

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ-
TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA ENERGETIKY**

**NÁVRH TECHNOLOGIE MALÉ VODNÍ
ELEKTRÁRNY
TECHNOLOGY DESIGN OF SMALL
HYDROPOWER PLANT**

Student:

Bc. Marek Novák

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Zbyszek Szeliga Ph.D.

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Marek Novák**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Návrh technologie malé vodní elektrárny**
Technology Design of Small Hydropower Plant
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Zpracujte návrh technologie malé vodní elektrárny pro vybranou lokalitu. Návrh technologie bude respektovat místní hydrologické podmínky a optimálně využívat dostupnou místní infrastrukturu, tj. náhon, základy atd., která byla zachována z technologického řešení bývalého vodního mlýnu. Práce bude obsahovat:

1. Popis a analýzu současného stavu, posouzení stávajícího hydropotenciálu dané lokality, stanovení návrhových parametrů pro technologii MVE.
2. Variantní řešení technologického vybavení s ohledem na návratnost investice.
3. Základní konstrukční návrh soustrojí pro zvolenou variantu.
4. Energetické, ekonomické a environmentální zhodnocení vybrané varianty.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Gabriel, P., Čihák, F., Kalandra, P.: *Malé vodní elektrárny*. Praha 1998, ISBN 80-01-01812-1
2. Kaltschmitt, M., Streicher, W., Wiese, A.: *Renewable Energy Technology, Economics and Environment*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007, ISBN 978-3-540-70947-3
3. Melichar, J., Vojtek, J., Blahak, J.: *Malé vodní turbíny, konstrukce a provoz*. Praha 1998, ISBN 80-01-01808-0
4. Firemní literatura - vodní turbíny

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zbyszek Szeliga, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018



doc. Ing. Kamil Kolarčík, CSc.
vedoucí katedry

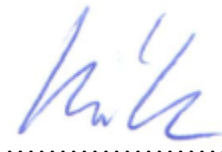


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 18.5.2018

.....


Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....18.5.2018



.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Marek Novák

Adresa trvalého pobytu autora práce: Puškinova 19, Šumperk, 78701

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Romanovi Kubíčkoví z firmy ELZACO s.r.o. a svému vedoucímu diplomové práce Ing. Zbyszkovi Szeligovi, Ph.D. za odborné vedení, pomoc a rady.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Novák, M. *Návrh technologie malé vodní elektrárny : Diplomová práce.*

Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2018, 53 s. Vedoucí práce: Zbyszek Szeliga.

Tato diplomová práce obsahuje návrh technologie malé vodní elektrárny. V úvodu práce je popsán současný stav lokality a její hydroenergetický potenciál. Následně jsou spočítány všechny potřebné veličiny kanálů a koryt, navrženy parametry turbíny a provedeno konstrukční řešení celého soustrojí. Na závěr je návrh zhodnocen z hlediska ekonomického, energetického a environmentálního.

KLÍČOVÁ SLOVA:

malá vodní elektrárna, Bánkiho turbína, výkon, kanál

ANOTATION OF THESIS

Novák, M. *Technology design of small hydropower plant : Thesis.* VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2018, 53 p. Thesis head: Zbyszek Szeliga.

This thesis consists of a design of a small hydropower plant. The first part is a description of an actual state condition of the location and its hydroenergetic potential. The second part contains calculations of all quantities of channels and mangers and a description of the turbine parameters and also the construction of the whole machinery. The last part of this thesis is an economic, energetic and environmental evaluation of this design.

KEYWORDS

small hydropower plant, crossflow turbine, performance, channel

Obsah

0. Seznam použitých zkratk	9
1. Úvod	12
2. Popis a analýza současného stavu, posouzení stávajícího hydropotenciálu, stanovení návrhových parametrů pro technologii MVE	13
2.1 Popis lokality	13
2.2 Posouzení stávajícího hydropotenciálu	16
2.2.1 Průměrný roční průtok	16
2.2.2 Přívodní kanál	17
2.2.3 Odpadní kanál	24
2.2.4 Jez na korytě řeky	27
2.2.5 Průtok v korytě řeky v bodě přítoku odpadního kanálu	28
2.3 Předběžný návrh elektrárny	31
2.3.1 Hrubý spád	31
2.3.2 Předpokládaný výkon a výroba elektrárny	32
2.3.3 Volba turbíny	32
3. Variantní řešení technologického vybavení s ohledem na návratnost investice	34
3.1 Kaplanova turbína	34
3.2 Semi-Kaplanova turbína	35
3.3 Propelerová (vrtulová) turbína	36
3.4 Šneková (Archimedova) turbína	36
3.4 Bánkiho turbína	37
3.5 Volba turbíny	38
4. Návrh parametrů turbíny	39
4.1 Určení čistého spádu	39
4.1.1 Čistý spád	39
4.1.2 Pokles hladiny za česlemi	39

4.1.3	Ztráty v potrubí	39
4.1.4	Výška turbíny nad spodní vodou	42
4.2	Výpočet parametrů turbíny.....	42
4.3	Výpočet průtokové dráhy tekutiny v oběžném kole:	45
4.4	Návrh geometrie lopatek	49
4.5	Návrh vstupní křivky turbíny	52
5.	Energetické, ekonomické a environmentální zhodnocení vybrané varianty.....	55
5.1	Energetické zhodnocení	55
5.1.1	Určení účinnosti turbíny.....	55
5.1.2	Výpočet okamžitého výkonu	56
5.1.3	Výpočet ročního výkonu.....	57
5.2	Ekonomické zhodnocení:	59
5.2.1	Náklady na stavební úpravy:.....	59
5.2.2	Náklady na technologii MVE:	60
5.2.3	Celkové náklady na výstavbu MVE:	60
5.2.4	Kalkulace investice:.....	60
5.3	Environmentální zhodnocení.....	66
6.	Závěr	67
7.	Seznam použité literatury	68
8.	Seznam obrázků.....	70
9.	Seznam tabulek	71
10.	Seznam grafů	71
11.	Seznam příloh	72

0. Seznam použitých zkratek

Zkratka	Název veličiny	Jednotka
a	Plocha šterbiny	[m ²]
α	Vstupní úhel tekutiny do oběžného kola	[°]
b	Šírka koryta	[m]
B	Šírka přítokového koryta	[m]
β	Relativní úhel rychlosti	[°]
C	Rychlostní součinitel	[-]
c_1	Rychlost vstupní vody	[m/s]
c_{mi}	Absolutní rychlost	[m/s]
$\overline{c_{mi}}$	Střední hodnota absolutní rychlosti	[m/s]
d	Průměr potrubí	[mm]
D	Průměr oběžného kola	[mm]
d_2	Vnitřní průměr oběžného kola	[mm]
DN	Světlost trubky	[mm]
d_h	Průměr hřídele	[mm]
E	Vyrobená energie	[kWh]
E_{0-75}	Vyrobená energie za 75 dní	[kWh]
g	Tíhové zrychlení	[m/s ²]
h	Přepadová výška	[mm]
h_1	Výška hladiny na začátku koryta	[mm]
h_2	Výška hladiny na konci koryta	[mm]
$H_{čistý}$	Čistý spád	[m]
$H_{hrubý}$	Hrubý spád	[m]
$H_{ztr.česle}$	Ztrátová výška na česlích	[mm]
$H_{ztr.tlak}$	Tlaková ztrátová výška	[mm]
$H_{ztr.turbíny}$	Ztrátová výška turbíny	[mm]
i	Roční úroková sazba	[%]
i_e	Podélný sklon koryta	[-]
k_{1d}	Součinitel poměru L/D turbíny	[-]
$k_{ostř}$	Koeficient ostřiku	[-]
K_i	Požizovací náklady	[Kč]
$KT_{\check{c}}$	Čistý kumulovaný tok hotovosti	[Kč]

KT_h	Hrubý kumulovaný tok hotovosti	[Kč]
L	Délka štěrby	[mm]
L_1	Délka kanálu	[m]
L_2	Délka lopatky	[mm]
m	Sklon svahu	[-]
m_b	Součinitel jalového přepadu	[-]
m_{dny}	Počet dní	[-]
n	Manningův koeficient	[-]
$n_{ot.}$	Jmenovité otáčky	[ot/min]
N_p	Roční provozní náklady	[Kč/rok]
NPV	Čistá současná hodnota	[Kč]
η	Účinnost	[%]
η_G	Účinnost generátoru	[%]
$\eta_{\dot{R}}$	Účinnost řemenového převodu	[%]
η_T	Účinnost turbíny	[%]
O	Omočený obvod koryta	[m]
$O_{tech.}$	Odpisy za investice do technologie	[Kč/rok]
O_{staveb}	Odpisy za investice na výstavbu	[Kč/rok]
O_{celkem}	Odpisy celkových investice na rekonstrukci MVE	[Kč/rok]
P	Výkon turbíny	[kW]
P_j	Peněžní příjem z investice v j-tém roce hotovosti	[Kč]
Q	Průtok	[m ³ /s]
Q_{koryta}	Průtok v korytě řeky	[m ³ /s]
$Q_{pr.rok}$	Průměrný roční průtok řeky	[m ³ /s]
$Q_{sanační}$	Minimální (sanační) průtok v korytě	[m ³ /s]
$Q_{turbíny}$	Projektovaný průtok turbínou	[m ³ /s]
Q_T	Hltnost turbíny	[m ³ /s]
R	Poloměr	[mm]
s	Největší otevření štěrby	[mm]
S	Průtočný průřez koryta	[m ²]
$S_{výřez}$	Průtočný průřez ve výřezu	[m ²]
$S_{př.koryt}$	Průtočný průřez přívodního koryta	[m ²]
t	Počet hodin za den	[mm]
T_r	Roční tržba	[Kč/rok]

$T_{\check{c}}$	Čistý tok hotovosti	[Kč]
T_h	Hrubý tok hotovosti	[Kč]
u	Obvodová rychlost	[m/s]
v	Průřezová rychlost	[-]
w	Relativní rychlost	[m/s]
y_o	Výška hladiny	[mm]
z_{zs}	Místní ztráta změnou směru	[mm]
z_{kz}	Místní ztráta kónickým zúžením	[mm]
$Z_{\check{c}}$	Čistý zisk	[Kč/rok]
Z_h	Hrubý zisk	[Kč/rok]
ξ_{zs}	Součinitel místní ztráty změnou směru	[-]
ξ_{kz}	Součinitel místní ztráty kónickým zúžením	[-]
γ	Úhel rotace oběžného kola	[°]

1. Úvod

Tématem diplomové práce je návrh malé vodní elektrárny (dále MVE), která bude vybudována rekonstrukcí starého vodního mlýna. Vodní mlýn je v havarijním stavu, takže bude potřeba provést značný rekonstrukční nebo stavební zásah. Některé stávající prvky bude možno využít (např. přívodní kanál). Důvodem přestavby vodního mlýna na malou vodní elektrárnu je dobrý energetický potenciál řeky.

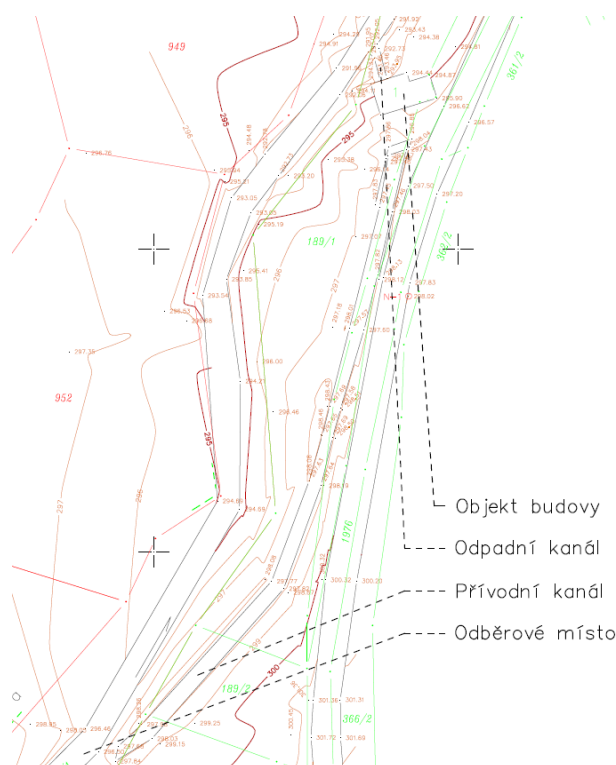
V úvodu diplomové práce je popsán a analyzován současný stav lokality jak z pohledu stavebního, tak i z pohledu hydro-energetického potenciálu lokality. Dále jsou vypočteny návrhové parametry pro technologii MVE a navrženy některé stavební úpravy. Ve druhé části jsou popsány a porovnány varianty turbín, které by mohly být v dané lokalitě instalovány. V závěru této kapitoly je pak zvolena jedna z turbín. V třetí části jsou dopočítány zbylé potřebné parametry pro návrh turbíny a následně je proveden výpočet potřebných konstrukčních parametrů turbíny. V závěrečné části je MVE posouzena a zhodnocena z environmentálního, energetického a ekonomického hlediska.

2. Popis a analýza současného stavu, posouzení stávajícího hydropotenciálu, stanovení návrhových parametrů pro technologii MVE

2.1 Popis lokality

Nová MVE vznikne v malé srbské vesnici Lazin Breg na řece Rača. Jedná se o lokalitu, kde má investor zájem využít pozůstatky starého vodního mlýna, který není již dlouhou dobu využíván.

Výhodou této místa je to, že se jedná o lokalitu s jedním majitelem, příznivými hydrologickými podmínkami a zachovalými částmi původního vodního díla. Odběrné místo na řece bylo při povodních poškozeno a bude nutné ho kompletně zrekonstruovat. Betonový derivační přívodní kanál o délce 122 metrů a šířce 2,7 metrů je však v dobrém stavu. Také odpadní kanál o délce 8 metrů a šířce 1,7 metru je v dobrém stavu. Kanály jsou zarostlé a zanesené nánosem, takže bude nutné je vyčistit. Budovu mlýna bude potřeba pro její špatný technický stav strhnout a na jejím místě postavit nový objekt.





