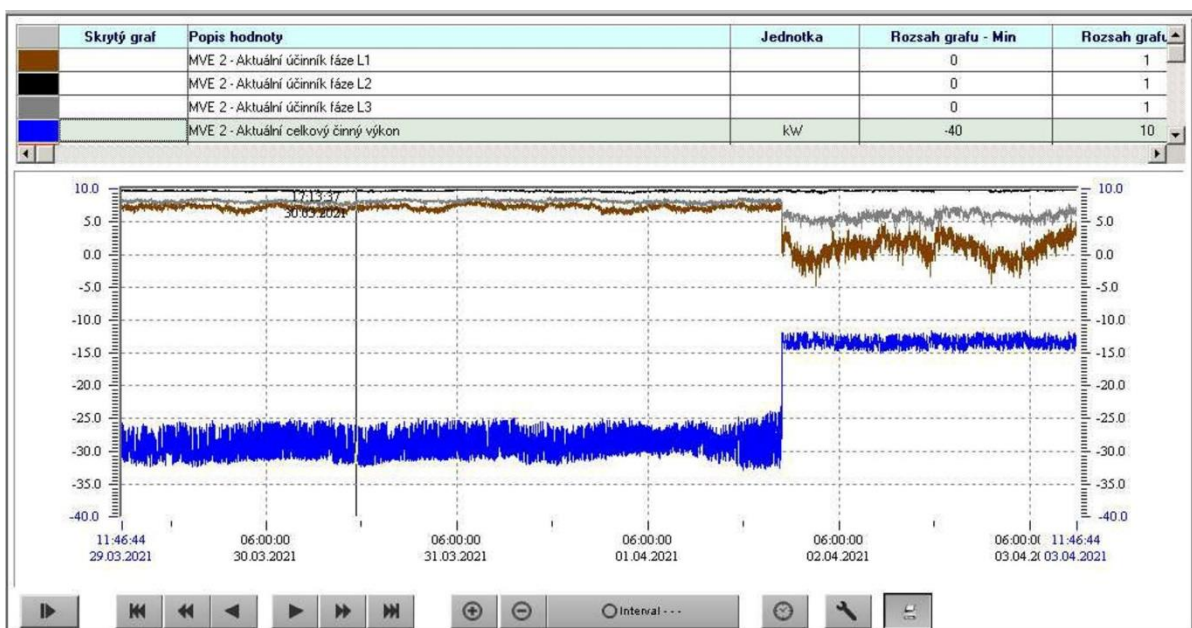
### 3.2.3 Reálný výkon MVE2

V hlavním rozvaděči RHMVE2 je nainstalovaný přístroj, který měří okamžité komplexní hodnoty proudů a napětí vystupujících z generátoru. Toto zařízení dále dopočítává hodnoty činných, jalových a zdánlivých výkonů, a dále účinníky v jednotlivých fázích generátoru. Získané hodnoty jsou v reálném čase přenášeny do stolního počítače umístěného vedle hlavního rozvaděče a jsou vizualizovány ve vytvořené aplikaci. K tomuto počítači lze vzdáleně přistoupit a tím vyhodnotit, zda je potřeba nějak zasáhnout ohledně provozu elektrárny. Jak už bylo zmíněno v kapitole (3.2.2), každý akční zásah do provozu je třeba uskutečnit osobně na místě elektrárny.

Z grafu lze vyhodnotit zanešení česel, které je spojeno s postupným snížením výkonu, zobrazeno na obrázku obr.3.12. Dále lze vyhodnotit rázové poruchy, kterými může být přetržení spojky turbín a další vážnější závady, při kterých je potřeba okamžitá osobní účast na elektrárně a detailní identifikace problému. Větší závadu lze vidět na obr.3.13, kde došlo k rázovému snížení výkonu.



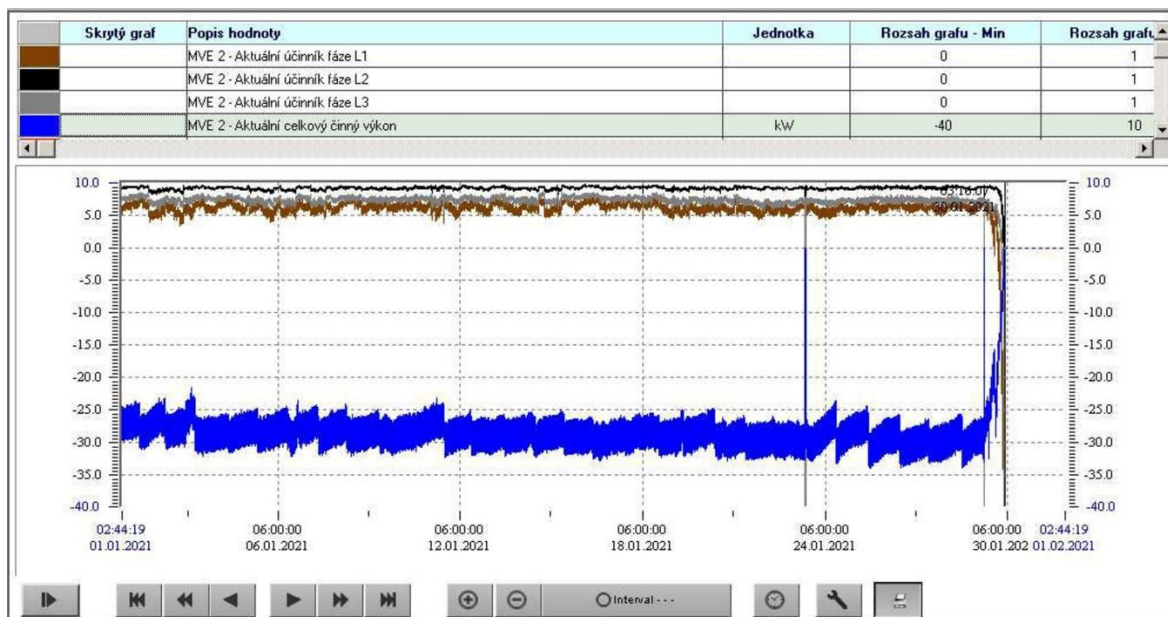
Obr.3.12 Každodenní zanášení česlí, které je názorné z vizualizace okamžitých průběhů elektrických veličin



Obr.3.13 Čas rázové poruchy, kdy došlo k přetržení spojky Bánkiho turbín

Z grafu lze také orientačně odečíst reálný činný výkon dodávaný generátorem k porovnání s teoretickým výpočtem (3.3). Z obr. 3.14, který zaznamenává průběh výkonu od 1.1.2020 do 1.2.2020 je maximální výkon okolo  $P_{el} = 32$  kW. Důvod tohoto vyššího výsledku je spojen se srážkově nadprůměrným měsícem, kdy se hladina řeky zvýšila a tím se zvýšil spád hladin a průtok turbínou.





Obr.3.14 Průběh výkonu ve srážkově nadprůměrném měsíci

### 3.2.4 Předpověď hladiny řeky

Pro provoz elektrárny je výhodné znát aktuální stav průtoku v řece, ale i předpověď průtoku několik dní dopředu. Při klesání průtoku v řece je třeba elektrárnu včas odstavit, aby bylo dodrženo minimální hladiny vody v nadjezí. Naopak při velkých srážkách předpověď ukáže, že průtok v řece bude stoupat do mezí, kdy je potřeba přijmout některá protipovodňová opatření.

Pro informace o aktuálním průtoku a předpovědi průtoku je použita veřejně přístupná vizualizace na internetových stránkách Českého hydrometeorologického ústavu.



Obr.3.15 Vizualizace z CHMI

## 4 Návrh rekonstrukce

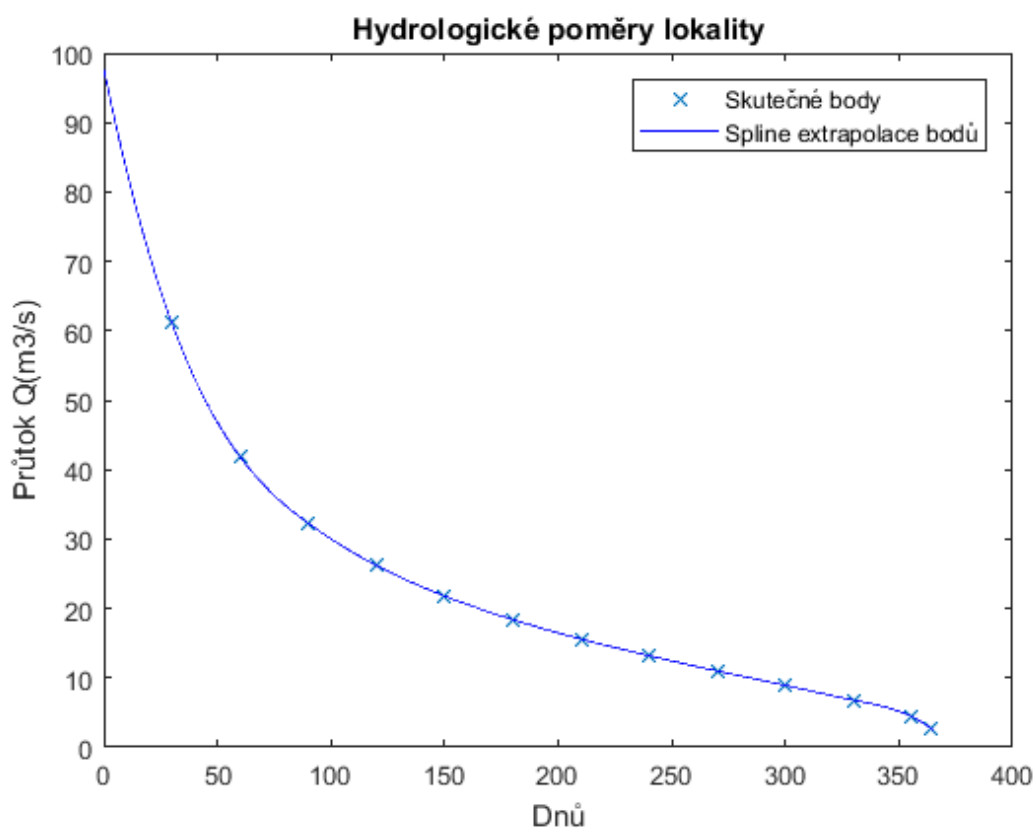
Při návrhu rekonstrukce je důležitým parametrem energetický potenciál dané lokality, který je dán hlavně množstvím průtoku vody a čistým spádem na turbínovém stroji. Dále schopností tuto energii přeměnit na elektrickou s co největší účinností a transportovat ji ke spotřebiteli.

### 4.1 Energetický potenciál lokality

Množstevní průtok v jednotlivých lokalitách zpracovává na základě statistických informací za dobu posledních dvaceti nebo sedmdesáti let Český hydrometeorologický ústav. Jedná se o veřejně přístupnou informaci, která je pro řeku Berouнку a lokalitu Libštejnský mlýn ř.km 105,79 dána tabulkou 4.1. Tabulka je vyobrazena na grafu obr.4.1.