Obr. 2.2 – Přívodní kanál



Obr. 2.3 – Objekt starého mlýna



Obr. 2.4 – Koryto řeky



Obr. 2.5 – Stary jez



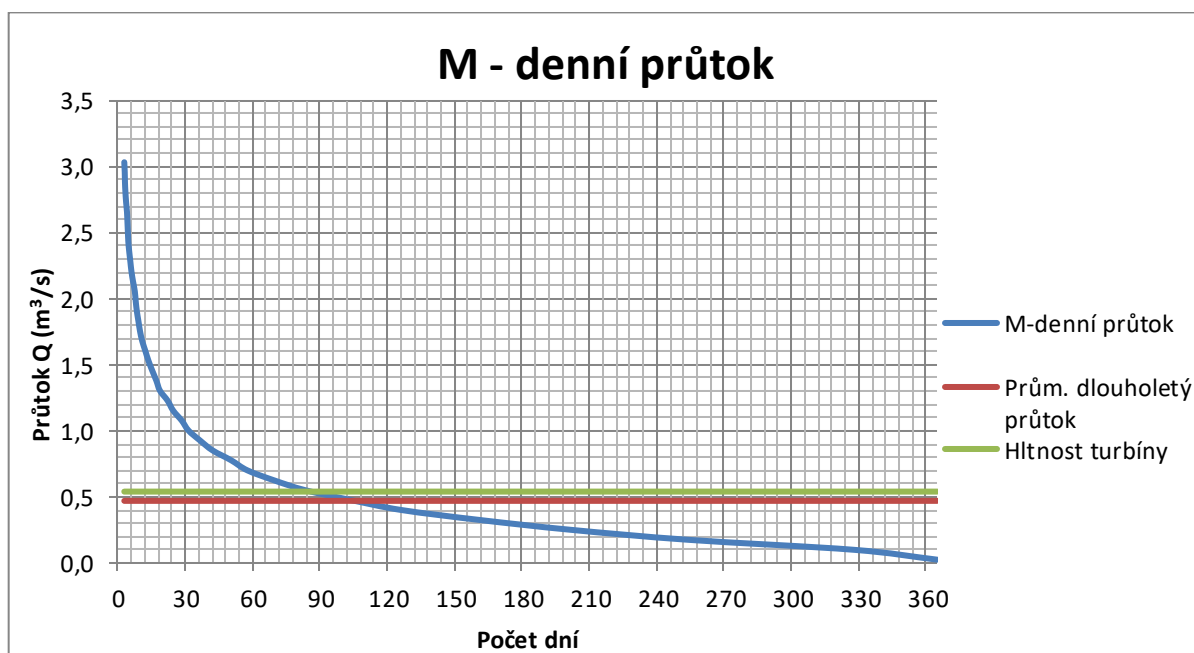
Obr. 2.6 – Technologie starého mlýna

2.2 Posouzení stávajícího hydropotenciálu

2.2.1 Průměrný roční průtok

Průměrný roční průtok je množství vody, které proteče daným profilem během jednoho roku. Údaje o průtoku se získávají z vodohospodářských stanic, které by měly být na každém vodním toku. Pro návrh malé vodní elektrárny je důležité znát především M-denní průtok. Ten se stanovuje v m^3/s a představuje, kolik dní v roce teče určité množství vody. Na M-denní průtoky má vliv hlavně déšť, sníh a sucho.

Hodnoty pro určení M-denního průtoku v této diplomové práci byly získány od zákazníka, který zažádal o zpracování návrhu MVE.



Graf. 2.1 – M-denní průtok

Průměrný dlouholetý průtok je $Q_a=0,470 \text{ m}^3/\text{s}$ a odpovídá 110-ti denní vodě. Návrh turbíny bude vycházet z průtoku $Q_{\text{turbíny}}=0,540 \text{ m}^3/\text{s}$, který je dán maximálním průtokem v korytě. Při návrhu derivační MVE je v Srbsku zákonná povinnost zachovat minimální průtok koryta, který činí 10 % z průměrného ročního průtoku. V tomto případě je $Q_{\text{sanační}}=0,047 \text{ m}^3/\text{s}$.

Počet dní, kdy je využitelný průtok koryta $Q_{\text{kanálu}}=0,540 \text{ m}^3/\text{s}$:

$$Q_{\text{koryta}} = Q_{\text{kanálu}} + Q_{\text{min.průtok}} \quad (2.1)$$

$$Q_{\text{koryta}} = 0,54 + 0,047 = 0,587 \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (2.2)$$

Z grafu pro M-denní průtok (graf 2.1) lze vyčíst, že požadovaný průtok $Q_{\text{koryta}}=0,587 \text{ m}^3/\text{s}$ je 75 dní v roce

2.2.2 Přívodní kanál

Jak již bylo zmíněno, bude se jednat o derivační MVE, tzn. že z hlavního koryta řeky je k elektrárně veden přívodní kanál. Stávající kanál je betonový, obdélníkového profilu o šířce 2,7 metru, hloubce 0,5 metru a délce 122 metrů. Na jeho konci jsou česle,

jalový přepad a hladinová sonda, díky níž se bude hltnost turbíny regulovat tak, aby nedošlo k poklesu hladiny. Výška hladiny v přírodním kanále bude $h=0,35\text{m}$. Pokles hladiny je nežádoucí, protože by došlo i ke ztrátě spádové výšky na turbínu.

U přírodního kanálu je potřeba stanovit:

- Maximální kapacita kanálu
- Průběh hladin při různých průtocích

U derivačních kanálů může v přírodním nebo odpadním kanálu dojít ke třem typům proudění- proudění neustálené, ustálené nerovnoměrné a ustálené rovnoměrné. Z důvodu konstantních profilů, sklonů dna kanálů a uvažovaných rychlostí se bude jednat jak u přírodního, tak i u odpadního kanálu o proudění ustálené rovnoměrné.

Rovnoměrné proudění se počítá z kombinace Chézyho (Manningovy) rovnice a rovnic pro výpočet objemového průtoku. [1] [2]

Výpočet průtoku v korytě (číselné hodnoty uvedeny pro $y=0,02\text{m}$):

$$Q = S \cdot C \cdot \sqrt{R \cdot i_e} \quad (2.3)$$

Kde:

Q	průtok vody v korytě	$[\text{m}^3/\text{s}]$
S	průtočný průřez koryta	$[\text{m}^2]$
C	rychlostní součinitel	$[-]$
R	hydraulický poloměr	$[-]$
i_e	podélný sklon koryta	$[-]$

Výpočet průtočného průřezu koryta:

$$S = b \cdot y_0 = 2,7 \cdot 0,02 = 0,054 \quad [\text{m}^2] \quad (2.4)$$

Kde:

b	šířka přírodního kanálu	$[\text{m}]$
y_0	výška hladiny	$[\text{m}]$

Výpočet omočeného obvodu koryta:

$$O = b + 2 \cdot y_0 = 2,7 + 2 \cdot 0,02 = 2,74 \quad [\text{m}] \quad (2.5)$$

Výpočet hydraulického poloměru:

$$R = \frac{S}{O} = \frac{0,05}{2,74} = 0,02 \quad [-] \quad (2.6)$$

Výpočet rychlostního součinitele:

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{1}{6}} = \frac{1}{0,02} \cdot 0,02^{\frac{1}{6}} = 25,99 \quad [-] \quad (2.7)$$

Kde:

n součinitel drsnosti koryta (Manningův koeficient)
pro přímé a čisté betonové koryto bez přejeří a tůní je $n=0,02$ [-]

Výpočet podélného sklonu koryta:

$$i_e = \frac{(h_1 - h_2)}{L_1} = \frac{(297,65 - 297,46)}{122} = 0,0016 \quad [-] \quad (2.8)$$

Kde:

h_1 výška hladiny na začátku koryta [m]
 h_2 výška hladiny na konci koryta [m]
 L_1 délka přívodního kanálu [m³/s]

Výpočet průřezové rychlosti:

$$v = C \cdot (R \cdot i_e)^2 = 25,99 \cdot (0,02 \cdot 0,0016)^2 = \quad (2.9)$$

$$v = 0,147 \quad [\text{m/s}] \quad (2.10)$$

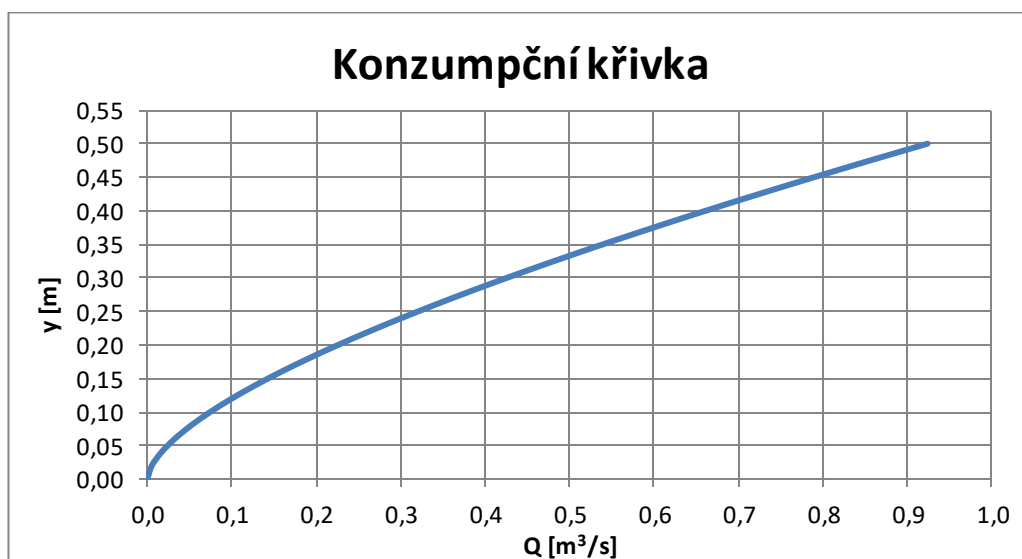
Výpočet průtoku:

$$Q = S \cdot C \cdot \sqrt{R \cdot i_e} = 0,05 \cdot 25,99 \cdot \sqrt{0,02 \cdot 0,0016} = \quad (2.11)$$

$$Q = 0,005 \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (2.12)$$

Výška hladiny y_0	Průměrný průřez S	Omočený obvod O	Hydraulický poloměr R	Rychlostní součinitel C	Průměrná rychlost v	Průtok Q
[m]	[m ²]	[m]	[-]	[-]	[m/s]	[m ³ /s]
0,000	0,000	2,700	0,000	0,000	0,000	0,000
0,020	0,054	2,740	0,020	25,986	0,147	0,008
0,040	0,108	2,780	0,039	29,098	0,231	0,025
0,060	0,162	2,820	0,057	31,059	0,299	0,049
0,080	0,216	2,860	0,076	32,508	0,359	0,078
0,100	0,270	2,900	0,093	33,661	0,413	0,112
0,120	0,324	2,940	0,110	34,621	0,462	0,150
0,140	0,378	2,980	0,127	35,442	0,508	0,192
0,160	0,432	3,020	0,143	36,159	0,550	0,238
0,180	0,486	3,060	0,159	36,795	0,590	0,287
0,200	0,540	3,100	0,174	37,366	0,627	0,339
0,220	0,594	3,140	0,189	37,883	0,663	0,394
0,240	0,648	3,180	0,204	38,356	0,696	0,451
0,260	0,702	3,220	0,218	38,790	0,728	0,511
0,270	0,729	3,240	0,225	38,994	0,744	0,542
0,280	0,756	3,260	0,232	39,191	0,759	0,574
0,300	0,810	3,300	0,245	39,564	0,788	0,639
0,320	0,864	3,340	0,259	39,911	0,816	0,705
0,340	0,918	3,380	0,272	40,237	0,843	0,774
0,360	0,972	3,420	0,284	40,542	0,869	0,845
0,380	1,026	3,460	0,297	40,830	0,894	0,918
0,400	1,080	3,500	0,309	41,102	0,918	0,992
0,420	1,134	3,540	0,320	41,359	0,941	1,068
0,440	1,188	3,580	0,332	41,603	0,964	1,145
0,460	1,242	3,620	0,343	41,835	0,986	1,224
0,480	1,296	3,660	0,354	42,056	1,007	1,304
0,500	1,350	3,700	0,365	42,266	1,027	1,386

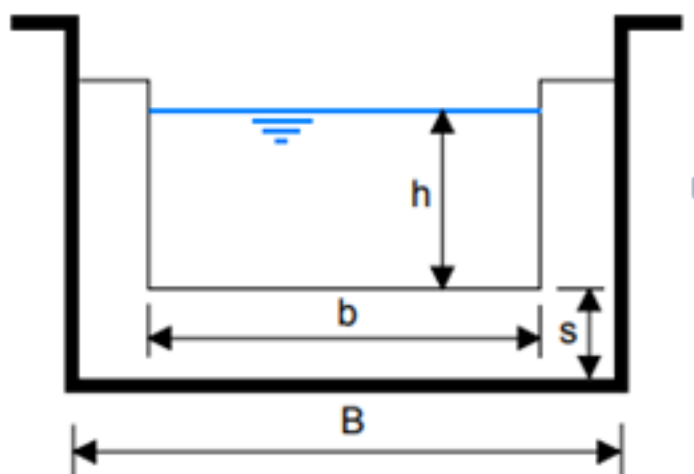
Tab 2.1 – Hodnoty průtoků v přívodním kanále



Graf 2.2 – Konzumpční křivka přívodního kanálu

Jalový přepad

Jalový přepad slouží k odvedení přebytečného množství vody v přívodním kanálu zpět do hlavního koryta řeky. Tento stavební objekt zamezí dalšímu stoupaní vodní hladiny v kanálu a následnému nekontrolovatelnému vylití do nežádoucích lokalit (zástavby apod.).



Obr. 2.7 - Schéma jalového přepadu

Následující návrh je pouze orientační s cílem upřesnění návrhového spádu. Podrobný návrh bude muset provést osoba zodpovědná za stavební část rekonstrukce.