Tabulka 4.1

Dnů	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
Q(m <sup>3</sup> /s)	61,1	41,8	32,3	26,2	21,8	18,4	15,6	13,2	11	8,93	6,8	4,51	2,76



Obr. 4.1 Hydrologické poměry lokality



Manipulace s vodou probíhá na základě vodohospodářského povolení, které vydává příslušný úřad a udává maximální množství odebírané povrchové vody za dodržení sanačního průtoku. Sanační průtok je množství vody, které musí neustále přetékat přes jez, za předpokladu, že v aktuální okamžik takový průtok v řece je. Pro danou lokalitu odpovídá sanační průtok 355-ti denní vodě, tj.

$$Q_{\text{Berounka}} = Q_{\text{san}} = 4,51 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.1)$$

V kapitole (1.4.1.2) je zmíněno, že vzhledem k faktu, že odpadní voda jezové elektrárny vytéká přímo do podjezí vodního díla, což je přirozené řečiště daného toku, lze průtok jezové elektrárny  $Q_{\text{MVE2}}$  zahrnout do sanačního průtoku. Potom platí:

$$Q_{\text{Berounka}} = Q_{\text{san}} + Q_{\text{MVE2}} = Q_{\text{san}} + 2,00 = 4,51 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.2)$$

$$Q_{\text{san}} = Q_{\text{Berounka}} - Q_{\text{MVE2}} = 4,51 - 2,00 = 2,51 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.3)$$

Maximální povolené množství odebírané povrchové vody odpovídá na základě informací od příslušného úřadu a majitelů nově vzniklých malých vodních elektráren na stejném toku se stejnými hydrologickými poměry 140-ti denní vodě, tj.

$$Q_{\text{max}} = Q_{140} = 23 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.4)$$

Celkový energetický potenciál lokality je dán průtokem vody nad sanačním průtokem, který je povoleno využít k přeměně na elektrickou energii, plus energii přeměněnou v MVE2, jejíž průtok spadá do sanačního průtoku. Množství energie MVE2 je možné dopočítat z rovnice (3.3).

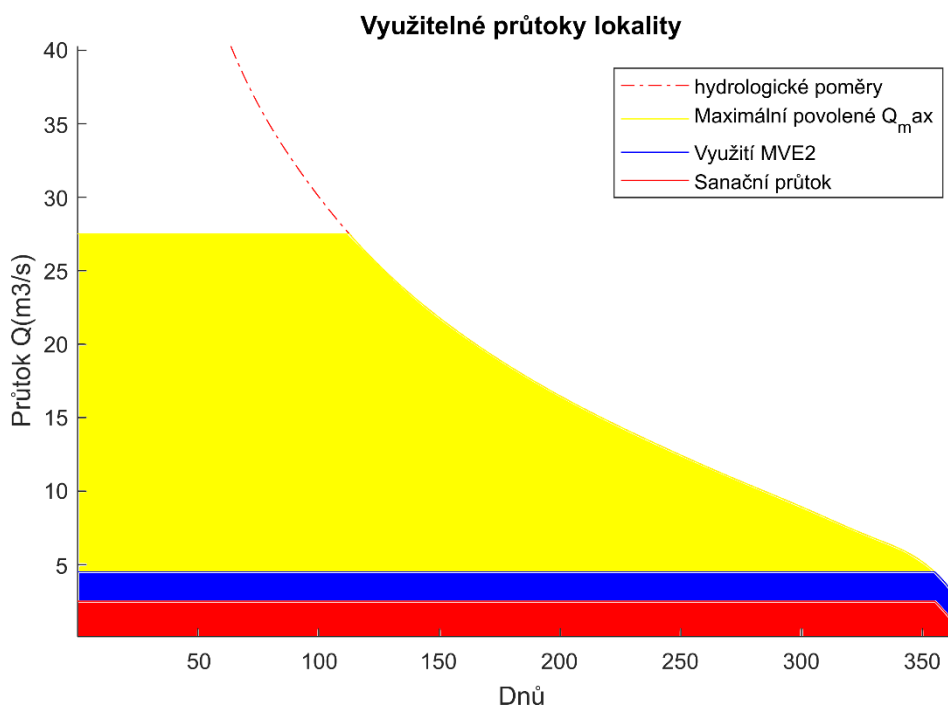
Na obrázku obr.4.2 je žlutě vyznačený potenciál průtoku, který lze dále využít, aniž by došlo k překročení povoleného maximálního průtoku. Pro výpočet tohoto množství energie lze využít vztah:

$$W_{\text{žlutá}} = \rho \cdot g \cdot H \cdot 24 \cdot \int_0^{365} \text{Žlutá\_výpň} \, dt \quad (4.5)$$

Žlutá\_výpň lze z grafu určit pomocí numerické integrace. Velkost spádu závisí na umístění daného vodního díla a pro výpočet použijí hodnotu  $H = 3 \text{ m}$ .

Po dosazení zjistíme energetický potenciál dané lokality, která lze ještě využít.

$$W_{\text{žlutá}} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 3 \cdot 24 \cdot 4.996,3 = 3,529 \text{ GWh/rok} \quad (4.6)$$



Obr. 4.2 Využitelné průtoky lokality

## 4.2 Volba vodní turbíny

Pro volbu turbíny lze použít vlastní výpočet na základě vstupních informací, jako jsou jmenovitý průtok, čistý spád. Druhým způsobem je použít typizovanou vodní turbínu pracující na vstupních parametrech od dodavatele na našem trhu. Výhodou druhého řešení je fakt, že dostaneme funkční turbínu ověřenou roky vývoje a zkušeností.

Pro dodavatele vodní turbíny byla zvolena firma ZIROMONT s.r.o., která působí na českém trhu již od roku 1992. Firma navrhuje, vyrábí a dodává vodní turbíny typu Kaplan v přímoproudém uspořádání s diagonálním rozváděcím kolem a axiálním oběžným kolem. Jsou navrhovány pro spády 2-10 m a hlnosti 0,4-10,5 m<sup>3</sup>/s a dosahují výkonu 15-500 kW. Tyto turbíny mohou být dodávány plně automaticky regulovatelné, částečně regulovatelné nebo pouze za klidu ručně přestavitelné.[15]

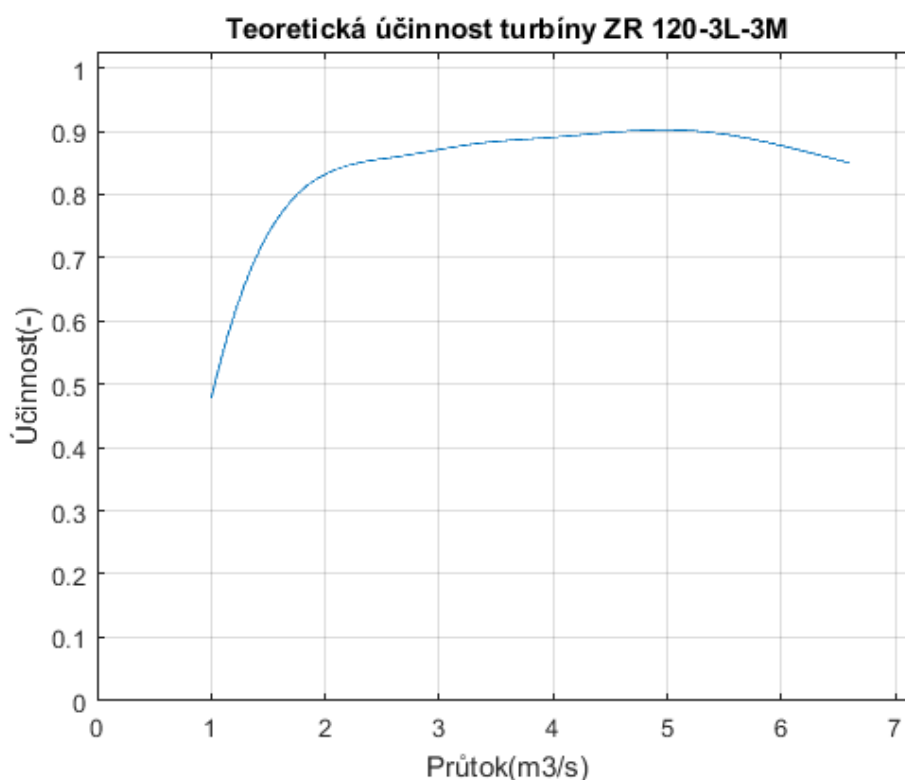
Pro aplikaci je vybrána vodní turbína ZR 120-3L-3M s plně automatickou regulací, která je zajištěna samostatným hydraulickým agregátem. Havarijní zavírání turbíny je gravitační. Přenos výkonu z hřídele turbíny na hřídel generátoru je uskutečněn násobným řemenovým převodem pracujícím v uzavřené řemenové komoře.

Pro vybranou turbínu a spád  $H = 3$  m jsou k dispozici jmenovité hlnosti, které jsou uvedeny v tabulce 4.2.

**Tabulka 4.2**

$Q_{\min}$	$1 \text{ m}^3/\text{s}$
$Q_{\text{opt}}$	$5 \text{ m}^3/\text{s}$
$Q_{\max}$	$6,6 \text{ m}^3/\text{s}$

Pokud tabulku 4.2 aplikujeme na průběh účinnosti Kaplanovy turbíny v závislosti na plnění stroje uvedené v [8], dostaneme graf na obr.4.3. Tento graf je již korigován pro malé turbíny, kdy účinnost od optimální hltnosti k nižším je o 1 – 3% menší. Od optima až k maximální hltnosti se účinnosti téměř shodují.

**Obr. 4.3 Teoretická účinnost ZR 120-3L-3M**

Pro aplikaci jsou zvoleny tři takovéto vodní turbíny s maximální celkovou hltností:

$$Q_{\text{celk}} = 3 \cdot Q_{\text{max}} = 3 \cdot 6,6 = 19,8 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.7)$$

### 4.3 Volba generátoru

Pro volbu generátoru je využito internetového nástroje Siemens Configurators, ve kterém je možné sledovat výkonové charakteristiky, charakteristiky účinnosti a průběhy účinníku pro jednotlivé generátory a tím vybrat nejvhodnější generátor.

Vstupní parametry pro výběr generátoru jsou synchronní otáčky stroje, tj:

$$n_s = 1000 \text{ ot/min} \quad (4.8)$$

A maximální mechanický výkon na hřídeli generátoru:

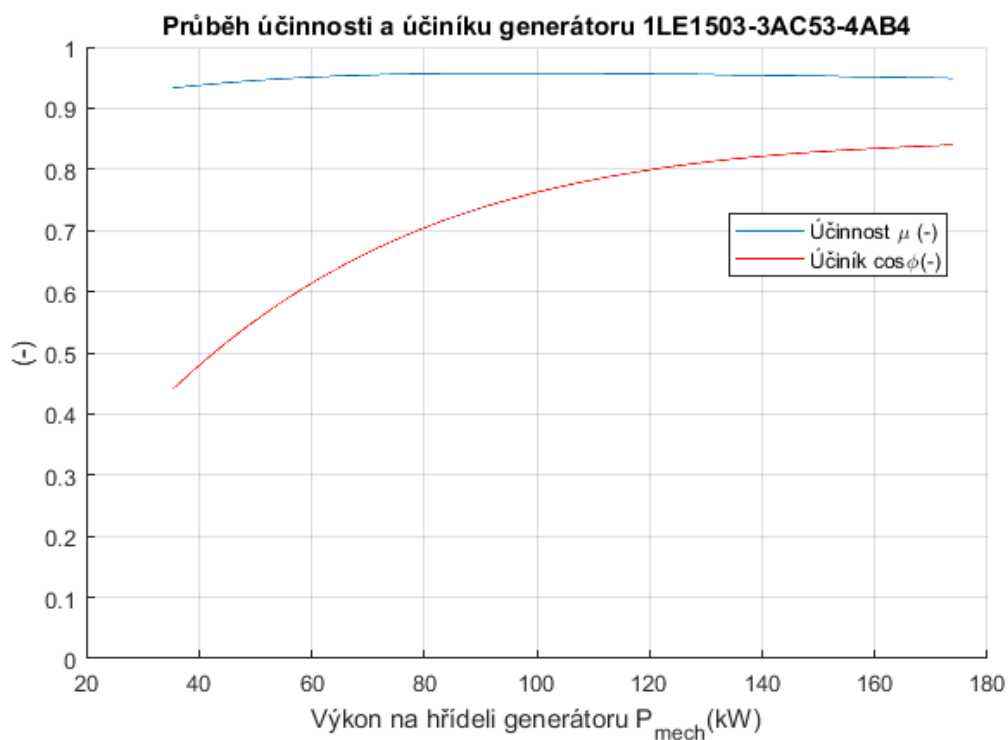
$$P_{mech,max} = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H \cdot \mu_T \cdot \mu_R = 1000 \cdot 6,6 \cdot 9,81 \cdot 3 \cdot 0,85 \cdot 0,98 = 161,8 \text{ kW} \quad (4.9)$$

Na základě vstupních parametrů je vybrán generátor Siemens 1LE1503-3AC53-4AB4 s parametry uvedenými v tabulce 4.3

**Tabulka 4.3 parametry generátoru Siemens 1LE1503-3AC53-4AB4**

Jmenovitý výkon	$P_{n,el}$	132 kW
Maximální výkon	$P_{max,el}$	165 kW
Jmenovitá účinnost	$\mu_n$	0,954
Účíník při $P_n$	$\cos \varphi_n$	0,82
Jmenovité otáčky	$n_n$	1008 ot/min

Generátor s menším jmenovitým výkonem byl vybrán hlavně z důvodu průběhu účinníku stroje, který je vidět na grafu obr.4.4. Účíník stroje se se snižující zátěží stroje snižuje a je třeba ho více kompenzovat. Větší stroj by měl horší průběh účinníku v pracovní oblasti vodní turbíny. Na grafu obr.4.4 je znázorněna účinnost a účíník generátoru v závislosti na mechanickém výkonu.



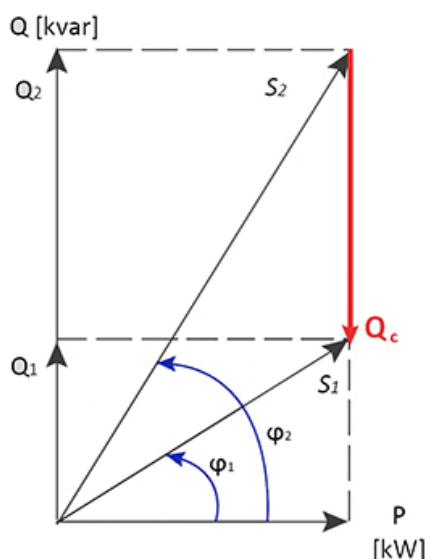
**Obr. 4.4 Průběh účinnosti a účinníku generátoru 1LE1503-3AC53-4AB4**

#### 4.4 Volba kompenzačního kondenzátoru

Jak již bylo uvedeno v kapitole (1.8.3), kompenzace jalového výkonu je velice důležitá z pohledu zatěžování přívodního vedení. Asynchronní generátor pro svou funkci vytváří kromě činného výkonu také jalový výkon, který již podle názvu nekoná žádnou práci a navíc zatěžuje přívodní vedení, slouží tedy jen pro správnou funkci generátoru. Tento výkon je potřeba v blízkosti generátoru vyrovnat připojením opačně orientovaného prvku, než je indukčnost generátoru. K tomu účelu slouží kondenzátorové baterie.

Samotnou kompenzaci popisuje příslušná norma, která hovoří o nutnosti kompenzace účinníku na hodnoty v pásmu 0,95 – 0,98 induktivního charakteru.

Na obr.4.5 je vidět, jak velká musí být kompenzace, abychom docílili potřebného účinníku.



Obr. 4.5 Fázorový diagram výkonů

Pro výpočet je důležité zvolit požadovanou hodnotu účinníku. Pro možnou rezervu v návrhu je zvolena hodnota:

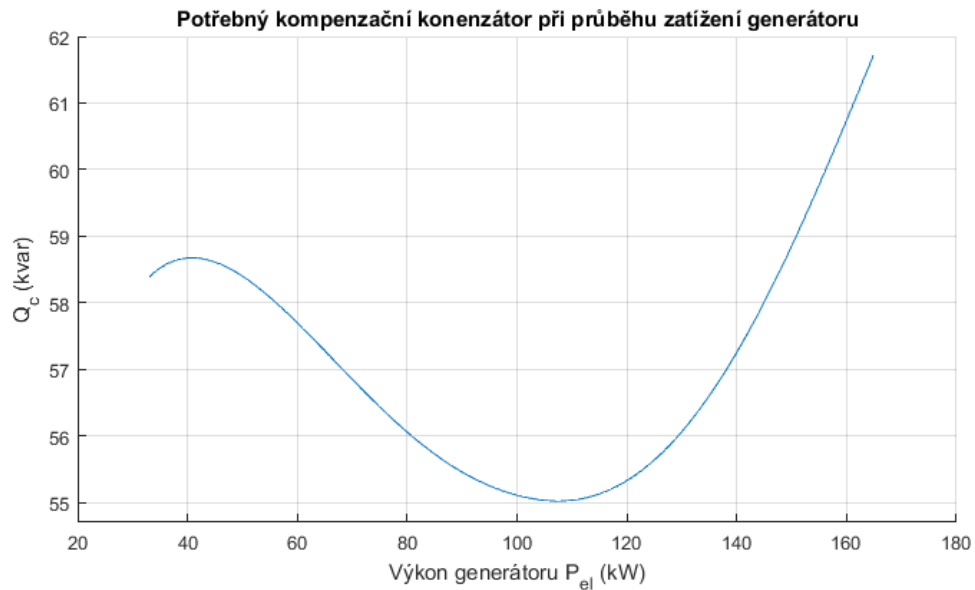
$$\cos \varphi_{\text{poz}} = 0,965 \quad (4.10)$$

Pro návrh kompenzačního kondenzátoru lze využít vzorec (4.11) který je dále potřeba aplikovat na průběh účinníku zvoleného generátoru.

$$Q_c = P_{el} \cdot (tg(\varphi_2) - tg(\varphi_1)) \quad (4.11)$$

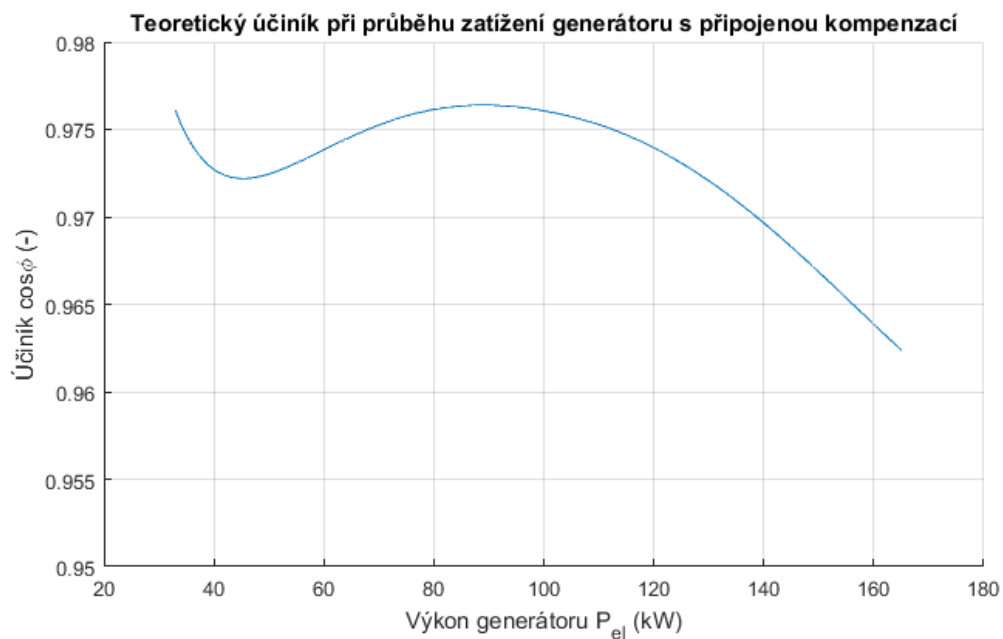
$$Q_{c,i} = P_{el,i} \cdot (tg(\arccos(\cos \varphi_i)) - tg(\arccos(\cos \varphi_{\text{poz}}))) \quad (4.12)$$

Na grafu obr.4.6 je znázorněný potřebný kompenzační kondenzátor při průběhu zatížení generátoru.