Návrhové rozměry přeřadu jsou: délka 4 m a hloubka 15 cm. Přeřad tedy bude fungovat pouze tehdy, když v kanále bude hladina vody vyšší než 35 cm nad dnem. Přeřad bude vybudovaný na konci přívodního kanálu v levé části. Na jalový přeřad bude navazovat kanál, který svede vodu nejkratší cestou do koryta řeky. [3]

Výpočet součinitele jalového přeřadu:

$$m_b = \left[0,405 + \frac{0,0027}{h_{př}} - 0,03 \cdot \left(1 - \frac{b}{B} \right) \right] \cdot \left[1 + 0,55 \cdot \left(\frac{S_{výřez}}{S_{př.kor.}} \right)^2 \right] \quad (2.13)$$

Kde:

$h_{př}$.	přeřadová výška	[m]
b	šířka výřezu	[m]
B	šířka přítokového koryta	[m]
$S_{výřez}$.	průčinný průřez ve výřezu	[m ²]
$S_{př.kor.}$.	průčinný průřez přívodního koryta	[m ²]

$$m_b = \left[0,405 + \frac{0,0027}{0,01} - 0,035 \cdot \left(1 - \frac{4}{2,7} \right) \right] \cdot \left[1 + 0,55 \cdot \left(\frac{0,04}{0,972} \right)^2 \right] = \quad (2.14)$$

$$m_b = 0,69 \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (2.15)$$

Výpočet průtoku jalového přeřadu:

$$Q = m_b \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{\frac{3}{2}} \quad (2.16)$$

Kde:

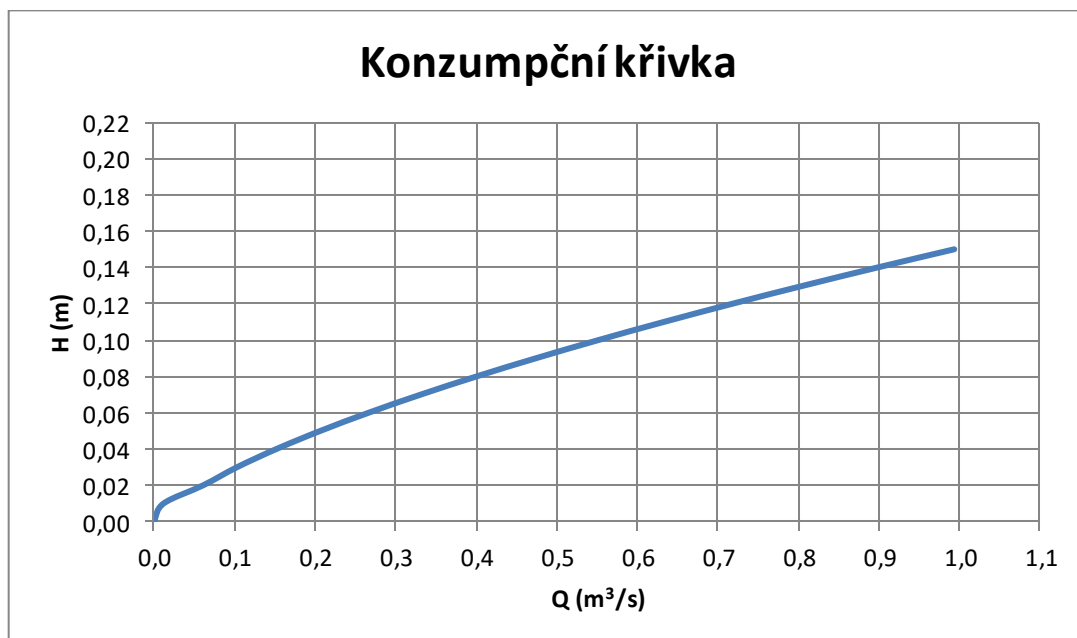
g	tíhové zrychlení	[m/s ²]
-----	------------------	---------------------

$$Q = 0,69 \cdot 4 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot 0,01^{\frac{3}{2}} = \quad (2.17)$$

$$Q = 0,01 \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (2.18)$$

Výška přepadu h	Součinitel přepadu m_b	Průtok Q
[m]	[-]	[m ³ /s]
0,00	0,00	0,00
0,01	0,69	0,01
0,02	1,22	0,06
0,03	1,12	0,10
0,04	1,07	0,15
0,05	1,04	0,21
0,06	1,03	0,27
0,07	1,01	0,33
0,08	1,00	0,40
0,09	0,99	0,47
0,10	0,99	0,55
0,11	0,98	0,63
0,12	0,98	0,72
0,13	0,97	0,81
0,14	0,97	0,90
0,15	0,97	0,99

Tab. 2.2 – Hodnoty průtoků přes jalový přepad

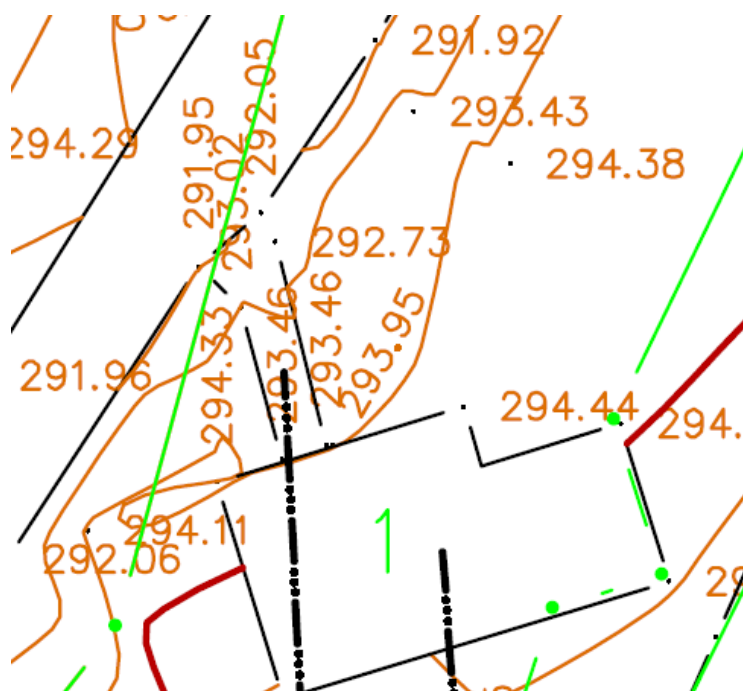


Graf 2.3 – Konzumpční křivka jalového přepadu

2.2.3 Odpadní kanál

Odpadní kanál slouží k odvádění vody z turbíny zpět do koryta řeky. Začíná tudíž v MVE pod turbínou a končí v bodě, kde se voda vlévá zpět do řeky.

Koryto je vybetonované, jeho profil je obdélníkový o šířce 1,8 metru, výšce 0,5 metru, délka koryta je 8 metrů. Jak lze z obrázku (obr. 2.8) vyčíst, spádová výška koryta je 1,9 metru. Ze získaných zkušeností ale víme, že pro daný případ bude na dané délce stačit spád 0,05 metru. Proto se přebytečný prostor vybagueje a vybuduje kanál nový. Ten bude stejně dlouhý a široký, ale bude celý vybudovaný níž a tedy s menším spádem. Výsledkem je větší spádová výška na turbínu a tedy i větší výkon turbíny. Dno nového kanálu v bodě pod turbínou bude ve výšce 292,00 m.n.m a dno konce kanálu ve výšce 291,95 m.n.m..



Obr. 2.8 – Geodetické zaměření odpadního kanálu

Stejně jako u přívodního, tak i u odpadního kanálu je potřeba stanovit:

- Maximální kapacita kanálu
- Průběh hladin při různých průtocích

Výpočet průtoku v korytě:

$$Q = S \cdot C \cdot \sqrt{R \cdot i_e} \quad (2.19)$$

Výpočet průtočného průřezu koryta:

$$S = b \cdot y_0 = 1,8 \cdot 0,02 = 0,04 \text{ [m}^2\text{]} \quad (2.20)$$

Výpočet omočeného obvodu koryta:

$$O = b + 2 \cdot y_0 = 1,8 + 2 \cdot 0,02 = 1,84 \text{ [m]} \quad (2.21)$$

Výpočet hydraulického poloměru:

$$R = \frac{S}{O} = \frac{0,04}{1,84} = 0,02 \text{ [-]} \quad (2.22)$$

Výpočet hydraulického součinitele:

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{1}{6}} = \frac{1}{0,025} \cdot 0,02^{\frac{1}{6}} = 20,76 \text{ [-]} \quad (2.23)$$

Výpočet podélného sklonu koryta:

$$i_e = \frac{(h_1 - h_2)}{L_1} = \frac{(292,00 - 291,95)}{8} = 0,0065 \text{ [-]} \quad (2.24)$$

Výpočet průřezové rychlosti:

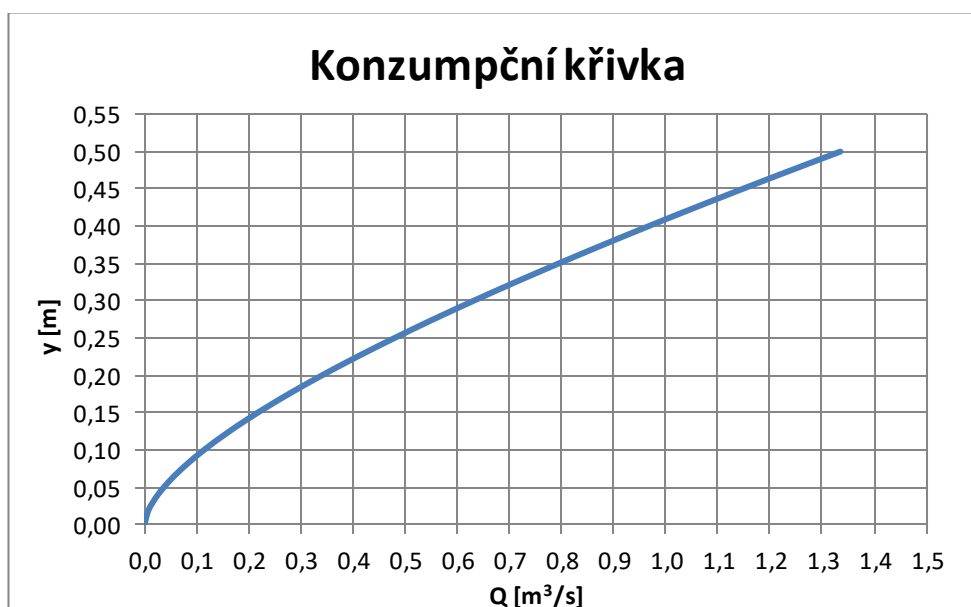
$$v = C \cdot (R \cdot i_e)^2 = 20,76 \cdot (0,02 \cdot 0,0065)^2 = 0,23 \text{ [m/s]} \quad (2.25)$$

Výpočet průtoku:

$$Q = S \cdot C \cdot \sqrt{R \cdot i_e} = 0,04 \cdot 20,76 \cdot \sqrt{0,02 \cdot 0,0065} = 0,01 \text{ [m}^3\text{/s]} \quad (2.26)$$

Výška hladiny y_0	Průtočný průřez S	Omočený obvod O	Hydraulický poloměr R	Rychlostní součinitel C	Průřezová rychlost v	Průtok Q
[m]	[m ²]	[m]	[-]	[-]	[m/s]	[m ³ /s]
0,00	0,00	1,80	0,00	0,00	0,00	0,00
0,02	0,04	1,84	0,02	20,76	0,23	0,01
0,04	0,07	1,88	0,04	23,22	0,36	0,03
0,06	0,11	1,92	0,06	24,76	0,46	0,05
0,08	0,14	1,96	0,07	25,89	0,55	0,08
0,10	0,18	2,00	0,09	26,78	0,64	0,11
0,12	0,22	2,04	0,11	27,51	0,71	0,15
0,14	0,25	2,08	0,12	28,14	0,77	0,20
0,16	0,29	2,12	0,14	28,68	0,84	0,24
0,18	0,32	2,16	0,15	29,16	0,89	0,29
0,20	0,36	2,20	0,16	29,58	0,95	0,34
0,22	0,40	2,24	0,18	29,97	1,00	0,39
0,24	0,43	2,28	0,19	30,31	1,04	0,45
0,26	0,47	2,32	0,20	30,63	1,09	0,51
0,27	0,49	2,34	0,21	30,78	1,11	0,54

Tab. 2.3 – Hodnoty průtoků v odpadním kanálu



Graf 2.4 – Konzumpční křivka odpadního kanálu

2.2.4 Jez na korytě řeky

Jez na korytě řeky je v havarijním stavu, takže ho nebude možné využívat, ale bude potřeba vybudovat jez nový. Jezy slouží k navýšení hladiny vody před jezem, čímž vznikne větší spádová výška na turbínu.

Na přehrazení řeky bude použita sklopná jezová klapka. Regulace hladiny se provádí pomocí sklápění klapky, která má na stranách hydraulická ramena. Před klapkou jsou hladinové sondy, díky nimž může automatické regulační zařízení vyhodnocovat velikost průtoku a automaticky udržovat potřebnou výšku hladiny. Výhodou tohoto řešení je, že se klapka v akutních případech (např. povodně) sklopí sama a to i v případě, že dojde k výpadku proudu.



Obr. 2.9 – Jezová sklopná klapka

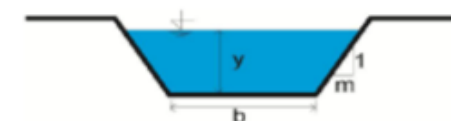


Obr. 2.10 – Sklopná jezová sklopná klapka

2.2.5 Průtok v korytě řeky v bodě přítoku odpadního kanálu

Průtok a výšku hladiny v korytě je potřeba znát z důvodu výškového umístění turbíny nad hladinu vody. Je žádoucí, aby turbína byla naprojektována co nejnižší nad hladinou spodní vody. Tím bude zajištěn vyšší spád a tím i vyšší výkon turbíny. Pokud nebude turbína umístěna dostatečně vysoko, může se stát, že při vyšším průtoku a tím pádem i vyšší hladině v odpadním kanálu se bude turbína brodit ve vodě. To by mělo za následek stav, kdy turbína nemůže být v provozu.

Koryto za přelivem je lichoběžníkového profilu s mírným pravotočivým zakřivením. Šířka dna koryta je 3 metry s bočními svírajícími stěnami pod úhlem 45° . Spád koryta (od přelivu po přítok odpadního kanálu) je 4,51 metru a délka 130 metrů.



Obr. 2.11 – Schéma koryta řeky

Výpočet průtočného průřezu:

$$S = b \cdot y_0 + m \cdot y_0^2 = 3 \cdot 0,02 + 1 \cdot 0,02^2 = 0,06 \quad [\text{m}^2] \quad (2.27)$$

Kde:

$$m \quad \text{Sklon svahu (m=1)} \quad [-]$$

Výpočet omočeného obvodu:

$$O = b + 2 \cdot y_0 \cdot \sqrt{1 + m^2} = 3 + 2 \cdot 0,02 \cdot \sqrt{1 + 1^2} = 3,06 \quad [\text{m}^2] \quad (2.28)$$

Výpočet hydraulického poloměru:

$$R = \frac{S}{O} = \frac{0,06}{3,06} = 0,02 \quad [\text{m}^2] \quad (2.29)$$

Výpočet rychlostního součinitele:

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{1}{6}} = \frac{1}{0,034} \cdot 0,02^{\frac{1}{6}} = 17,33 \quad [-] \quad (2.30)$$

Kde:

$$n \quad \text{Pro zakřivenou trasu s přítomností kamenů a plevele je } n=0,034 \quad [-]$$

Výpočet podélného sklonu koryta:

$$i = \frac{h_1 - h_2}{L} = \frac{296,46 - 291,95}{130} = 0,035 \quad [-] \quad (2.31)$$

Výpočet průřezové rychlosti:

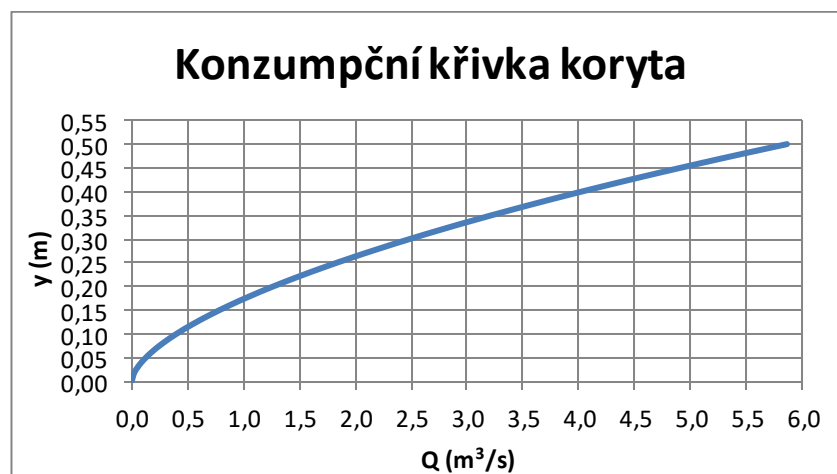
$$v = C \cdot \sqrt{R \cdot i_e} = 17,33 \cdot \sqrt{0,02 \cdot 0,035} = 0,45 \quad [\text{m/s}] \quad (2.32)$$