**Obr. 4.6 Návrh kompenzačního kondenzátoru**

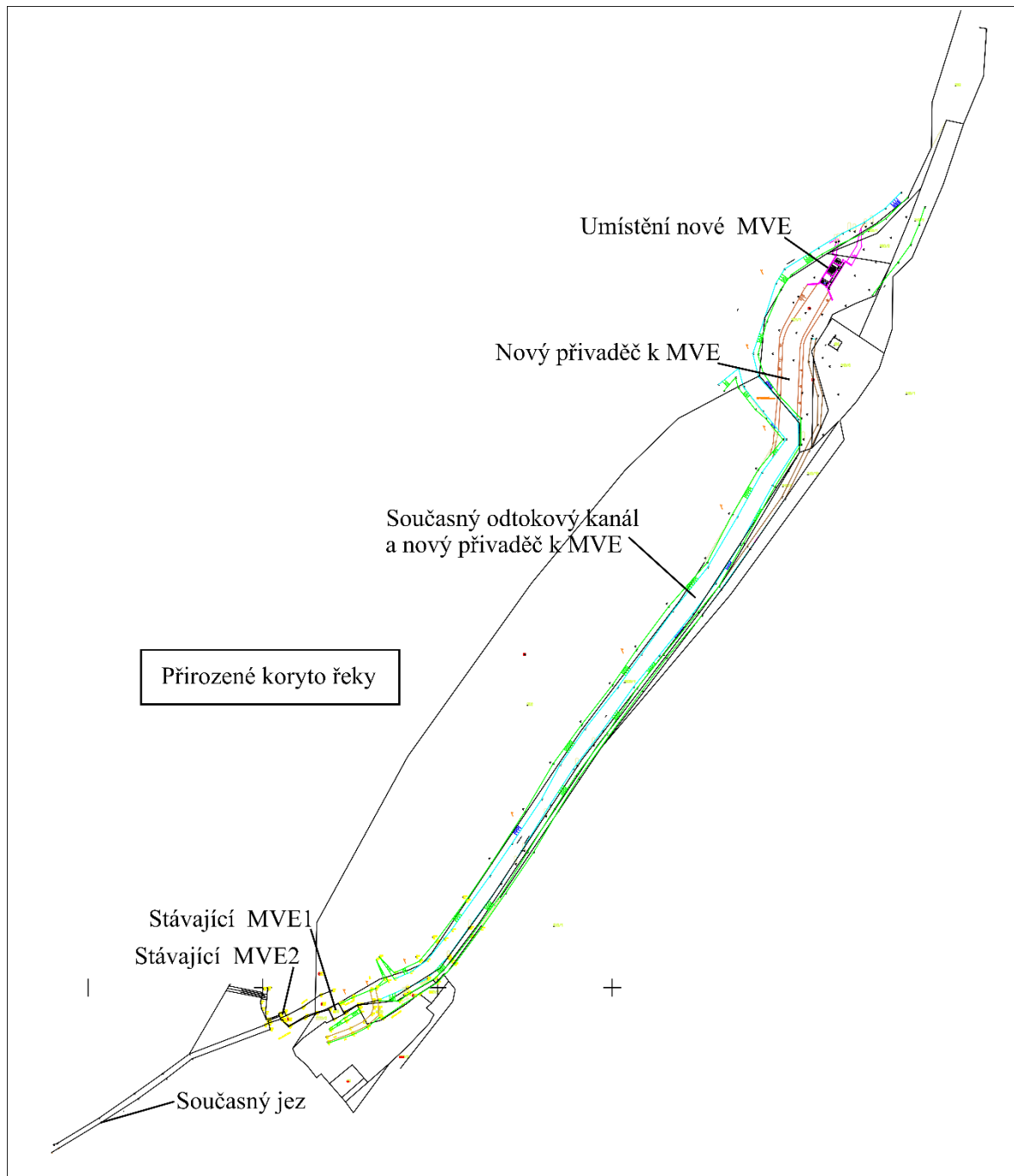
Pro aplikaci jsou zvoleny kondenzátory od firmy KBH energy. Pro každý generátor tři kusy kondenzátoru Fortis II MKP 20,0kvar/400V. Na grafu obr.4.7 je znázorněný teoretický průběh účinníku generátoru s připojenými kompenzačními kondenzátory.



**Obr. 4.7 Průběh účinníku generátoru s připojenou kompenzací**

#### 4.5 Umístění nového objektu MVE

Záměrem je využít odtokový kanál MVE1 o délce cca 380 m a dále tento kanál prodloužit o cca 120 m a přesunout výrobu el. energie z MVE1 na konec vzniklé derivace. Tím dojde k navýšení spádu a zvýšení výroby el. energie.



Obr. 4.8 Situace umístění nové MVE

## 4.6 Úprava vodního přivaděče

Vtok do vodního přivaděče naváže na stávající objekt MVE1, kde se odstraní původní technologie a objekt se upraví pro průtok patřičného množství vody. Nový vodní přivaděč bude tvořit stávající odtokový kanál a jeho prodloužení; stávající kanál se pouze vyčistí a upraví. V místech, kde bude hladina vody dosahovat úrovně břehů, se břehy navýší násypem.

Základním parametrem pro návrh vodního přivaděče je maximální rychlost proudící vody, která je s ohledem na kapitolu (1.5.1.1) zvolena:

$$v_{max} = 0,65 \text{ m/s} \quad (4.13)$$

Dalším parametrem je maximální průtok vody, který bude přivaděčem protékat. Tvoří ho maximální hltnost tří navrhovaných turbín navýšená o 10%, protože se nelze spoléhat na odhad součinitele drsnosti kanálu, jak je uvedeno v kapitole (1.5.1.3).

$$Q_{max,p} = Q_{max} \cdot 3 \cdot 1,1 = 6,6 \cdot 3 \cdot 1,1 = 21,8 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.14)$$

Ze zadaných parametrů lze spočítat potřebnou plochu průtočného kanálu:

$$S = \frac{Q_{max,p}}{v_{max}} = \frac{21,8}{0,65} = 33,54 \text{ m}^2 \quad (4.15)$$

Pro sklon svahu, lze využít doporučené sklony neopevněných svahů z literatury [8].

$$m \in 1 \div 1,5 \quad (4.16)$$

Zvoleno:

$$m = 1 \quad (4.17)$$

Hloubka přivaděče je zvolena na základě místního měření:

$$h = 2,65 \text{ m} \quad (4.18)$$

Rozměr spodní hrany profilu se spočte:

$$b = \frac{S}{h} - m \cdot h = \frac{33,54}{2,65} - 2,65 = 10 \text{ m} \quad (4.19)$$

Omočený obvod:

$$O = b + 2 \cdot h \cdot \sqrt{1 + m^2} = 10 + 2 \cdot 2,65 \cdot \sqrt{2} = 17,5 \text{ m} \quad (4.20)$$

Hydraulický poloměr:

$$R = \frac{S}{O} = \frac{33,54}{17,5} = 1,92 \text{ m} \quad (4.21)$$

Rychlostní součinitel  $C$  je funkcí drsnosti povrchu kanálu  $n$ , který je na základě literatury [8] pro zemní kanály:

$$n = 0,03 \quad (4.22)$$

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^y = \frac{1}{0,03} \cdot 1,92^{\frac{1}{6}} = 37,16 \quad (4.23)$$



Modul průtoku:

$$K = S \cdot C \cdot \sqrt{R} = 33,54 \cdot 37,16 \cdot \sqrt{1,92} = 1\,727 \quad (4.24)$$

Sklon dna se určí vyjádřením z Chézyho rovnice (1.4):

$$I = \left( \frac{Q_{max,p}}{K} \right)^2 = \left( \frac{21,8}{1727} \right)^2 = 1,6 \cdot 10^{-4} \quad (4.25)$$

Při délce přivaděče:

$$L_{pk} = 500m \quad (4.26)$$

Je rozdíl hladin:

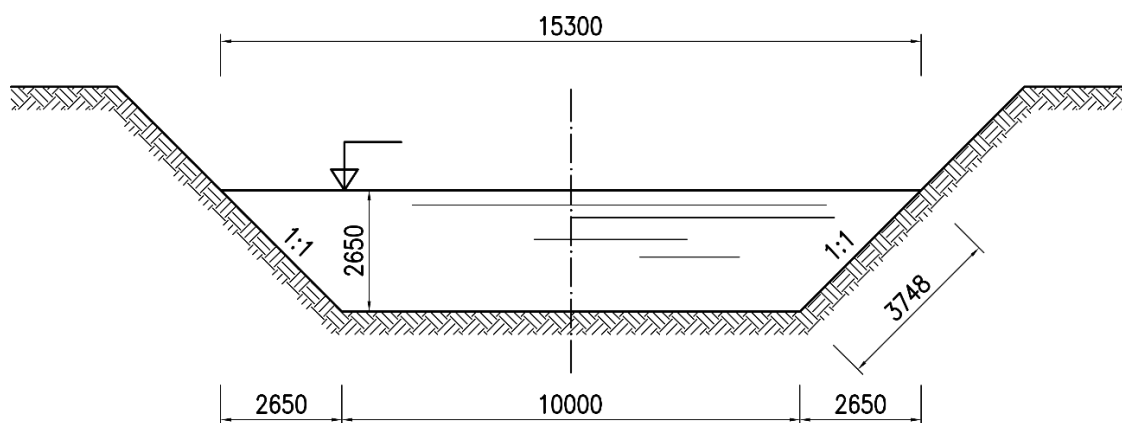
$$\Delta h = I \cdot L_{pk} = 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot 500 = 8 \text{ cm} \quad (4.27)$$

Je třeba také řešit zaklesnutí vodní hladiny před elektrárnou, kterou řeší tzv. depresní křivka:

$$\Delta z = \frac{v_{max}^2 \cdot L_{pk}}{C^2 \cdot R} = \frac{0,65^2 \cdot 500}{37,16^2 \cdot 1,92} = 8 \text{ cm} \quad (4.28)$$

Měřením bylo zjištěno, že rozdíl hladin ve vtokové části MVE1 a hladiny řeky ve výtokové části navrhované MVE je  $H_m = 3,6 \text{ m}$ . Avšak díky hydraulickým ztrátám na přivaděči, ztrátám na jemných česlech, ztrátám zapříčiněným změnami sklonu dna a profilu kanálu lze uvažovat, že čistý spád nově navrhované elektrárny bude:

$$H = 3 \text{ m} \quad (4.29)$$



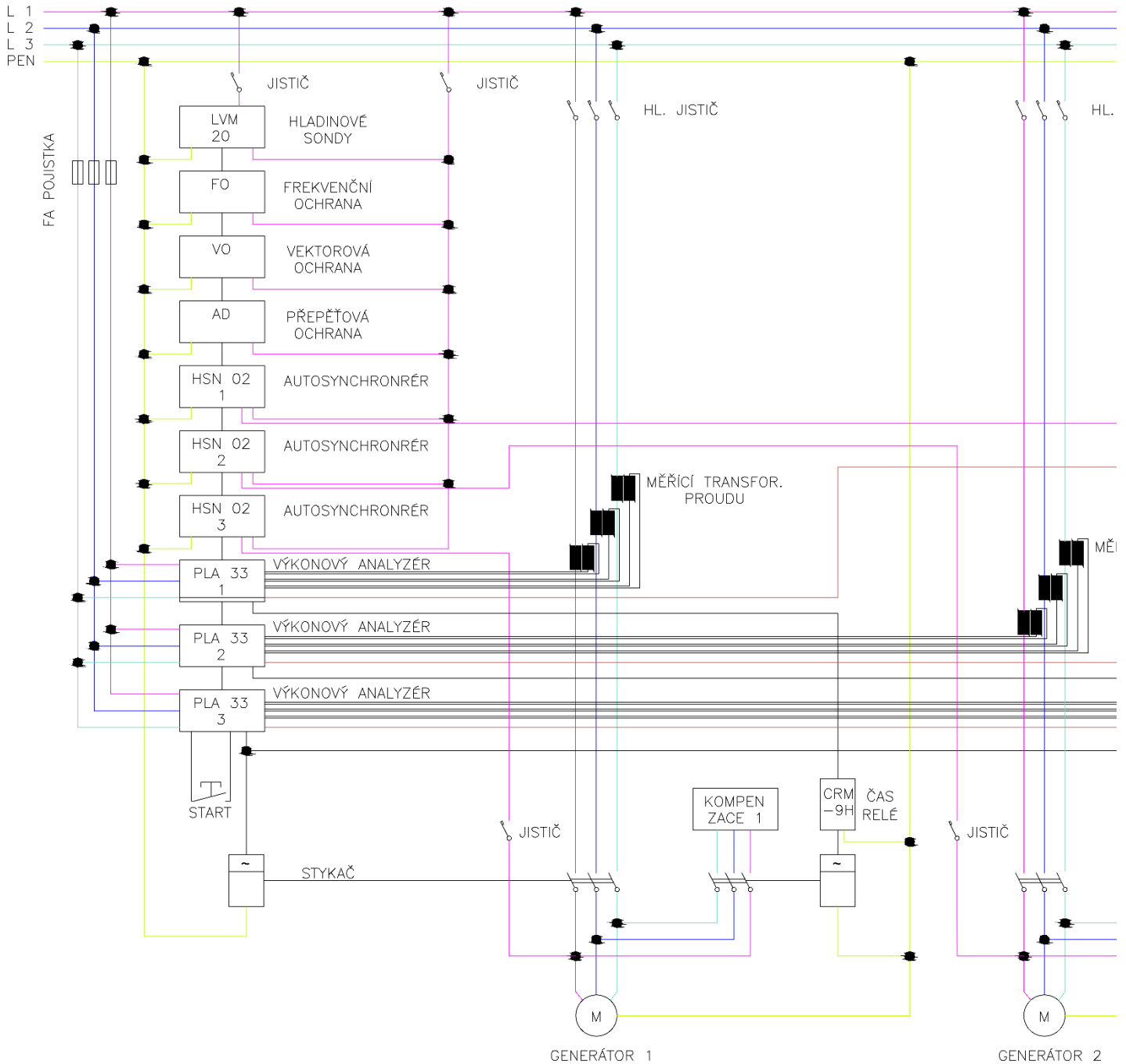
Obr. 4.9 Schématický příčný řez vodního přivaděče s kótami

## 4.7 Objekt MVE

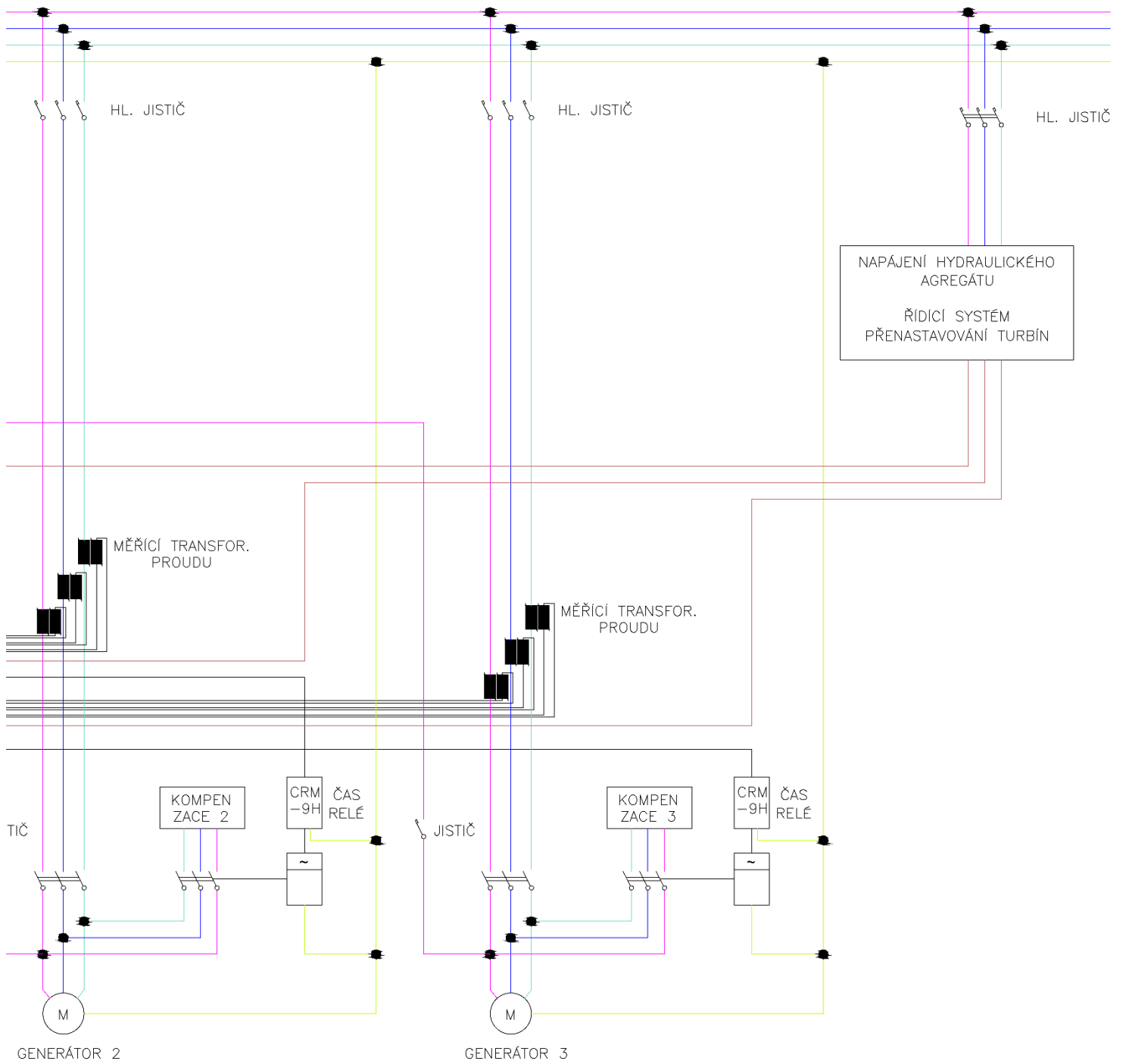
Objekt MVE je navržen jako podzemní stavba s vystupující betonovou částí do výšky cca 1 m nad terén. Tato část slouží jako vstup do strojovny. Objekt je ve spodní části tvořen železobetonovou stavbou, kde je uložena technologie. Součástí objektu je jalová výpusť. Vtok na turbíny je opatřen jemnými česlemi s automatickým čištěním.

### 4.8 Elektrické schéma

Elektrické schéma řeší nutné ochrany zpětných vlivů na napájecí síť, připojení asynchronních generátorů a napájení ovládání vodních turbín k přenastavení podle aktuálního průtoku.



Obr. 4.10 Elektrické schéma 1. část



Obr. 4.11 Elektrické schéma 2. část

#### 4.9 Vyvedení elektrického výkonu

Pro vyvedení výkonu z nově vzniklé elektrárny je potřeba vybudovat novou elektrickou NN přípojku. Vzdálenost přípojky je od současného transformátoru u objektu MVE1 k nově vzniklé MVE, tj.:

$$L_{kp} = 520 \text{ m} \quad (4.30)$$

Maximální přenášený výkon je dán instalovaným výkonem nově vzniklé MVE a je předpokládáný:

$$P_i = 3 \cdot 165 \cdot 10^3 = 495 \text{ kW} \quad (4.31)$$

Pro návrh potřebného kabelu je potřeba spočítat maximální elektrický proud, který musí každá žíla kabelu přenést. V úvahu je potřeba vzít i jalový výkon, který je dán účinnkem generátoru v kapitole (4.4):

$$I_{max} = \frac{P_i}{m_f \cdot U_{gen} \cdot \cos\varphi} = \frac{495 \cdot 10^3}{3 \cdot 400 \cdot 0,96} = 430 \text{ A} \quad (4.32)$$

Kde:  $m_f$  je počet fází generátoru.

Podle tabulky výrobce kabelů [16] není v dostupné nabídce kabel, který by byl zatížitelný na  $I_{max}$ . Je potřeba vybudovat přípojku ze dvou paralelně vedených kabelů. Pro aplikaci je vybráný kabel AYKY 3x185+95, který má maximální proudovou zatížitelnost pro uložení v zemi:

$$I_{max,kab,1} = 313 \text{ A} \quad (4.33)$$

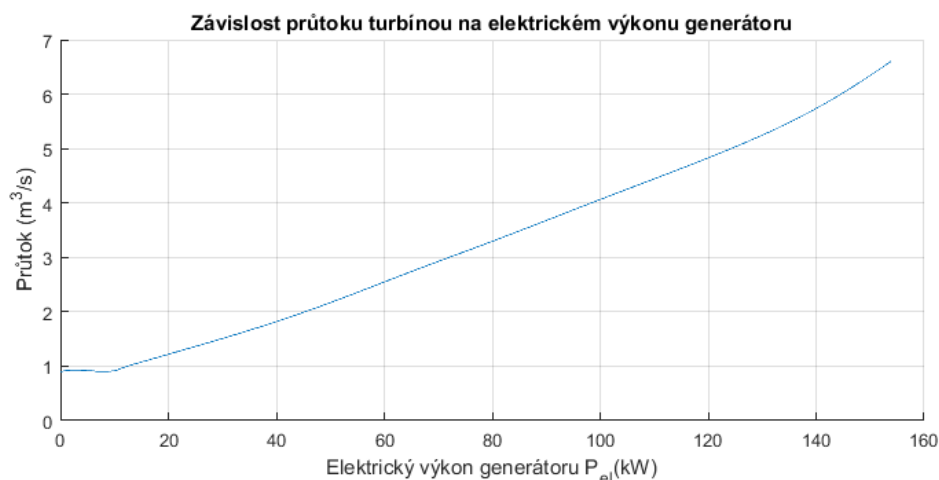
Při použití dvou paralelně vedených kabelů je maximální proudové zatížení:

$$I_{max,kab,2} = I_{max,kab,1} \cdot 2 = 626 \text{ A} \quad (4.34)$$

Vznikne tak dostatečná výkonová rezerva pro spotřebu ostatních zařízení nově vzniklé MVE.

#### 4.10 Celková účinnost technologie

Po spojení všech ztrát, které vznikají při procesu přeměny potenciální a kinetické energie vody na elektrickou energii, lze spočítat závislost výkonu generátoru na protékající vodě turbínou. Průběh této závislosti je zobrazen na grafu obr.4.12.