Výpočet průtoku:

$$Q = v \cdot S = 0,45 \cdot 0,06 = 0,03 \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (2.33)$$

Výška hladiny y_0	Průtočný průřez S	Omočený obvod O	Hydraulický poloměr R	Rychlostní součinitel C	Průřezová rychlost v	Průtok Q
[m]	[m ²]	[m]	[-]	[-]	[m/s]	[m ³ /s]
0,00	0,00	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,02	0,06	3,06	0,02	17,33	0,45	0,03
0,04	0,12	3,11	0,04	19,42	0,71	0,09
0,06	0,18	3,17	0,06	20,73	0,93	0,17
0,08	0,25	3,23	0,08	21,71	1,12	0,28
0,10	0,31	3,28	0,09	22,49	1,29	0,40
0,12	0,37	3,34	0,11	23,15	1,44	0,54
0,14	0,44	3,40	0,13	23,71	1,59	0,70
0,16	0,51	3,45	0,15	24,20	1,72	0,87
0,18	0,57	3,51	0,16	24,64	1,85	1,06
0,20	0,64	3,57	0,18	25,04	1,98	1,26
0,22	0,71	3,62	0,20	25,40	2,09	1,48
0,24	0,78	3,68	0,21	25,73	2,20	1,71
0,26	0,85	3,74	0,23	26,03	2,31	1,96
0,28	0,92	3,79	0,24	26,32	2,41	2,22
0,30	0,99	3,85	0,26	26,58	2,51	2,49
0,32	1,06	3,91	0,27	26,83	2,61	2,77
0,34	1,14	3,96	0,29	27,07	2,70	3,07
0,36	1,21	4,02	0,30	27,29	2,79	3,37
0,38	1,28	4,07	0,32	27,50	2,88	3,69
0,40	1,36	4,13	0,33	27,70	2,96	4,03
0,42	1,44	4,19	0,34	27,89	3,04	4,37
0,44	1,51	4,24	0,36	28,07	3,12	4,73
0,46	1,59	4,30	0,37	28,24	3,20	5,09
0,48	1,67	4,36	0,38	28,41	3,28	5,47
0,50	1,75	4,41	0,40	28,57	3,35	5,86

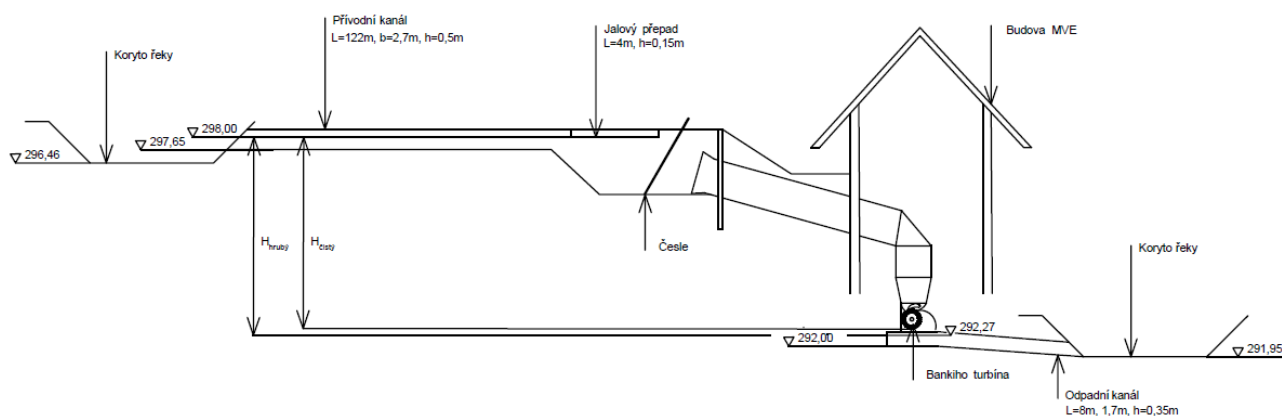
Tab. 2.5 – Hodnoty průtoků korytem



Graf 2.5 – Konzumpční křivka koryta

2.3 Předběžný návrh elektrárny

V této kapitole byly vypočítány průtoky a výšky hladin v různých místech MVE (přívodní kanál, odpadní kanál, koryto řeky atd.), které jsou důležitými faktory pro návrh parametrů turbíny, její umístění a výkon.



Obr. 2.12 – Schéma MVE

Nadmořská výška hladiny v přívodním korytě	$h_1=298,00$ m.n.m.
Nadmořská výška hladiny v odpadním kanále pro $Q=0,54$ m ³ /s	$h_2=292,27$ m.n.m.
Max. hltnost turbíny	$Q=0,54$ m ³ /s

Tab. 2.6 – Návrhové parametry MVE

2.3.1 Hrubý spád

Hrubý spád je výškový rozdíl mezi horní hladinou na začátku přívodního kanálu a dolní hladinou vody pod turbínou. Pro určení hrubého spádu se bude vycházet z geodetického zaměření a z plánovaných stavebních úprav. Výška dna na začátku přívodního kanálu je 297,65 m.n.m, přičemž projektovaná výška hladiny je 298,00 m.n.m. Výška dna kanálu pod turbínou bude 292,00 m.n.m a tedy výška hladina vody bude 292,27 m.n.m. [13] [14]

$$H_{\text{hrubý}} = h_1 - h_2 = 298,00 - 292,27 = 5,73 \quad [\text{m}] \quad (2.34)$$

2.3.2 Předpokládaný výkon a výroba elektrárny

Předpokládaný výkon turbíny

$$P = H_{\text{hrubý}} \cdot Q_{\text{turbíny}} \cdot g \cdot \eta_{\text{turbíny}} \quad [\text{kW}] \quad (2.35)$$

Kde:

$$\eta_{\text{turbíny}} \quad \text{předpokládaná účinnost turbíny} \quad \eta_{\text{turbíny}} = 86 \text{ [\%]}$$

$$P = 5,73 \cdot 0,54 \cdot 9,81 \cdot 0,86 = 26,1 \quad [\text{kW}] \quad (2.36)$$

Předpokládaná výroba elektrárny

$$E = H_{\text{hrubý}} \cdot Q_{\text{turbíny}} \cdot g \cdot \eta_{\text{soustrojí}} \cdot m_{\text{dny}} \cdot t \quad [\text{kWh}] \quad (2.37)$$

Kde:

$$\eta_{\text{soustrojí}} \quad \text{předpokládaná účinnost soustrojí (turbína, převodovka, generátor)}$$

$$\eta_{\text{soustrojí}} = 75 \text{ [\%]}$$

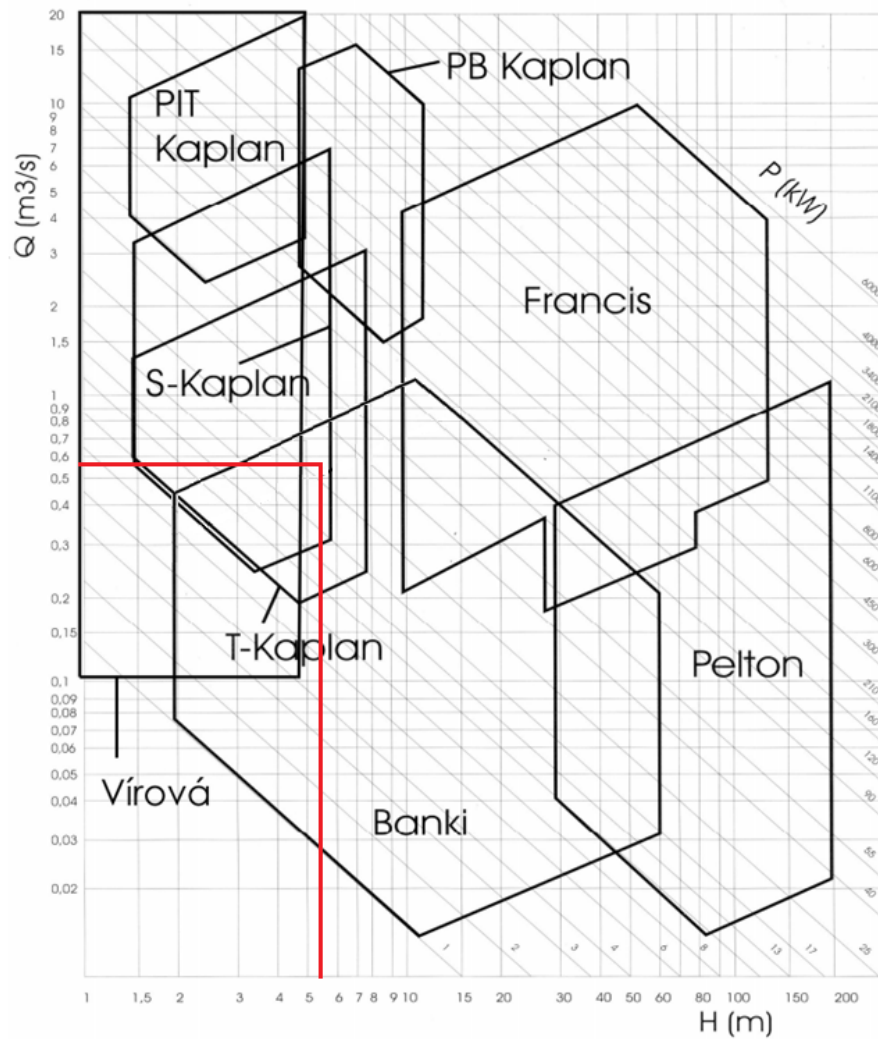
$$m_{\text{dny}} \quad \text{předpokládaný počet dní, kdy bude turbína v provozu} \quad m_{\text{dny}} = 180 \text{ [-]}$$

$$t \quad \text{počet hodin za den} \text{ [-]}$$

$$P = 5,73 \cdot 0,54 \cdot 9,81 \cdot 0,75 \cdot 180 \cdot 24 = 98,3 \quad [\text{MWh}] \quad (2.38)$$

2.3.3 Volba turbíny

Podle Q/H diagramu (obr. 2.13) může být pro spád 5,73 metru a průtok 0,54 m³/s použito několik typů turbín- např. Kaplanova, semi-Kaplanova, propelerová, šneková nebo Bánkiho turbína. [5]



Obr. 2.13 – Q/H diagram vodních turbín

Hrubý spád	$H_{\text{hrubý}}=5,73$ m
Roční výroba elektrárny	$P=98,3$ MWh
Max. hlnost turbíny	$Q=0,54$ m^3/s
Vhodné typy turbín	Kaplanova, semi-Kaplanova, propelerová, šneková, Bánkiho

Tab. 2.7 – Předběžné parametry MVE

3. Variantní řešení technologického vybavení s ohledem na návratnost investice

Při výstavbách MVE se v současné době využívají 2 druhy vodních turbín. Rovnotlaké (akční) turbíny a přetlakové (reakční) turbíny.

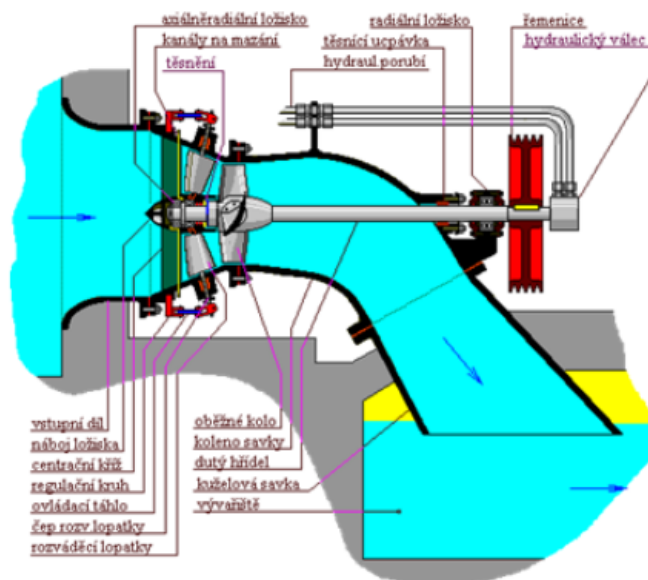
U rovnotlaké turbíny nedochází za oběžným kolem ke změně tlaku, zatímco u přetlakových turbín tlak za oběžným kolem klesá.

Rovnotlaké (akční) turbíny - Peltonova turbína
- Turgo turbína
- Bánkiho turbína

Přetlakové (reakční) turbíny - Francisova turbína
- Kaplanova turbína
- Vrtulová (propelerová) turbína

3.1 Kaplanova turbína

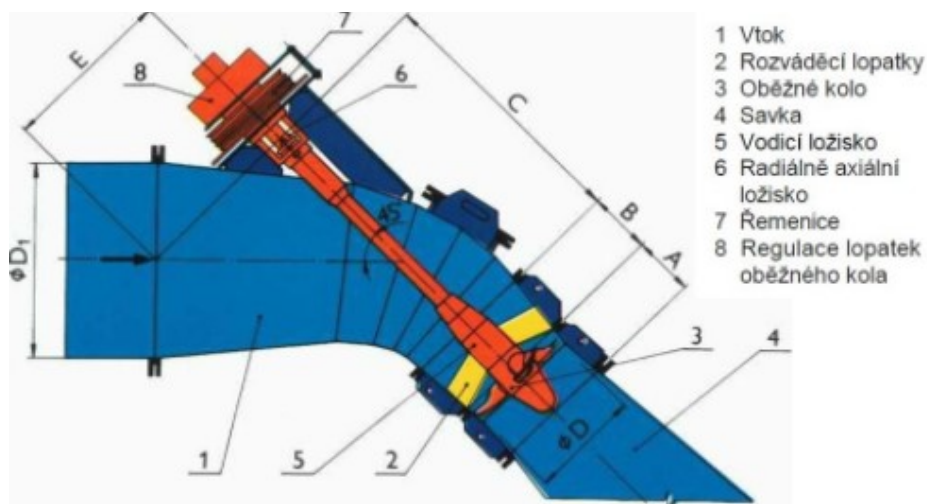
Kaplanova turbína je přetlaková axiální turbína, která se využívá na tocích, kde během roku není možné zajistit stálý spád nebo průtok. Kaplanova turbína se dá na takových tocích využít díky její velice dobré regulaci, a proto patří mezi nejčastěji používané stroje pro MVE. Je určena pro použití na tocích s malým spádem (od 1,5 do 7 metrů) o vysokých průtocích (od 0,2 m³/s do 20m³/s). Při optimálních podmínkách pracuje turbína s účinností 88 – 90%. Výhodou této turbíny je vysoká možnost regulovatelnosti. Turbína může být regulovaná natáčením nejen regulačních lopatek rozvaděče, ale i oběžného kola. Další výhodou jsou nízké náklady na stavební část. Kaplanova turbína má malou stavební výšku a proto je možné ji instalovat do menších budov v jezových pilířích nebo v jezových elektrárnách. Nevýhodou této turbíny je pak vysoká cena stroje a s ní i vysoké výdaje na údržbu a to hlavně u turbín, které jsou projektovány na malé spády. Tyto turbíny potřebují rozvaděče, které jsou finančně náročné. Dalšími nevýhodami jsou možnosti nárůstu hydraulických ztrát v savce z důvodu odtržení mezní vrstvy a nebezpečí vzniku kavitace. [6] [7] [8]