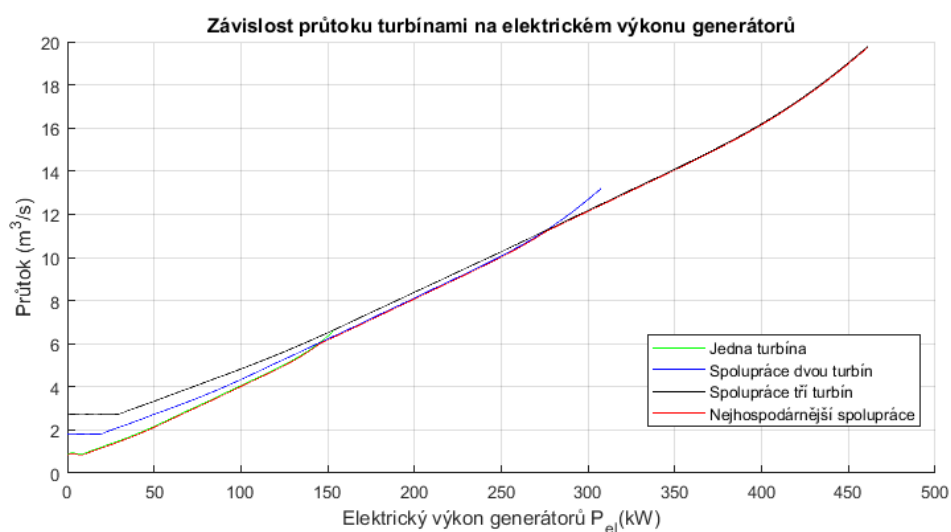
Obr. 4.12 Závislost průtoku turbínou na elektrickém výkonu generátoru

#### 4.11 Spolupráce tří turbín

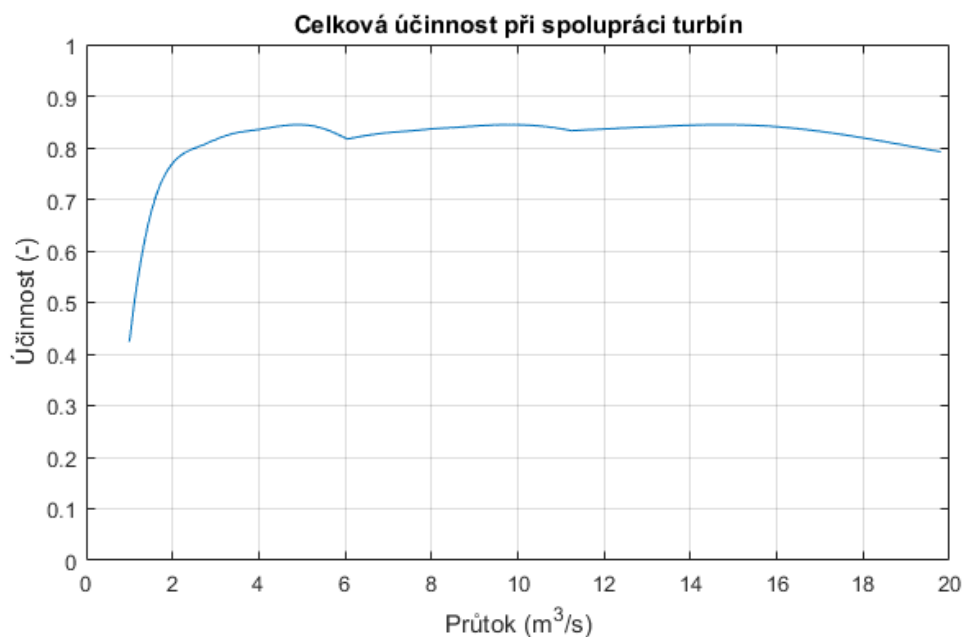
Pro ekonomické rozdělení výroby elektrické energie mezi více elektrárenských bloků se používá metoda poměrného přírůstku. Obecně platí, že při vzájemné spolupráci jednotlivých turbín je jedním z hlavních úkolů zajistit co nejehospodárnější provoz. To znamená, vyrobit co nejvíce elektrické energie z co nejmenšího množství průtoku vody.

Pro sestavení výsledné závislosti spolupráce dvou turbín, resp. tří turbín, je nutné zjistit pro každý jednotlivý výkon kombinaci součtů potřebného množství průtoku vody turbínami k dosažení tohoto výkonu a z nich vybrat minimum. To následně vynést do grafu. Nejehospodárnější spolupráce dvou a tří turbín je zobrazena na grafu obr.4.13.

Pro nejučinnější přeměnu energie je důležité pohybovat se na minimálních průbězích grafu.



Obr. 4.13 Nejehospodárnější spolupráce turbín



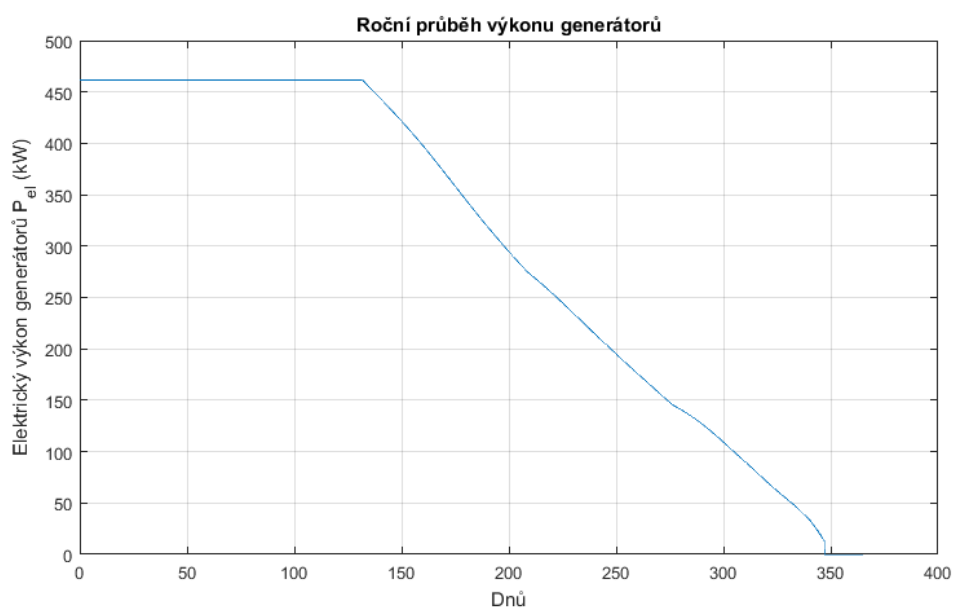
Obr. 4.14 Celková účinnost při spolupráci turbín

#### 4.12 Teoretická roční vyrobená energie

Pokud aplikujeme průběh nejehospodárnější spolupráce turbín z grafu obr.4.13 na žlutě vyznačený potenciál průtoku na grafu obr.4.2, získáme teoretický roční průběh výkonu nové MVE.

Integrací tohoto průběhu získáme roční vyrobenou energii v nové MVE.

$$W_{el,rok} = 24 \cdot \int_0^{365} P_{el,t} dt = 2,629 \text{ GWh/rok} \quad (4.35)$$



Obr. 4.15 Roční průběh výkonu nové MVE



## 5 Zhodnocení Návrhu rekonstrukce

Na závěr je potřeba provést zhodnocení po stránce ekologické, energetické a ekonomické. Po tomto zhodnocení dostaneme odpověď na otázky, zda je případná investice finančně výhodná a jaké má přínosy pro životní prostředí.

### 5.1 Zhodnocení rekonstrukce po stránce ekologické

Obnovitelné zdroje energie, do kterých patří i malé vodní elektrárny, vykazují mnohem menší vlivy na životní prostředí oproti klasickým zdrojům, které jsou dnes převážně využívány. Proto je úsilí věnované na jejich rozvoj jednou z cest k zajištění budoucího udržitelného rozvoje společnosti. [17]

Pro posouzení přínosu této stavby je důležité vzít v úvahu množství vyprodukovaných škodlivých látek a spotřebu paliva v klasické tepelné elektrárně pro výrobu stejného množství energie jako vyrobí nově vzniklá vodní elektrárna.

- Výpočet spotřeby paliva

Účinnost tepelné elektrárny je přibližně:

$$\mu_E \approx 30\% \quad (5.1)$$

Výhřevnost běžného hnědouhelného paliva je v rozsahu:

$$Q_N = 8 \div 20 \text{ MJ/kg} \quad (5.2)$$

Pro následující výpočty budeme uvažovat:

$$Q_N = 12 \text{ MJ/kg} \quad (5.3)$$

Převod mezi energetickými jednotkami:

$$1 \text{ kWh} = 3\,600 \text{ kJ} \quad (5.4)$$

Vztah pro potřebné jmenovité množství uhlí:

$$M_{U,kWh} = \frac{3600}{Q_N \cdot \mu_E} = \frac{3600}{12000 \cdot 0,3} \approx 1 \text{ kg/kWh} \quad (5.5)$$

Po dosazení do rovnice (4.35) dostaneme potřebné množství paliva na jeden rok:

$$M_{U,rok} = W_{el,rok} \cdot M_{U,kWh} = 2\,629\,000 \cdot 1 = 2\,629 \text{ t/rok} \quad (5.6)$$

- Určení množství škodlivých látek (emisí)

Při výrobě elektrické energie hnědouhelnou elektrárnou vzniknou následující emise:

**Tabulka 5.1 Vzniklé emise v hnědouhelné elektrárně**

Druh emisí	Tuhé látky (kg/MWh <sub>e</sub> )	SO <sub>2</sub> (kg/MWh <sub>e</sub> )	NO <sub>x</sub> (kg/MWh <sub>e</sub> )	CO (kg/MWh <sub>e</sub> )	CO <sub>2</sub> (kg/MWh <sub>e</sub> )
Množství emisí	3	5,3	7,7	0,65	1 213

Přepočet na roční vyrobenou energii:

Tuhé látky:

$$M_{TL,rok} = W_{el,rok} \cdot M_{TL,MWh} = 2\,629 \cdot 3 = 7,887 \text{ t/rok} \quad (5.7)$$

Oxid siřičitý:

$$M_{SO_2,rok} = W_{el,rok} \cdot M_{SO_2,MWh} = 2\,629 \cdot 5,3 = 13,934 \text{ t/rok} \quad (5.8)$$

Oxidy dusíku:

$$M_{NO_x,rok} = W_{el,rok} \cdot M_{NO_x,MWh} = 2\,629 \cdot 7,7 = 20,243 \text{ t/rok} \quad (5.9)$$

Oxid uhelnatý:

$$M_{CO,rok} = W_{el,rok} \cdot M_{CO,MWh} = 2\,629 \cdot 0,65 = 1,709 \text{ t/rok} \quad (5.10)$$

Oxid uhličitý:

$$M_{CO_2,rok} = W_{el,rok} \cdot M_{CO_2,MWh} = 2\,629 \cdot 1213 = 3\,189 \text{ t/rok} \quad (5.11)$$

Z pohledu ekologického se stavbou nové MVE ušetří každý rok spálení 2 629 tun hnědého uhlí a vyprodukování 7,887 tun tuhých látek, 13,934 tun oxidu siřičitého, 20,243 tun oxidů dusíku, 1,709 tun oxidu uhelnatého a 3 189 tun oxidu uhličitého.