Obr. 3.1 – Schéma Kaplanovy turbíny

3.2 Semi-Kaplanova turbína

Semi-Kaplanova turbína získala svůj název podle charakteristického esovitého tvaru sací trouby. Stejně jako klasická Kaplanova turbína patří mezi jedny z nejčastěji používaných strojů pro malé spády. Používá se především u jezových a derivačních vodních děl. Hlavním rozdílem mezi semi-Kaplanovou turbínou a klasickou Kaplanovou je v konstrukci. Zatímco klasická má pohyblivé rozváděcí i oběžné kolo, semi-Kaplanova turbína má pohyblivé pouze kolo oběžné. Výsledkem jsou nižší regulační možnosti, které jsou ale stále větší, než kdyby byl pohyblivý pouze rozvaděč. [7] [8]



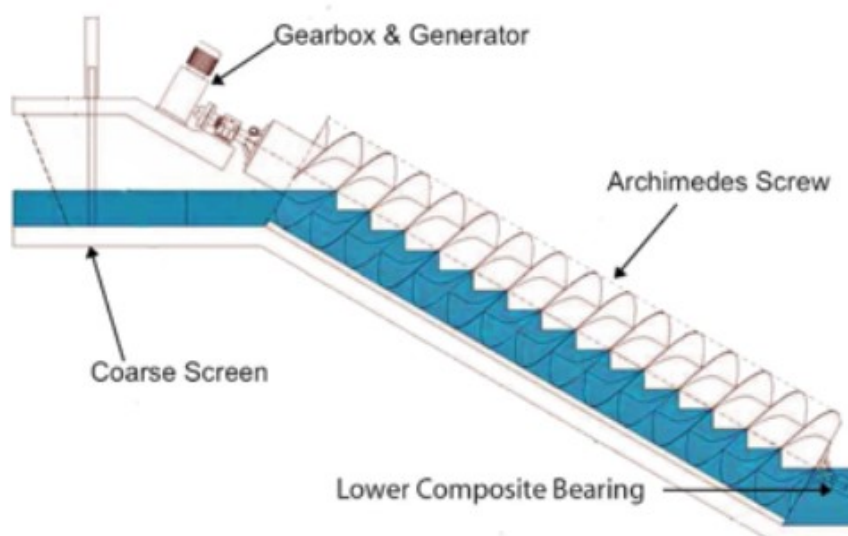
Obr. 3.2 – Schéma semi-Kaplanovy turbíny

3.3 Propelerová (vrtulová) turbína

Propelerová turbína je zmenšená a velice zjednodušená varianta Kaplanovy turbíny. Tento typ má pevné jak oběžné tak i rozváděcí lopatky. Turbínu tedy nelze vůbec regulovat, pouze celou odstavit pomocí hlavního uzávěru. Tento typ nedosahuje velkých výkonů a ani účinností. Využívají se pro dobíjení záložních akumulátorů, na pokrytí řídicí elektroniky při krátkých výpadcích proudu nebo jako spolehlivý záložní zdroj energie. [9]

3.4 Šneková (Archimedova) turbína

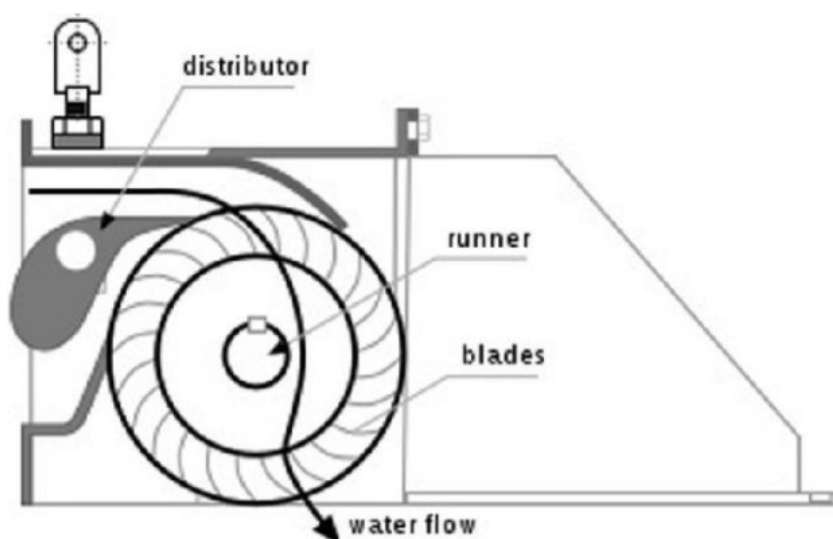
Šneková turbína transformuje potenciální energii vody na energii mechanickou. Volně přitékající voda z vodního toku vtéká kanálem do žlabu šnekové turbíny. Zde díky své hmotnosti začíná působit na plochu lopatek, které jsou skloněné pod určitým úhlem. Voda o určité hmotnosti zatěžuje šnekovnici a tím jí roztáčí. Na konci Archimedova šroubu voda vytéká ven. Výhodou této turbíny je uplatnění i u minimálních spádů (využitelnost už od 1 metru), nezávislost na množství protékající vody, vysoká spolehlivost a nízká pořizovací cena (v porovnání s klasickými turbínami). Nevýhodou je konstrukčně složitá výroba šnekové turbíny a rozsah použití (spád pouze do 6,5m a průtok do 6,5 m³/s). U šnekové turbíny je potřeba správně navrhnout výšku konce šroubu nad spodní hladinou. Při nízké hladině roste hluk stroje a při vysoké hladině klesá účinnost turbíny. [10] [11]



Obr. 3.3 – Schéma šnekové (Archimedovy) turbíny

3.4 Bánkiho turbína

Bánkiho turbína patří do kategorie rovnotlakých turbín. Jejím specifickým je dvojnásobný průtok vody přes lopatky, což se u žádné jiné turbíny neděje. Při prvním průtoku voda předá asi 79% celkového výkonu. Dále pokračuje přes prostor oběžného kola, odkud opět jde na lopatkovou mříž. Při druhém průtoku přes lopatky předá zbylých 21% celkového výkonu a odtéká buď přes savku, nebo přímo do odpadního kanálu. Regulace se dá realizovat pomocí klapky, která se nachází před prvním nátokem na lopatky. Pomocí regulační klapky lze turbínu i úplně zastavit. Používá se pro průtoky od 0,02 do 2 m³/s (maximálně až 9 m³/s) a pro spády od 2 do 30 metrů (maximálně až 200 metrů). Účinnost turbíny se pohybuje v rozsahu od 78 až do 86%. Výhodou turbíny je, že návrh i výroba jsou oproti ostatním turbínám značně jednodušší, nepotřebuje žádné speciální materiály a i při drobných nepřesnostech dává zaručený výsledek. Proto se tato turbína používá na tocích, kde by ostatní turbíny nedosáhly žádoucích parametrů, nebo by nebyly ekonomicky tak výhodné. Mezi výhody turbíny patří nulová náchylnost na kavitaci, výrazně okysličuje vodu, není citlivá na nečistoty ve vodě a vzhledem tomu, že veškerá ložiska jsou uložena mimo tok vody, může pracovat i s pitnou vodou bez jakéhokoliv rizika znečištění vody mazivou či oleji. Turbína se nehodí do lokalit, kde dochází k většímu vzestupu spodní hladiny, protože by docházelo k brodění turbíny. Turbína by pak musela být výše nad hladinou, ale tím by se zase snížila spádová výška a tím i výkon turbíny. [7] [8] [12]



Obr. 3.4 – Schéma Bánkiho turbíny

Výsledky zhodnocení investic u jednotlivých typů vodních turbín:

Šneková turbína

Výrobou šnekových turbín se zabývá slovenská firma KRAFT-ON Global, s.r.o.. Soustrojí obsahuje šnekovou turbínu o průměru rotoru 1650 mm a délky rotoru 12 000 mm (délka šnekovnice 10 280 mm), dolní a horní ložiskový domek, čepovou spojku, průmyslovou převodovku a trojfázový asynchronní generátor značky SIEMENS o výkonu 22kW. Bezpečnostní brzdu a řídicí rozvaděč. Cena soustrojí byla firmou vykalkulována na 62 000 eur, což je při současném kurzu (24. 4. 2018) ČNB **1,57 mil. Kč**.

Bánkiho turbína

Bánkiho turbína byla poptána u firmy Cink Hydro-Energy. Kompletní řešení stroje by se skládalo z turbíny s přibližným výkonem na hřídeli 24 kW a průměrným oběžným kolem 300 mm. Dalšími součástmi jsou rychlostní převod, asynchronní generátor o výkonu 21 kW, nízkonapěťový rozvaděč a řídicí systém s možností vzdálené správy. Cena zařízení by se pohybovala okolo **1,5 mil. Kč**.

Kaplanova turbína

Pro návrh Kaplanovy turbíny byla oslovena firma Strojní dílna Žákovec s.r.o.. Technologie stroje by se skládala z horizontální spirální Kaplanovy turbíny s oběžným kolem o průměru 360 mm, asynchronního generátoru o výkonu 22 kW, z hydraulického ovládání a automatického řízení. Celková cena zařízení by byla **2, 12 mil. Kč**.

3.5 Volba turbíny

Pro danou lokalitu je zvolen jako nejvhodnější stroj Bánkiho turbína. Tato turbína byla vybrána jak z důvodu lokality, kam má být instalována, tak i z konstrukčního a finančního hlediska. Jak už bylo napsáno v kapitole 3.4, její konstrukce je velice jednoduchá, což je pro případný servis rozhodující. Pro posouzení investic bylo osloveno několik firem zabývajících se výrobou konkrétních vodních turbín. Bánkiho turbína vyšla i po finanční stránce jako nejpříjemnější varianta.

4. Návrh parametrů turbíny

4.1 Určení čistého spádu

4.1.1 Čistý spád

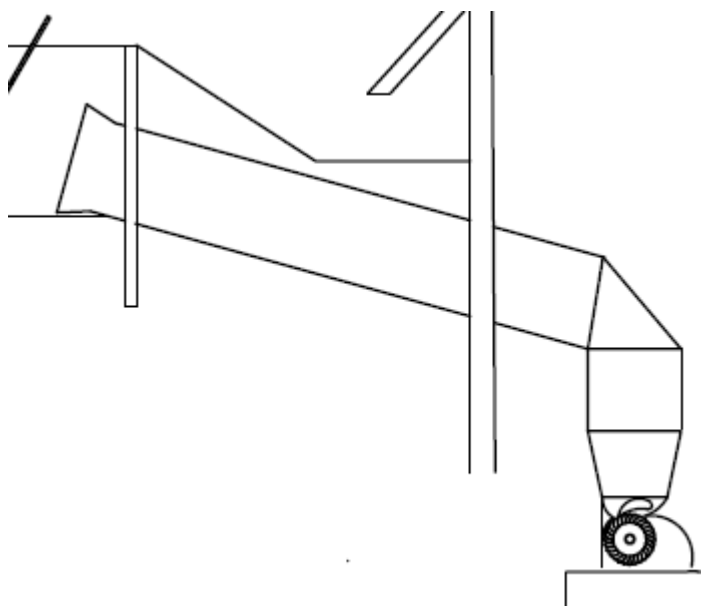
Čistý spád není pouze výškový rozdíl dvou hladin, ale je potřeba do něj započítat veškeré ztráty, které by mohly mít vliv na celkovou energii vody na turbíně. Mezi ztráty řadíme: [13] [14]

4.1.2 Pokles hladiny za česlemi

Ze zkušeností a z literatury je stanoveno, že ztrátová výška za česlemi bude 5 cm. [13]

4.1.3 Ztráty v potrubí

Při průtoku vody potrubím bude docházet ke ztrátám, které se podepíší na velikosti ztrátové výšky. Objekty, které způsobují ztráty jsou: kónické zúžení na vstupu do potrubí, ztráta změnou směru a opět kónickým zúžením. Tentokrát v přechodové součásti z kruhového na obdélníkový průřez. [15]



Obr. 4.1 – Schéma příváděcího potrubí

Rychlost vody v příváděcím potrubí by z bezpečnostních důvodů vzhledem k materiálu potrubí neměla přesahovat 1 m/s. Proto je zvoleno potrubí o vnitřním průměru DN 870.

Rychlost vody v potrubí o průměru 870 mm:

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{0,54}{0,59} = 0,9 \quad [\text{m/s}] \quad (4.1)$$

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,87^2}{4} = 0,59 \quad [\text{m}^2] \quad (4.2)$$

Kde:

Q průtok v potrubí [m³/s]

S plocha průřezu potrubí [m²]

D průměr potrubí [m]

Místní ztráta na vtoku do potrubí kónickým zúžením:

$$Z_{\text{kz}} = \xi_{\text{kz}} \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g} = 0,06 \cdot \frac{0,9^2}{2 \cdot 9,81} = 0,0025 \text{ [m]} = 0,25 \text{ [cm]} \quad (4.3)$$

Kde:

ξ_{kz} součinitel místní ztráty kónického zúžení [-]

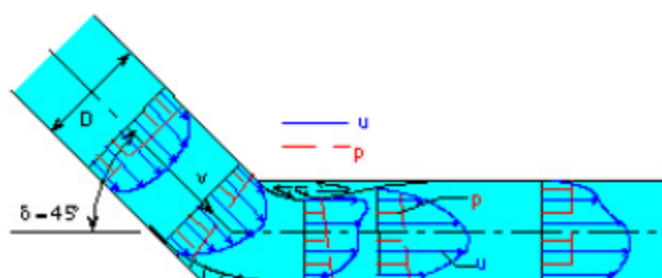
v rychlost [m/s]

g tíhové zrychlení $g=9,81$ [m/s²]

2·δ	5°	7°	10°	20°	30°	60°
ξ_{kz}	0.06	0.12	0.16	0.20	0.24	0.32

Tab. 4.1 - Hodnoty součinitele místní ztráty kónickým zúžením

Místní ztráta změnou směru:



Obr. 4.2 – Schéma změny směru potrubí

$$Z_{zs} = \xi_{zs} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = 0,24 \cdot \frac{0,9^2}{2 \cdot 9,81} = 0,01 \text{ m} = 1 \text{ [cm]} \quad (4.4)$$

Kde:

ξ_{zs} Součinitel místní ztráty změnou směru [-]

δ	15	30	45	60	90
ξ_{os} – hladká potrubí	0.04	0.13	0.24	0.47	1.13
ξ_{os} – drsná potrubí	0.06	0.17	0.32	0.68	1.27

Tab. 4.2 - Hodnoty součinitele místní ztráty změnou směru

Místní ztráta kónickým zúžením na výstupu z potrubí:

$2 \cdot \delta$	5°	7°	10°	20°	30°	60°
ξ_{kz}	0.06	0.12	0.16	0.20	0.24	0.32

Tab. 4.3 - Hodnoty součinitele místní ztráty kónickým zúžením

$$Z_{kz} = \xi_{kz} \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g} = 0,24 \cdot \frac{0,9^2}{2 \cdot 9,81} = 0,009 \text{ m} = 0,9 \text{ [cm]} \quad (4.5)$$

Celková tlaková ztrátová výška:

$$Z_{ztr.tlak} = Z_{kz} + Z_{kz} + Z_{zs} = 0,25 + 0,9 + 1 = 2,15 \quad [\text{cm}] \quad (4.6)$$

4.1.4 Výška turbíny nad spodní vodou

Ztrátová výška turbíny nad hladinou bude 0,1 metru. Tento rozměr je dostatečně velký na to, aby se turbína ve vodě nebrodila. Turbína bude umístěna ve výšce 0,42 metru ode dna koryta řeky v bodě, kde se vlévá voda z odpadního kanálu do řeky. V případě, že by nastala velká voda a hladina vody v korytě řeky stoupla, nebude chod turbíny téměř ovlivněn. Aby se musela turbína odstavit z důvodu brodění ve vodě, musel by být v korytě řeky průtok větší než 4,91 m³/s, což podle obdržných statistik o povodí řeky není ani jeden celý den v roce.

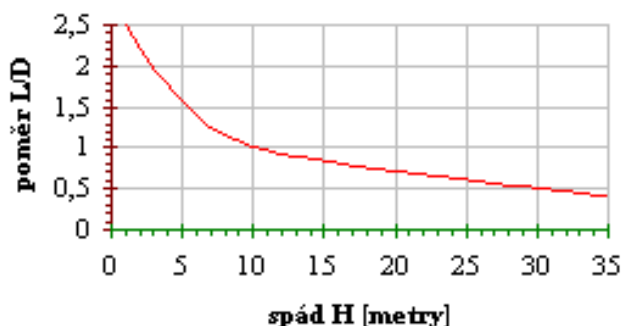
Výpočet čistého spádu:

$$H_{\text{čistý}} = H_{\text{hrubý}} - H_{ztr.česle} - H_{ztr.tlak.} - H_{ztr.turbíny} \quad (4.7)$$

$$H_{\text{čistý}} = 5,73 - 0,05 - 0,0215 - 0,1 = 5,56 \quad [\text{cm}] \quad (4.8)$$

4.2 Výpočet parametrů turbíny

Pro výpočet parametrů turbíny je potřeba zvolit vhodný poměr mezi délkou (L) a průměrem (D) oběžného kola. Poměr L/D bude dále označován jako k_{ld} , tento součinitel je závislý na velikosti spádu, protože je omezený pevností lopatek. [16] [17]



Graf 4.1 – Graf závislosti součinitele k_{ld} na spádu

Z grafu vyplývá, že hodnota součinitele pro spád 5,56 metru je $k_{ld} = 1,2$.

Rychlost vstupní vody:

$$c_1 = C \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad [\text{m/s}] \quad (4.9)$$

Kde:

C pro správný počet tenkých a hladkých lopatek $C=0,98$ [-]

$$c_1 = 0,98 \cdot \sqrt{19,62 \cdot 5,56} = 10,2 \quad [\text{m/s}] \quad (4.10)$$

Plocha štěrby:

$$a = \frac{Q}{c_1} = \frac{0,54}{10,2} = 0,053 \quad [\text{m}^2] \quad (4.11)$$

Největší otevření štěrby:

Pro výpočet je potřeba stanovit koeficient ostříku $k_{ostř}$. Pro současné moderní turbíny se volí koeficient ostříku $k_{ostř} = 0,3$.

$$s = 1000 \cdot \sqrt{\frac{a \cdot k_{ostř}}{k_{ld}}} = 1000 \cdot \sqrt{\frac{0,053 \cdot 0,3}{1,2}} = 115 \quad [\text{mm}] \quad (4.12)$$

Vnější průměr oběžného kola:

$$D = \frac{s}{k_{ostř}} = \frac{115}{0,3} = 383 \quad [\text{mm}] \quad (4.13)$$

Vnitřní průměr kola, na kterém končí vnitřní hrana lopatek:

$$d_2 = D \cdot 0,66 = 383 \cdot 0,66 = 253 \quad [\text{mm}] \quad (4.14)$$

Délka štěrby:

$$L = D \cdot k_{ld} = 383 \cdot 1,2 = 460 \quad [\text{mm}] \quad (4.15)$$

Délka lopatky:

$$L_2 = L + 10 = 460 + 10 = 470 \quad [\text{mm}] \quad (4.16)$$

Světlost trubky:

$$DN = 0,326 \cdot D - 2 \cdot tl = 0,326 \cdot 383 - 2 \cdot 6,3 = 112 \quad [\text{mm}] \quad (4.17)$$

Lopatky turbíny se vyrábí z normalizovaného potrubí. Obvykle se používá výseč potrubí o úhlu 75°. Na základě výpočtu budou lopatky vyrobeny z bezešvé hladké kruhové trubky s vnějším průměrem trubky 127 mm a tloušťkou stěny 6,3 mm.

Jmenovité otáčky turbíny:

$$n_{ot} = g \cdot 1000 \cdot \frac{c_1}{D} = 9,81 \cdot 1000 \cdot \frac{10,5}{383} = 261 \quad [\text{ot/min}] \quad (4.18)$$

Přibližný průměr hřídele:

$$d_h = 160 \cdot \sqrt[3]{\frac{H \cdot Q}{75 \cdot n_{ot}}} = 160 \cdot \sqrt[3]{\frac{5,56 \cdot 0,54 \cdot 1000}{75 \cdot 273}} = 84 \quad [\text{mm}] \quad (4.19)$$

Výkon turbíny:

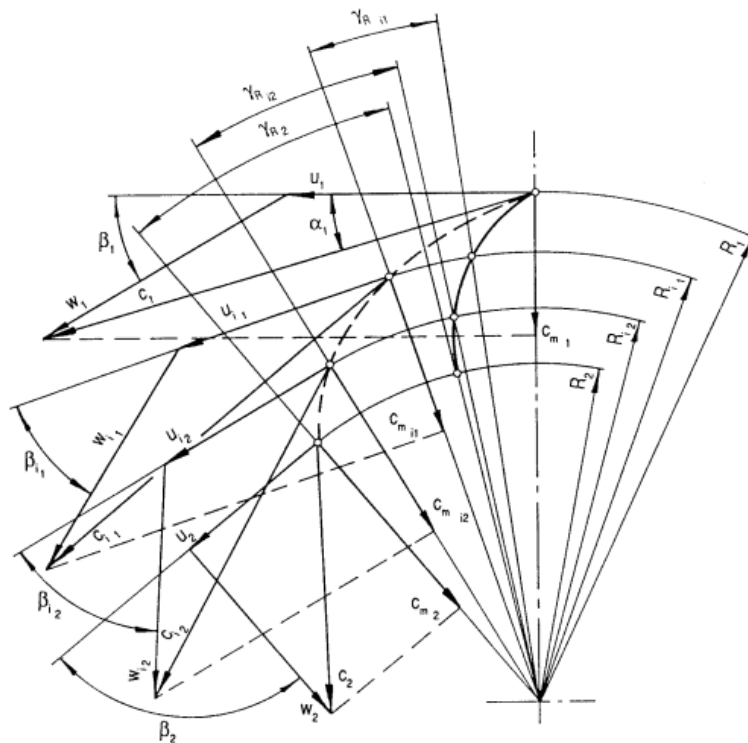
$$P = g \cdot H \cdot Q \cdot \eta = 9,81 \cdot 5,56 \cdot 0,54 \cdot 0,86 = 25,33 \quad [\text{kW}] \quad (4.20)$$

Parametr	Hodnota
P	25,33 kW
n_{ot}	273 ot/min
D	383 mm
d_2	253 mm
L	460 mm
L_2	470 mm
s	115 mm
DN	112 mm
d_h	84 mm
c_1	10,2 m/s
a	0,053 m ²

Tab. 4.4 – Souhrn výsledných parametrů turbíny

4.3 Výpočet průtokové dráhy tekutiny v oběžném kole:

Průtokovou dráhu oběžným kolem lze určit pomocí rychlostních trojúhelníků. Aby bylo možné zjistit přesný výstupní bod proudu, je potřeba vypočítat velikost úhlu otočení prvního stupně oběžného kola. Pro výpočet je první stupeň oběžného kola rozdělen na 4 části (R_1, R_2, R_3, R_4). [17]



Obr. 4.3 – Schéma rychlostních trojúhelníků

Výpočet obvodové rychlosti:

$$u_{1opt} = \frac{c_1 \cdot \cos\alpha_1}{2} = \frac{10,2 \cdot \cos(16)}{2} = 4,90 \quad [\text{m/s}] \quad (4.21)$$

Kde:

α_1 úhel vstupu tekutiny do oběžného kola $\alpha_1=16$ $[\text{°}]$

c_1 vstupní rychlost tekutiny do oběžného kola (vzorec 4.10) $[\text{m/s}]$

Výpočet obvodové rychlosti v libovolném bodě:

$$u_i = u_1 \cdot \frac{R_i}{R_1} \quad [\text{m/s}] \quad (4.22)$$

Kde:

R_i poloměr oběžného kola v libovolném bodě $[\text{mm}]$

R_1 vnější poloměr oběžného kola $[\text{mm}]$

$$u_2 = u_1 \cdot \frac{R_2}{R_1} = 4,90 \cdot \frac{337}{383} = 4,31 \quad [\text{m/s}] \quad (4.23)$$

Výpočet relativní rychlosti:

$$w_{1opt} = \frac{u_1}{\cos\beta_1} = \frac{4,90}{\cos(30)} = 5,65 \quad [\text{m/s}] \quad (4.24)$$

Kde:

β_1 úhel natočení lopatek na vnějším obvodu oběžného kola $\beta_1 = 30$ $[\text{°}]$

Výpočet relativní rychlosti v libovolném bodě:

$$w_i = \sqrt{w_1^2 - u_1^2 + u_i^2} \quad [\text{m/s}] \quad (4.25)$$

$$w_2 = \sqrt{5,65^2 - 4,90^2 + 4,31^2} = 5,05 \quad [\text{m/s}] \quad (4.26)$$

substituce

$$\kappa = w_1^2 - u_1^2 = 5,65^2 - 4,90^2 = 7,91 \quad [-] \quad (4.27)$$

Výpočet relativního úhlu rychlosti v libovolném bodě:

$$\beta_i = \arcsin \frac{\sin \beta_1 \cdot u_1^2}{u_i^2} \quad [^\circ] \quad (4.28)$$

$$\beta_2 = \arcsin \frac{\sin(30) \cdot 4,90^2}{4,31^2} = 40,26 \quad [^\circ] \quad (4.29)$$

substituce

$$\lambda = \sin \beta_1 \cdot u_1^2 = \sin(30^\circ) \cdot 4,90^2 = 12,00 \quad [-] \quad (4.30)$$

Výpočet absolutní rychlosti v libovolném bodě:

$$c_{mi} = w_i \cdot \sin \beta_1 \quad [-] \quad (4.31)$$

$$c_{m1} = w_1 \cdot \sin \beta_1 = 5,65 \cdot \sin(30^\circ) = 2,83 \quad [\text{m/s}] \quad (4.32)$$

Výpočet střední hodnoty absolutní rychlosti v libovolném bodě:

$$\bar{c}_{mi} = \frac{1}{u_1 - u_i} \cdot \int_{u_i}^{u_1} \frac{\lambda \sqrt{\kappa \cdot u_i^2}}{u_i^2} \cdot du_i \quad (4.33)$$

aby mohla být rychlost vypočtena, je prvně potřeba vyřešit Simpsonovu formuli

Simpsonova formule:

$$\int_a^b y dx = \frac{b-a}{3 \cdot n} \cdot (y_a + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + 2y_4 + \dots + 2y_{n-1} + 4y_{n-2} + y_b) \quad (4.34)$$

(n=2k; k ∈ N)

Kde:

$$a = u_i \quad y_a = c_{mi}$$

$$b = u_1 \quad y_b = c_{m1}$$

$$n \quad \text{počet sekcí (n=4)}$$

dělení intervalů obvodových rychlostí u_1 do u_2 do čtyř sekcí (n)

$$u_{i1} = u_{y_a} = 4,27 \quad [\text{m/s}] \quad (4.35)$$

$$u_{y1} = 4,42 \quad [\text{m/s}] \quad (4.36)$$

$$u_{y2} = 4,56 \quad [\text{m/s}] \quad (4.37)$$

$$u_{y3} = 4,71 \quad [\text{m/s}] \quad (4.38)$$

$$u_1 = u_{y_b} = 4,90 \quad [\text{m/s}] \quad (4.39)$$

Výpočet hodnot y pro každou hodnotu u_y

$$y_a = c_{mi} = \frac{\lambda \sqrt{\kappa \cdot u_{y_a}^2}}{u_{y_a}^2} \quad [-] \quad (4.40)$$

$$y_a = c_{m2} = \frac{12,00 \cdot \sqrt{7,91 \cdot 4,27^2}}{4,27^2} = 3,29 \quad [-] \quad (4.41)$$

$$y_1 = 3,15 \quad [-] \quad (4.42)$$

$$y_2 = 3,03 \quad [-] \quad (4.43)$$

$$y_3 = 2,91 \quad [-] \quad (4.44)$$

$$y_b = c_{m1} = 2,80 \quad [-] \quad (4.45)$$

Výpočet Simpsonovy formule

$$\int_a^b y dx = \frac{4,85 - 4,27}{3 \cdot 4} \cdot (3,29 + 4 \cdot 3,15 + 2 \cdot 3,03 + 4 \cdot 2,91 + 2,80) \quad (4.46)$$

$$\int_a^b y dx = 1,76 \quad (4.47)$$

Výpočet střední hodnoty absolutní rychlosti

$$\overline{c_{m2}} = \frac{1}{u_1 - u_2} \cdot \int_{u_2}^{u_1} \frac{\lambda \sqrt{\kappa \cdot u_2^2}}{u_2^2} \cdot d_{u_2} \quad [\text{m/s}] \quad (4.48)$$

$$\overline{c_{m2}} = \frac{1}{4,90 - 4,31} \cdot 1,76 = 3,03 \quad [\text{m/s}] \quad (4.49)$$

Výpočet úhlu rotace oběžného kola během pohybu tekutiny od začátku po konec lopatky:

$$\gamma_i = \frac{\left[1 \cdot \left(\frac{R_i}{R_1}\right)\right] \cdot u_1 \cdot 360^\circ}{\bar{c}_{m2} \cdot 2 \cdot \pi} \quad [^\circ] \quad (4.50)$$

$$\gamma_2 = \frac{\left[1 \cdot \left(\frac{R_2}{R_1}\right)\right] \cdot u_1 \cdot 360^\circ}{\bar{c}_{m2} \cdot 2 \cdot \pi} \quad (4.51)$$