## 5.2 Zhodnocení rekonstrukce po stránce energetické

K zajištění stále rostoucí světové spotřeby energie je nutné věnovat pozornost všem zdrojům energie. Nepůjde již dlouhou dobu opomíjet, že žijeme v omezeném ekosystému naší planety, který je v současné době stále uzavřený, co se týče surovin a látek. Otevřený je však pro výměnu energie s vnějším prostředím. Celková světová kapacita obnovitelných zdrojů je dána energií slunečního záření dopadajícího na zemi, geotermální energií a slapovou energií. Energie přeměněná do uživatelné podoby musí být přivedena ke spotřebiteli ve chvíli její potřeby. Tato nutnost s sebou však přináší určité problémy dané některými nepříznivými vlastnostmi těchto zdrojů. Jedná se například o fotovoltaické elektrárny, které přeměňují energii jen ve chvíli dopadajícího slunečního záření na plochu slunečních kolektorů nebo větrné elektrárny, které jsou závislé na aktuálním větru, který je velmi nestabilní. Z tohoto hlediska jsou vodní elektrárny a malé vodní elektrárny velmi stabilním zdrojem elektrické energie. [17]

V historii lidstva je vodní energie nejdéle technicky využívaným energetickým zdrojem. Největší význam z hlediska technického využití má mechanická energie vodních toků. Pomocí vzorce (1.1) lze určit teoretickou zásobu energie unášené tokem. Je nutné uvažovat ztráty hydraulické, objemové, účinnosti přeměny v technologických zařízeních a dále možnosti hydrologické, geologické a topologické. Po zohlednění těchto vlivů můžeme určit technicky využitelný hydroenergetický potenciál toků. Skutečný využívaný hydroenergetický potenciál toků je pak ještě menší. Podle [17] jsou v České republice takovéto možnosti:

- Teoretický hydroenergetický potenciál 13 TWh/rok
- Technicky využitelný hydroenergetický potenciál toků 5,96 TWh/rok

Ze statistiky ERÚ [18] vyplývá, že v roce 2019 se ve vodních elektrárnách vyrobilo 2% celkové vyrobené energie v tomto roce, tj. 2 TWh. A z toho se přibližně 50 % vyrobilo v malých vodních elektrárnách do 10 MW.

Z pohledu energetického se stavbou nové MVE opět přispěje ke zvýšení skutečně využívaného hydroenergetického potenciálu českých toků.

### 5.3 Zhodnocení rekonstrukce po stránce ekonomické

Ekonomická efektivnost má klíčový význam při posuzování ekonomické efektivnosti investic. Fyzická životnost energetických zařízení je dlouhá a ani nedochází k jejich morálnímu zastarávání. Ekonomická životnost těchto staveb je 25 až 40 let. Proto je zapotřebí při zhodnocení dané investice pečlivého ekonomického výpočtu ještě před realizací dané stavby.

Základní rozdělení metod pro zhodnocení investic je na statické a dynamické.

- Statické – zcela opomíjejí faktor času a jeho vliv na hodnotu peněz, lze použít jen pro investice s krátkou dobou životnosti.
- Dynamické – přihlížejí k působení faktoru času a částečně i k faktoru rizika, proto jsou vhodné pro investice s delší dobou ekonomické životnosti.

Mezi základní dynamickou metodu patří kritérium aktualizovaného zisku. Jedná se o metodu, která hodnotí celkový peněžní tok z investičního projektu a celkový zisk investice přepočítá na první rok uvedení investice do provozu na základě faktoru času. Díky této metodě lze již před realizací investice rozhodnout, zda bude zisková, či nikoliv.

Pro kritérium aktualizovaného zisku platí:

$$Z_{T_z} = \sum_{T=1}^{T_z} (V_T - N_{pT}) \cdot r^{-T} - N_{ip} \stackrel{!}{=} \max \quad (5.12)$$

Kde:

- $T_z$  – doba ekonomické životnosti
- $V_T$  – tržby v roce T
- $N_{pT}$  – provozní náklady v roce T
- $r$  – faktor času
- $N_{ip}$  – porovnávací investiční náklady

Doba životnosti je zvolena dle vyhl. 295/2015 Sb. o technickoekonomických parametrech:

$$T_z = 30 \text{ let} \quad (5.13)$$

Faktor času je zvolen 5%, tj:

$$r = 1,05 \quad (5.14)$$

### 5.3.1 Investiční náklady

Investiční náklady jsou rozdělené podle typu prací a zdroje, který pomohl s jejich vyčíslením.

Náklady na vybudování vodního přivaděče a stavbu nové technologické budovy MVE nacenila firma Stavmonta spol. s r.o. na základě poskytnutých informací.

**Tabulka 5.2 Náklady na zemní práce a budovu technologie MVE**

Výkopové práce spojené s rozšířením přivaděče	3 780 000 Kč
Stavba technologické budovy	5 310 000 Kč

Náklady spojené s pořízením technologie MVE a její montáž nacenila firma Ziromont s.r.o. na základě poskytnutých informací.

**Tabulka 5.3 Náklady na technologii MVE**

Vodní turbíny	7 800 000 Kč
Nátokové díly	600 000 Kč
Savky	1 050 000 Kč
Generátory	1 350 000 Kč
Elektrotechnologie	1 300 000 Kč
Montáž technologie	1 000 000 Kč
Hrabací zařízení	1 950 000 Kč
Přívodní kabel	260 000 Kč
Česle	450 000 Kč
Stavidla	250 000 Kč

Poslední položkou do investičních nákladů je cena projektu a poplatků spojených se získáním povolení.

**Tabulka 5.4 Náklady na projekt MVE**

Projekt	500 000 Kč
Poplatky	50 000 Kč

Za předpokladu, že celá stavba projektu vznikne během jednoho roku, lze investiční náklady počítat:

$$N_{ip} = \sum N_i \cdot r^0 = 25\,650\,000 \text{ Kč} \quad (5.15)$$

### 5.3.2 Provozní náklady po dobu životnosti

Provozní náklady na fungování elektrárny jsou tvořeny náhradními díly, které mohou být během roku potřeba a mzdou pro správce objektu, který bude mít na starosti bezporuchový chod elektrárny a v případě potřeby učiní zásah.

**Tabulka 2.5 Měsíční provozní náklady**

Náhradní díly (měsíčně)	5 000 Kč
Mzda (měsíčně)	15 000 Kč

Lze předpokládat, že se v průběhu doby životnosti budou provozní náklady zvyšovat, a to hlavně z důvodu inflace měny. Tento problém řeší ve vzorci postupné zvyšování investičních nákladů o B%. Pro výpočet je zvoleno:

$$B = 1,02 \quad (5.16)$$

Součet investičních nákladů za dobu  $T_z$  diskontované na počátek 1. roku se spočte:

$$N_p = \sum_1^{T_z} N_{i1} \cdot B^{T-1} \cdot r^{-T} = N_{i1} \cdot r^0 \cdot \frac{r^{T_z} - B^{T_z}}{r^{T_z} \cdot (r - B)} \quad (5.17)$$

$$N_p = (12 \cdot 20\,000) \cdot \frac{1,05^{30} - 1,02^{30}}{1,05^{30} \cdot (1,05 - 1,02)} \quad (5.18)$$

$$N_p = 4\,647\,134 \text{ Kč} \quad (5.19)$$

### 5.3.3 Tržby po dobu životnosti

Tržby po dobu životnosti budou tvořeny vykoupenou energií, kterou elektrárna dodá do distribuční sítě. V České republice o ceně vykoupené energie rozhoduje Energetický regulační úřad, který ukládá provozovateli sítě vykupovat energii vyrobenou z obnovitelných zdrojů za cenu, kterou stanoví.

Výkupní ceny se uplatňují za elektřinu dodanou a naměřenou v předávacím místě výroby a sítě příslušné distribuční soustavy.

Zelené bonusy jsou opatření podporující rozvoj obnovitelných zdrojů.

Výše výkupních cen se stanovují rok dopředu a je pravděpodobné, že se v roce uvedení elektrárny do provozu budou lišit. Pro výpočet jsou použity ceny pro rok 2021.



Tabulka 5.6 Výkupní ceny stanovené ERÚ

Zdroj energie / Datum uvedení do provozu	Výkupní ceny elektřiny dodané do sítě v Kč za 1 MWh	Zelené bonusy v Kč za 1 MWh
MVE uvedená do provozu v nových lokalitách do 31.12.2016	3 388	2 546
MVE uvedená do provozu v nových lokalitách do 31.12.2017	2 967	2 125
MVE uvedená do provozu v nových lokalitách do 31.12.2018	2 909	2 067
MVE uvedená do provozu v nových lokalitách do 31.12.2019	2 852	2 010
MVE uvedená do provozu v nových lokalitách do 31.12.2020	2 796	1 954
MVE uvedená do provozu v nových lokalitách do 31.12.2021	2 741	1 899

Lze předpokládat, že se v průběhu doby životnosti budou tržby zvyšovat, a to hlavně z důvodu růstu výkupní ceny silové elektřiny. Tento problém řeší ve vzorci postupné zvyšování tržeb o B%. Pro výpočet je zvoleno:

$$B = 1,02 \quad (5.20)$$

Pro výpočet tržeb v prvním roce je použit výsledek (4.35)

$$V_1 = W_{el,rok} \cdot V_c = 2\,629 \cdot 2\,741 = 7\,206\,089 \text{ Kč} \quad (5.21)$$

Kde  $V_c$  je výkupní cena.