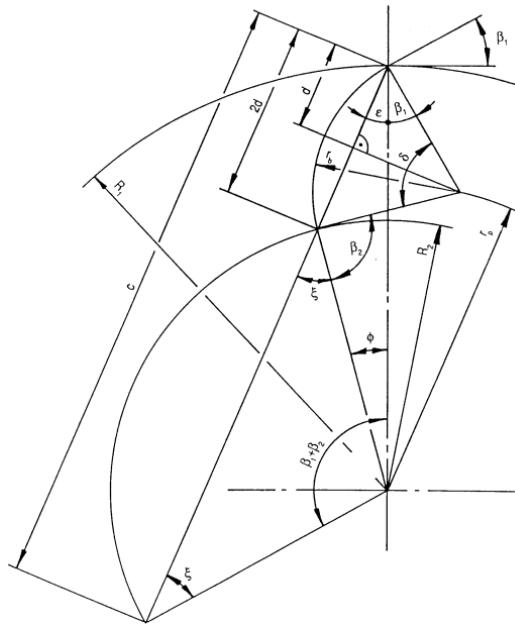
$$\gamma_2 = \frac{\left[1 \cdot \left(\frac{337}{385}\right)\right] \cdot 4,90 \cdot 360^\circ}{3,03 \cdot 2 \cdot 3,14} = 10,95 \quad [^\circ] \quad (4.52)$$

R [mm]	c_i [m/s]	w_i [m/s]	u_i [m/s]	β_i [°]	c_{mi} [m/s]	$\int_{u_i}^{u_1}$	\bar{c}_{m1} [m/s]	γ_i [°]
$R_1=383$	10,20	5,65	4,90	30,00	2,83	-	-	-
$R_2=337$	9,01	5,05	4,31	40,26	3,32	1,81	3,06	10,95
$R_3=295$	7,58	4,70	3,77	57,64	3,97	3,77	3,33	19,37
$R_4=253$	5,38	4,29	3,24	90,00	4,90	5,98	3,60	26,45

Tab. 4.5 – Hodnoty rychlostí a úhlů

4.4 Návrh geometrie lopatek

Aby bylo možné navrhnout správné oběžné kolo, je potřeba určit ideální geometrii lopatek. Jak bylo navrženo v předchozí kapitole (kap. 4.2), lopatky budou vyráběné z kruhové trubky o vnějším průměru 127mm s světlostí 6,3mm. Lopatky budou začínat na vnějším obvodu oběžného kola s poloměrem $R_1=191,5$ mm pod úhlem $\beta_1=30^\circ$ a končit budou na obvodu o poloměru $R_2=126,5$ mm a pod úhlem $\beta_2=90^\circ$. [17]



Obr. 4.4 – Schéma konstrukce geometrie lopatek

Výpočet vzdálenosti c:

$$c = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \cos(\beta_1 + \beta_2)} \quad [\text{mm}] \quad (4.53)$$

$$c = \sqrt{191,5^2 + 126,5^2 - 2 \cdot 191,5 \cdot 126,5 \cdot \cos(30 + 90)} = \quad (4.54)$$

$$c = 277,30 \quad [\text{mm}] \quad (4.55)$$

Výpočet úhlu ϵ :

$$\epsilon = \arcsin \cdot \left[\frac{R_2 \cdot \sin(\beta_1 + \beta_2)}{c} \right] \quad [^\circ] \quad (4.56)$$

$$\epsilon = \arcsin \cdot \left[\frac{126,5 \cdot \sin(30 + 90)}{277,30} \right] \quad (4.57)$$

$$\epsilon = 23,27 \quad [^\circ] \quad (4.58)$$

Výpočet úhlu ξ :

$$\xi = 180^\circ - (\beta_1 + \beta_2 + \varepsilon) \quad [^\circ] \quad (4.59)$$

$$\xi = 180^\circ - (30^\circ + 90^\circ + 23,27^\circ) = \quad (4.60)$$

$$\xi = 36,73 \quad [^\circ] \quad (4.61)$$

Výpočet úhlu ϕ :

$$\phi = \beta_1 + \beta_2 - (180^\circ - 2 \cdot \xi) \quad [^\circ] \quad (4.62)$$

$$\phi = 30 + 90 - (180^\circ - 2 \cdot 36,73) = \quad (4.63)$$

$$\phi = 13,46 \quad [^\circ] \quad (4.64)$$

Výpočet vzdálenosti d :

$$d = \frac{R_1 \cdot \sin \phi}{2 \cdot \sin(180^\circ - \xi)} \quad [\text{mm}] \quad (4.65)$$

$$d = \frac{191,5 \cdot \sin(13,46)}{2 \cdot \sin(180^\circ - 36,73)} = \quad (4.66)$$

$$d = 37,27 \quad [\text{mm}] \quad (4.67)$$

Výpočet úhlu δ :

$$\delta = 180^\circ - 2 \cdot (\beta_1 + \varepsilon) \quad [^\circ] \quad (4.68)$$

$$\delta = 180^\circ - 2 \cdot (30 + 23,23) = \quad (4.69)$$

$$\delta = 73,46 \quad [^\circ] \quad (4.70)$$

Výpočet vzdálenosti r_b :

$$r_b = \frac{d}{\cos(\beta_1 + \varepsilon)} \quad [\text{mm}] \quad (4.71)$$

$$r_b = \frac{37,27}{\cos(30 + 23,25)} = \quad (4.72)$$

$$r_b = 62,29 \quad [\text{mm}] \quad (4.73)$$

Výpočet vzdálenosti r_p :

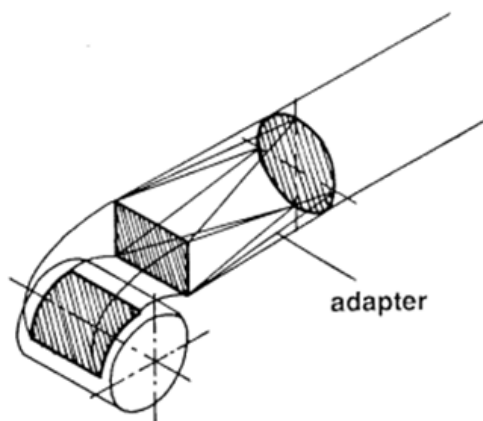
$$r_p = \sqrt{r_b^2 + R_1^2 - 2 \cdot r_b \cdot R_1 \cdot \cos\beta_1} \quad [\text{mm}] \quad (4.74)$$

$$r_p = \sqrt{62,29^2 + 191,5^2 - 2 \cdot 62,29 \cdot 191,5 \cdot \cos(30)} = \quad (4.75)$$

$$r_p = 141,04 \quad [\text{mm}] \quad (4.76)$$

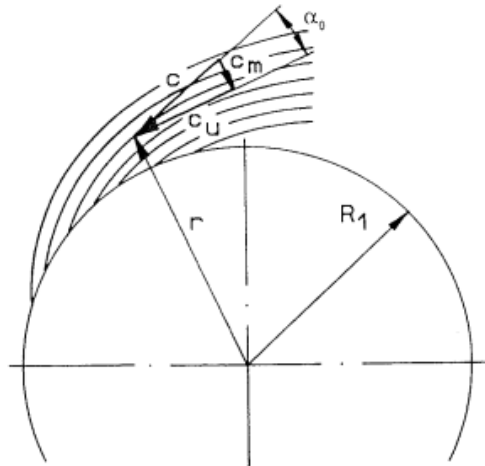
4.5 Návrh vstupní křivky turbíny

Voda přiváděná na oběžné kolo prochází nejprve potrubím kruhového průřezu, poté přechodem, kde je průřez transformován z kruhového na obdélníkový, a následně skříní turbíny (obr. 4.5).



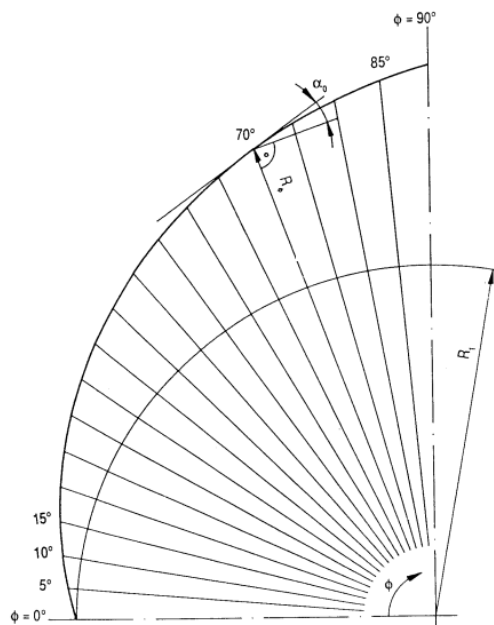
Obr. 4.5 – Průřezy profilů potrubí

Před nátokem tekutiny do oběžného kola musí být tok ještě jednou transformován tak, aby každá čára proudnice (obr. 4.6) splňovala specifické vstupní podmínky (správná absolutní rychlost c_0 a správný absolutní vstupní uhel α_0). [17]



Obr. 4.6 – Znárodnění proudění na vstupu do oběžného kola

Výpočet tvaru křivky turbíny:



Obr. 4.7 – Návrh vstupní křivky

Převod stupňů na radiány:

$$\text{rad} = \frac{\text{deg} \cdot \pi}{180^\circ} = \frac{5 \cdot 3,14}{180} = 0,087 \quad [^\circ] \quad (4.77)$$

Výpočet koeficientu odklonění od oběžného kola:

$$r_\phi = e^{\tan\alpha_0 \cdot \phi(\text{rad.})} \quad [-] \quad (4.78)$$

$$r_\phi = e^{\tan(5) \cdot 0,087} = 1,025 \quad [-] \quad (4.79)$$

Výpočet vzdálenosti křivky od středu oběžného kola:

$$R_\phi = r_\phi \cdot R_i = 1,025 \cdot 191,5 = 196,3 \quad [\text{mm}] \quad (4.80)$$

$360^\circ = 2\pi$		$r_\phi = e^{\tan\alpha_0 \cdot \phi(\text{rad.})}$	$r_\phi \cdot R_i$
deg.	ϕ rad.	r_ϕ	R_ϕ
0	0	1,000	191,5
5	0,087	1,025	196,3
10	0,175	1,051	201,3
15	0,262	1,078	206,4
20	0,349	1,105	211,6
25	0,436	1,133	217,0
30	0,524	1,162	222,5
35	0,611	1,191	228,1
40	0,698	1,222	234,0
45	0,785	1,253	239,9
50	0,873	1,284	245,9
55	0,960	1,317	252,2
60	1,047	1,350	258,5
65	1,222	1,384	265,0
70	1,222	1,420	271,9
75	1,309	1,455	278,6
80	1,396	1,492	285,7
85	1,484	1,530	293,0
90	1,571	1,569	300,5

Tab. 4.6 – Výsledné rozměry křivky

5. Energetické, ekonomické a environmentální zhodnocení vybrané varianty

5.1 Energetické zhodnocení

5.1.1 Určení účinnosti turbíny

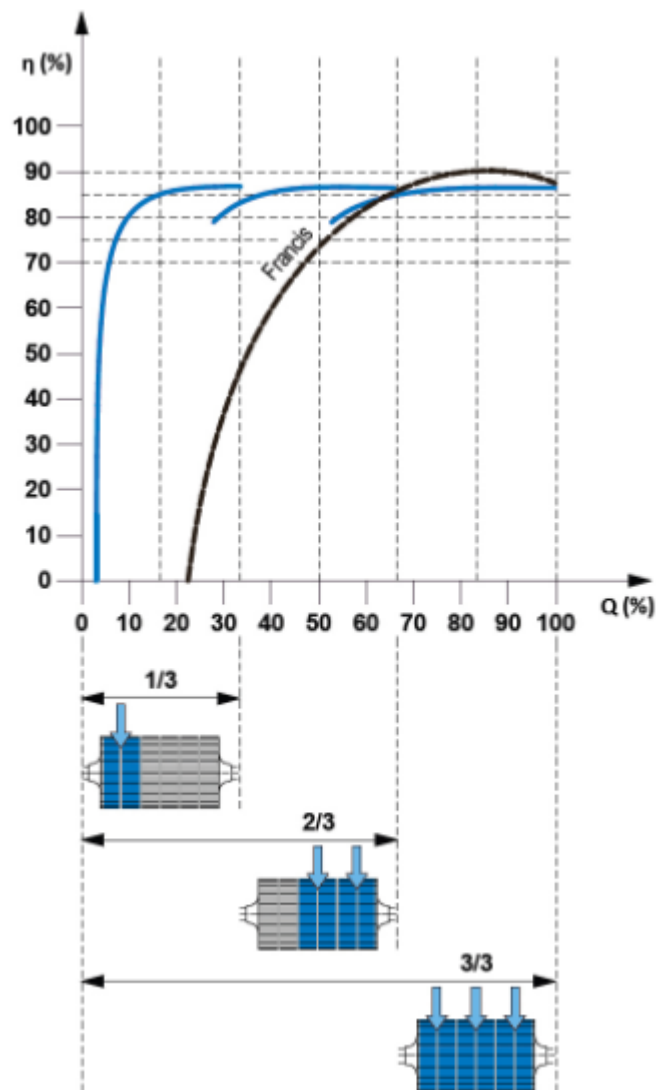
Účinnost Bánkiho turbíny není konstantní, ale je závislá na velikosti průtoku, který je na turbíně (hltnost turbíny). Aby se z grafu (graf 5.1) mohla odečíst účinnost, musí se prvně vypočítat poměr mezi maximálním a aktuálním průtokem.

Výpočet aktuální hltnosti turbíny

Turbína je pro lepší účinnost regulovaná 2 lopatkami. Proud může protékat přes regulační lopatku č.1, která má hltnost 1/3 z maximálního průtoku, přes regulační lopatku č. 2, která má hltnost 2/3 z maximálního průtoku, nebo přes obě lopatky, kdy může být dosaženo maximálního průtoku turbíny (viz graf č. 5.1).

$$Q_T = \frac{Q_{\text{kanálu}}}{Q_{\text{kanálu,max}}} = \frac{0,54}{0,54} = 1 \quad [-] = 100 \quad [\%] \quad (5.1)$$

Nyní lze z grafu vyčíst, že při 100% hltnosti turbína pracuje s účinností 86%.



Graf 5.1 – Účinnostní charakteristika Bánkiho turbíny

5.1.2 Výpočet okamžitého výkonu

Pro výpočet je potřeba zvolit vhodný asynchronní motor a k němu řemenový převod. Přenos krouticích momentů mezi hřídelí turbíny a hřídelí generátoru bude zajištěn ozubeným řemenem. Účinnost ozubeného řemenu je 97%.

Dalším důležitým strojem pro výpočet a celkově pro celý význam soustrojí je asynchronní generátor, který vyrábí elektrickou energii. Bude se jednat o 8- pólový elektromotor značky SIEMENS typu IE3 s vysokou účinností.