Součet tržeb za dobu  $T_z$  diskontované na počátek 1. roku se spočte:

$$V = \sum_1^{T_z} V_1 \cdot B^{T-1} \cdot r^{-T} = V_1 \cdot r^0 \cdot \frac{r^{T_z} - B^{T_z}}{r^{T_z} \cdot (r - B)} \quad (5.22)$$

$$V = 7\,206\,089 \cdot \frac{1,05^{30} - 1,02^{30}}{1,05^{30} \cdot (1,05 - 1,02)} \quad (5.23)$$

$$V = 139\,531\,928 \text{ Kč} \quad (5.24)$$

### 5.3.4 Zhodnocení kritériem aktualizovaného zisku

Po diskontování provozních nákladů a tržeb na počátek 1. roku doby životnosti a dosazením do (5.12) získáme aktualizovaný zisk:

$$Z_{T_z} = \sum_{T=1}^{T_z} (V_T - N_{pT}) \cdot r^{-T} - N_{ip} = V - N_p - N_{ip} \quad (5.25)$$

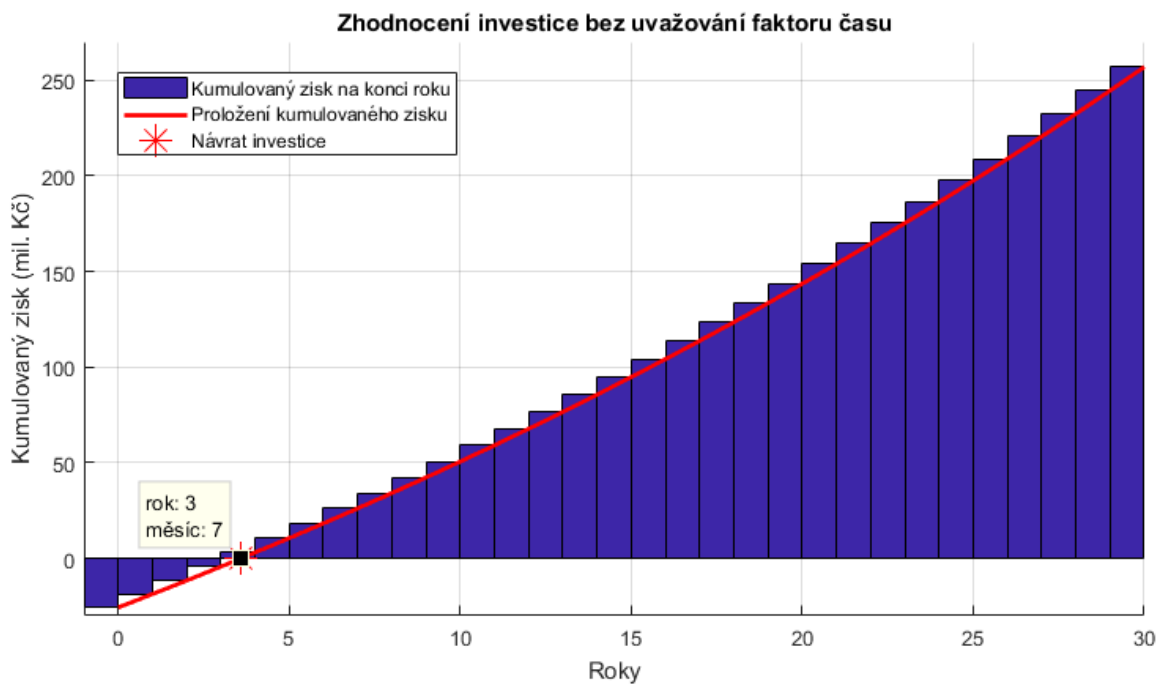
$$Z_{T_z} = 139\,531\,928 - 4\,647\,134 - 25\,650\,000 = 109\,234\,794 \text{ Kč} \quad (5.26)$$

Na grafu obr.5.1 je znázorněn kumulovaný aktualizovaný zisk v průběhu doby životnosti. Z grafu je patrné, že investice se vrátí na začátku 5. roku.



**Obr. 5.1** Zhodnocení investice kritériem aktualizovaného zisku

Zajímavým výpočtem je zhodnocení stejné investice bez uvažování faktoru času, který je znázorněn na grafu obr.5.2 a slouží pouze pro porovnání, jak se na zhodnocení investice podepíše faktor času.



**Obr. 5.2** Zhodnocení investice bez uvažování faktoru času

Z pohledu ekonomického je stavba nové MVE ekonomicky přínosnou investicí. Po aplikaci kritéria aktualizovaného zisku je předpokládáný celkový zisk investice za dobu životnosti 109,235 milionů Kč.

## Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout rekonstrukci malé vodní elektrárny na řece Berounce, v lokalitě zvané Libštejnský mlýn. Libštejnský mlýn se nachází na 105,79 km řeky Berounky a jeho historie je úzce spjatá s hradem Libštejnem, pod kterým se mlýn nachází.

V úvodní části se práce zaměřuje na současné možnosti využívání vodní energie a seznamuje s jednotlivými druhy vodních elektráren podle množství instalovaného výkonu, podle velikosti spádu, či využití vodního toku. Následně ukazuje rozdíly mezi jednotlivými vodními turbínami a možnosti přeměny energie vody na elektrickou energii.

V současné době jsou v lokalitě dvě vodní elektrárny. Jednou je jezová malá vodní elektrárna, ve které jsou instalovány dvě Bánkiho turbíny a o přeměnu energie se stará osmipólový asynchronní generátor s dvojitým mechanickým převodem. Druhou elektrárnou je derivační malá vodní elektrárna, ve které je instalována téměř původní Francisova horizontální turbína z roku 1932. Tato elektrárna je bohužel v současné době mimo provoz a neuvažuje se o opravě původní technologie. V kapitole je spočten teoretický výkon současného řešení a je porovnán s reálnými informacemi ze zařízení instalovaného v elektrárně. Při porovnání reálného výkonu s náklady spojenými s provozem elektrárny, vzniká snaha vybudovat v této lokalitě novou malou vodní elektrárnu s efektivnějšími výsledky než současné řešení.

Návrh rekonstrukce neboli stavba nové malé vodní elektrárny se snaží maximálně využít potenciál této lokality. Řešením je kompletně demontovat derivační vodní elektrárnu a vodu dopravit na konec derivačního kanálu, přičemž by došlo ke zvýšení efektivního spádu na turbíně z 1,7 m na minimálně 3 m. Celá rekonstrukce předpokládá, že jezová vodní elektrárna bude stále v provozu. Návrh bere v úvahu hydrologické poměry lokality, statisticky zpracovávané Českým hydrometeorologickým ústavem za posledních 70 let a povolené maximální množství odebírané povrchové vody za dodržení sanačního průtoku. Na základě těchto předpokladů jsou navrženy tři přímoproudé Kaplanovy turbíny, od firmy ZIROMONT s.r.o., s celkovou hltností 19,8 m<sup>3</sup>/s. Po aplikaci nejvhodnější spolupráce turbín na hydrologické poměry lokality lze předpokládat, že průměrná roční vyrobená energie v nové malé vodní elektrárně bude 2,629 GWh/rok.

Na závěr je provedeno zhodnocení celé rekonstrukce po stránce ekologické, energetické a ekonomické.

Z pohledu ekologického se stavbou nové malé vodní elektrárny ušetří každý rok spálení 2 629 tun hnědého uhlí a vyprodukování 7,887 tun tuhých látek, 13,934 tun oxidu siřičitého, 20,243 tun oxidů dusíku, 1,709 tun oxidu uhelnatého a 3 189 tun oxidu uhličitého.

Z pohledu energetického se stavbou nové malé vodní elektrárny opět přispěje ke zvýšení skutečně využívaného hydroenergetického potenciálu českých toků.

Z pohledu ekonomického je stavba nové malé vodní elektrárny ekonomicky přínosnou investicí. Po aplikaci kritéria aktualizovaného zisku je celkový zisk investice za dobu životnosti 109,235 milionů Kč. I kdyby byly hydrologické poměry v průběhu doby životnosti odlišné, než v uvažovaném výpočtu nebo byl zvolený faktor času a předpoklad zvýšení tržeb a provozních nákladů špatně odhadnutý, pořád bude investice dostatečně efektivní.



## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] oenergetice.cz. Vodní elektrárny – princip, rozdělení, elektrárny v ČR [online]. 2016 [cit. 2021-05-16].  
Dostupné z: <<https://oenergetice.cz/elektrina/vodni-elektrarny-princip-a-rozdeleni>>
- [2] www2.zj.jcu.cz. Energetika – OZE- MVE - seminární práce [online]. 2008 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z:  
<[http://www2.zf.jcu.cz/~moudry/EKOENERGETIKA/OZE%20\(semi%c3%a1rn%c3%ad%20pr%c3%a1ce\)/](http://www2.zf.jcu.cz/~moudry/EKOENERGETIKA/OZE%20(semi%c3%a1rn%c3%ad%20pr%c3%a1ce)/)>
- [3] mve.energetika.cz. Vodní dílo nízkotlaké [online]. 2001 [cit. 2021-05-16].  
Dostupné z: <<http://mve.energetika.cz/>>
- [4] mve.energetika.cz. Vodní dílo nízkotlaké 2 [online]. 2001 [cit. 2021-05-16].  
Dostupné z: <<http://mve.energetika.cz/>>
- [5] mve.energetika.cz. Vodní dílo vysokotlaké [online]. 2001 [cit. 2021-05-16].  
Dostupné z: <<http://mve.energetika.cz/>>
- [6] turistik.cz. Elektrárna Dlouhé stráně [online]. 2006 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z:  
<<https://www.turistik.cz/cz/kraje/olomoucky-kraj/okres-sumperk/loučna-nad-desnou/elektrarna-dlouhe-strane/>>
- [7] hybrid.cz. Británie chystá výstavbu mohutných přílivových elektráren [online]. 2017 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <<http://www.hybrid.cz/britanie-chysta-vystavbu-mohutnych-prilivovych-elektraren>>
- [8] GABRIEL, Pavel, ČIHÁK, František, KALANDRA, Petr. Malé vodní elektrárny. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. 321 s. ISBN 80-01-01812-1
- [9] vodniturbiny.cz. Vodní turbíny [online]. 2017 [cit. 2021-05-16].  
Dostupné z: <<http://www.vodniturbiny.cz/index.php?linkid=10>>
- [10] strojirnybrno.com. Peltonovy turbíny [online]. 2015 [cit. 2021-05-16].  
Dostupné z: <<https://strojirnybrno.com/vodni-turbiny/pelton/>>
- [11] oenergetice.cz. Archimédův šroub – od čerpadla k turbíně [online]. 2015 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <<https://oenergetice.cz/elektroenergetika/archimeduv-sroub-od-cerpadla-k-turbine>>
- [12] SKLENÁŘ, Jaroslav, ŠAFR, Václav. Liblín a. 1. vyd. Čistá: Vydavatelství Jaroslav Sklenář Čistá, 2014. 48 s.
- [13] ftohistorie.cz. Libštejn (1884) [online]. 2014 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z:  
<<http://www.ftohistorie.cz/Plzensky/Rokycany/Libstejn/Default.aspx>>
- [14] FIBINGER, Jan. Manipulační řád pro vodní dílo: MVE Libštejnský mlýna. Nasavrky. 2015. 7 s.

- [15] ziromont.cz. Vodní turbíny [online]. 2002 [cit. 2021-05-16].  
Dostupné z: <<http://www.ziromont.cz/index-r.htm>>
- [16] prakab.cz. Zemní kabely s PVC izolací a PVC pláštěm [online]. 2018  
[cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <[https://www.prakab.cz/upload/1\\_AYKY.pdf](https://www.prakab.cz/upload/1_AYKY.pdf)>
- [17] ŠKORPIL, Jan, KASÁRNÍK, Milan. Obnovitelné zdroje energie I. Vodní elektrárny. 2. vyd. Plzeň: Vydavatelství Západočeská Univerzita v Plzni, 2000. 126 s. ISBN 80-7082-675-4
- [18] eru.cz. Energetický regulační úřad – statistika [online]. 2020  
[cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <<https://www.eru.cz/cs/statistika>>