Standardní motory SIMOTICS GP/SD

Motory s vysokou účinností (Premium Efficiency) IE3

IE3

Motory s vlastním resp. s cizím chlazením · Litinové řady 1LE1503/1LE1603 Basic/Performance Line

Volba a objednávání

P _N	P _N	Velikost	Provozní hodnoty při jmenovitém výkonu										Litinové řady		m _{M83}	J	Momentová třída				
			η _N	M _N	IE třída		η _N	η _N	η _N	cos φ _N	I _N	M _N	I _N	M _N				L _{p/A}	L _{WA}	1LE1603 - Performance L	Objednací číslo
50 Hz/ P50	60 Hz/ P60 ¹⁾		50 Hz	50 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz
kW	kW		min ⁻¹	Nm			%	%	%	A											
• Chlazení: vlastní chlazení (IC 411), resp. se zkráceným označením F90 cizí chlazení bez vnějšího ventilátoru a krytu ventilátoru (IC 418) • Účinnost: vysoká účinnost IE3 (Premium Efficiency), servisní faktor (SF) 1,15 • Izolační systém: tepelná třída 155 (F), využití na tepelnou třídu 130 (B), ochrana krytem IP55 8-pólové: 750 min ⁻¹ při 50 Hz, 900 min ⁻¹ při 60 Hz ¹⁾																					
11	13,2	180 L	725	145	IE3	IE3	88,6	89,7	89,6	0,74	24	2,1	5,1	2,4	61	74	▲ 1LE1 6 03-1ED4	■	190	0,267	16
15	18	200 L	730	196	IE3	IE3	89,6	90,1	89,4	0,73	33,5	3	6,8	3,7	57	70	▲ 1LE1 6 03-2AD5	■	255	0,420	16
18,5	22	225 S	732	241	IE3	IE3	90,1	90,6	90	0,75	39,5	2,5	5,9	3	56	70	▲ 1LE1 6 03-2BD0	■	270	0,50	13
22	26,5	225 M	732	287	IE3	IE3	90,6	91,4	91,2	0,77	45,5	2,6	5,9	2,9	56	70	▲ 1LE1 6 03-2BD2	■	280	0,55	13
30	36	250 M	735	390	IE3	IE3	91,3	91,8	91,5	0,79	60	2,6	6,1	3	60	74	▲ 1LE1 6 03-2CD2	■	370	0,86	13
37	44,5	280 S	736	480	IE3	IE3	91,8	92,5	92,4	0,78	75	2,3	5,4	2,4	63	77	▲ 1LE1 6 03-2DD0	■	460	1,1	13
45	54	280 M	738	582	IE3	IE2	92,2	92,8	92,6	0,8	88	2,5	5,9	2,5	65	79	▲ 1LE1 6 03-2DD2	■	550	1,6	13
55	66	315 S	740	710	IE3	IE3	92,5	92,9	92,6	0,81	106	2,3	6	2,7	66	81	▲ 1LE1 6 03-3AD0	■	650	2,0	13
75	90	315 M	738	970	IE3	IE3	93,1	93,5	93,3	0,81	144	2,3	5,9	2,7	69	84	▲ 1LE1 6 03-3AD2	■	720	2,5	13
90	108	315 L	740	1161	IE3	IE3	93,4	94,2	94,3	0,83	168	2,2	5,8	2,5	71	85	▲ 1LE1 6 03-3AD4	■	860	3,1	13
110	132	315 L	740	1419	IE3	IE3	93,7	94,2	94,1	0,82	205	2,7	6,7	2,9	74	88	▲ 1LE1 6 03-3AD5	■	980	3,9	13
132	158	315 L	740	1703	IE3	IE3	94	94,4	94,1	0,81	250	2,9	7,2	3,3	76	90	▲ 1LE1 6 03-3AD6	■	1160	4,6	16

Obr. 5.1 - Přehled charakteristik elektromotoru

Výpočet okamžitého výkonu:

$$P = Q \cdot h \cdot g \cdot \eta_T \cdot \eta_R \cdot \eta_G \quad (5.2)$$

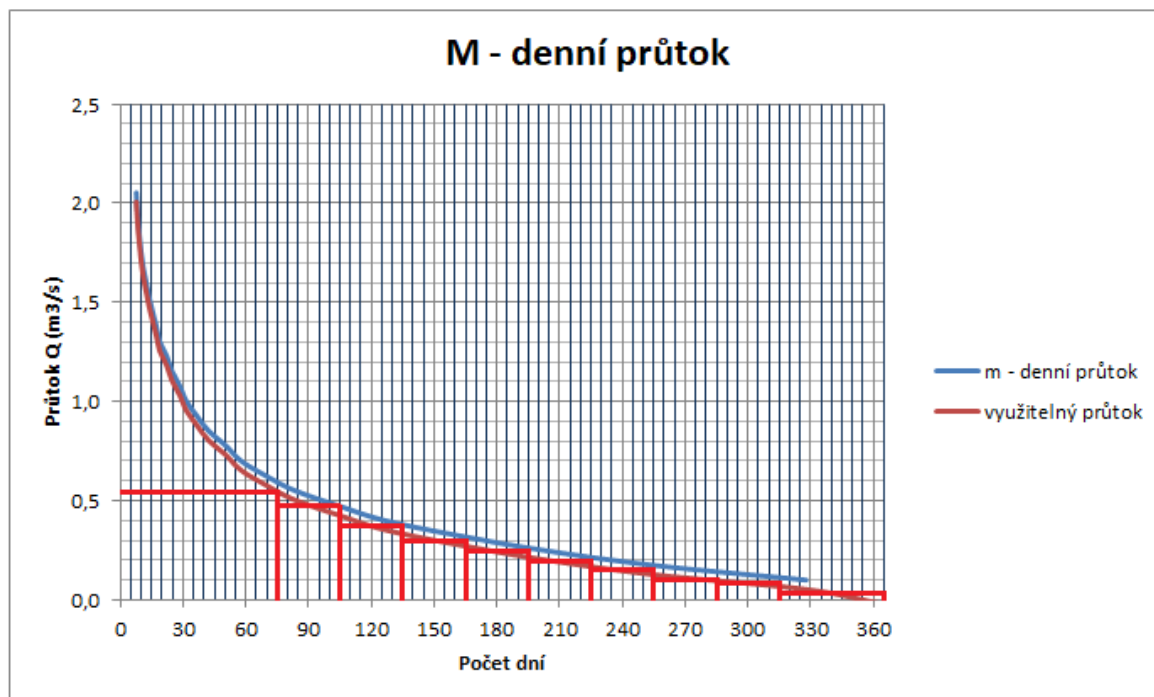
Kde:

Q	průtok turbínou	[m ³ /s]
h	čistý spád	[m]
g	gravitační zrychlení	[m/s ²]
η _T	účinnost turbíny	[%]
η _R	účinnost ozubeného řemene	[%]
η _G	účinnost asynchronního motoru	[%]

$$P = 0,54 \cdot 5,56 \cdot 9,81 \cdot 0,86 \cdot 0,97 \cdot 0,91 = 22,36 \text{ kW} \quad (5.3)$$

5.1.3 Výpočet ročního výkonu

Pro zjednodušení výpočtu ročního výkonu se používá metoda středních průtoků za období 30- ti dní (pouze první a poslední období je delší). Hodnoty středního průtoku lze najít v tabulce 5.1, ve sloupci Q_T. Dále se ve výpočtu postupuje stejně jako u výpočtu okamžitého výkonu, jen se navíc počítá s obdobími “xx“ dnů, během kterých turbína pracuje.



Graf 5.2 – Rozdělení M-denních průtoků po 30 dnech

Výpočet výroby za první období 75- dní:

$$E_{\text{"xx" dní}} = Q \cdot h \cdot g \cdot \eta_T \cdot \eta_R \cdot \eta_G \cdot m_{\text{dny}} \cdot t \quad [\text{kWh}] \quad (5.4)$$

Kde:

m_{dny} počet dní [-]

t počet hodin za den [-]

$$E_{0-75} = 0,54 \cdot 5,56 \cdot 9,81 \cdot 0,86 \cdot 0,97 \cdot 0,91 \cdot 75 \cdot 24 = \quad (5.5)$$

$$E_{0-75} = 40\,113,22 \quad [\text{kWh}] \quad (5.6)$$

Výpočet výroby za celý rok:

$$\Sigma E = E_{0-75} + E_{75-105} + \dots + E_{285-315} + E_{315-365} \quad [\text{kWh}] \quad (5.7)$$

$$\Sigma E = 40\,113,22 + 13\,996,14 \dots + 1\,925,02 + 0 = \quad (5.8)$$

$$\Sigma E = 97\,086,12 \quad [\text{kWh}] \quad (5.9)$$

Otevřené klapky	m	Q _{řeky}	Q _{kanálu}	H _{Netto}	Q _T		η _T	η _Ř	η _G	P	E
	[dny]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m]	[m ³ /s]	[%]	[%]	[%]	[%]	[kW]	[kWh]
Kl 1	365,00	0,05	0,00	5,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kl 1	315,00	0,13	0,08	5,56	0,08	14,81	84,00	97,00	91,20	2,97	1925,02
Kl 1	285,00	0,17	0,12	5,56	0,12	22,22	85,20	97,00	91,20	4,62	3326,03
Kl 1	255,00	0,20	0,15	5,56	0,15	27,78	86,50	97,00	91,20	6,19	4453,28
Kl 1	225,00	0,24	0,19	5,56	0,19	35,19	87,00	97,00	91,20	7,98	5742,69
Kl 2	195,00	0,30	0,25	5,56	0,25	46,30	86,20	97,00	91,80	10,47	7535,95
Kl 2	165,00	0,35	0,30	5,56	0,30	55,56	86,50	97,00	93,10	12,56	9044,96
Kl1 + Kl2	135,00	0,42	0,37	5,56	0,37	68,52	85,00	97,00	91,39	15,21	10948,82
Kl1 + Kl2	105,00	0,52	0,47	5,56	0,47	87,04	86,00	97,00	90,90	19,44	13996,14
Kl1 + Kl2	75,00	0,59	0,54	5,56	0,54	100,00	86,00	97,00	90,70	22,29	40113,22
										$\Sigma E = 97086,12 \text{ kWh}$	

Tab. 5.1 – Přehled vyrobené energie za určité období

5.2 Ekonomické zhodnocení:

Ekonomické zhodnocení je jedním z velice důležitých aspektů, protože je potřeba vědět, zda-li se realizace MVE vyplatí či nikoliv a popř. jak dlouhá bude návratnost investice.

5.2.1 Náklady na stavební úpravy:

Vyčištění kanálů	10 000 Kč
Česle	30 000 Kč
Úpravy na toku	30 000 Kč
Přívodní kanál (jalový přepad, prohlubeň)	50 000 Kč
Přívodní potrubí	50 000 Kč
Zřízení elektrické přípojky	80 000 Kč
Odpadní kanál	100 000 Kč
Stavba jezu	300 000 Kč
Strojovna	450 000 Kč
Celkem	1 100 000 Kč

Tab. 5.2 – Kalkulace nákladů na stavební úpravy

5.2.2 Náklady na technologii MVE:

Jezová sklopná klapka	400 000 Kč
Turbína + řídicí systém	1 500 000 Kč
Celkem	1 900 000 Kč

Tab. 5.3 – Kalkulace nákladů na technologické vybavení

5.2.3 Celkové náklady na výstavbu MVE:

Za montáž, zprovoznění zařízení a zaškolení obsluhy si firma navíc účtuje 12% z celkové ceny.

Stavební náklady	1 100 000 Kč
Technologie MVE	1 900 000 Kč
Stavební náklady + technologie MVE	3 000 000 Kč
Montáž, zprovoznění, zaškolení =12%	360 000 Kč
Stavební náklad (+ 12%)	1 232 000Kč
Technologie MVE (+12%)	2 128 000 Kč
Celkem (+12%)	3 360 000 Kč

Tab. 5.4 – Kalkulace nákladů na rekonstrukci MVE

5.2.4 Kalkulace investice:

Výkupní cena elektrické energie v Srbsku (podle Srbského energetického úřadu) pro vodní elektrárny s instalovaným výkonem do 0,2 MW je 0,124 €/kW a daň z příjmů je 15%.

Vstupní hodnoty	
investiční náklady	3 360 000 Kč
roční provozní náklady	35 000 Kč
životnost	30 let
požadovaná výnosnost	8%
Daň z příjmů	15%
Vyrobená energie za 1rok	97,1 MW
Výkupní cena	3 167 Kč/MW
průměrná roční inflace	4%

Tab. 5.5 – Přehled vstupních hodnot

Roční tržby:

$$T_r = \sum E \cdot V_{cena} = 97,1 \cdot 3167 = 307\,467 \quad [\text{Kč/rok}] \quad (5.10)$$

Roční provozní náklady N_p :

$$N_{pi} = N_p \cdot i_{inf} = 35000 \cdot 1 = 35\,000 \quad [\text{Kč/rok}] \quad (5.11)$$

Výpočet odpisu:

Pro technologii je stanovena doba odpisů 10 let, pro stavební část 30 let.

$$O_{tech.} = \frac{N_{tech.}}{s} = \frac{2128000}{10} = 212\,800 \quad [\text{Kč/rok}] \quad (5.12)$$

$$O_{staveb} = \frac{N_{staveb.}}{s} = \frac{1232000}{30} = 41\,067 \quad [\text{Kč/rok}] \quad (5.13)$$

$$O_{celkem} = O_{tech.} + O_{staveb.} = 212800 + 41067 = 253\,867 \quad [\text{Kč/rok}] \quad (5.14)$$

Hrubý zisk Z_h :

$$Z_{h1} = T_r - N_p \cdot i_{inf} - O_{celkem} \quad [\text{Kč/rok}] \quad (5.15)$$

$$Z_{h1} = 307467 - 35000 \cdot 1 - 253867 = 18\,601 \quad [\text{Kč/rok}] \quad (5.16)$$

Čistý zisk $Z_{\check{c}}$:

$$Z_{\check{c}1} = T_r - N_p \cdot i_{inf} = 307467 - 35000 \cdot 1 = 15\,811 \quad [\text{Kč/rok}] \quad (5.17)$$

Tok hotovosti – Cash flow T_h :

Pro 1. až 10. rok

$$T_{h1} = Z_{\check{c}} + O_{celkem} = 15811 + 253867 = 269\,678 \quad [\text{Kč}] \quad (5.18)$$

Po 10. roku

$$T_{h6} = Z_{\check{c}} + O_{celkem} = 182404 + 41067 = 223\,470 \text{ [Kč]} \quad (5.19)$$

Hrubý kumulovaný tok hotovosti:

$$KT_h = -N_v + T_h = -3360000 + 269678 = -3\,090\,322 \text{ [Kč]} \quad (5.20)$$

Čistý tok hotovosti – Cash flow $T_{\check{c}}$:

$$T_{\check{c}} = \frac{T_{h1}}{1 + \frac{d}{100}} = \frac{269\,678}{1 + \frac{8}{100}} = 269\,462 \text{ [Kč]} \quad (5.21)$$

Čistý kumulovaný tok hotovosti – Cash flow $KT_{\check{c}}$:

$$KT_{\check{c}1} = -N_v + T_{\check{c}1} = -3360000 + 269462 = -3\,090\,538 \text{ [Kč]} \quad (5.22)$$

$$KT_{\check{c}2} = KT_{h\check{c}1} + T_{\check{c}2} = -3090538 + 268273 = -2\,822\,265 \text{ [Kč]} \quad (5.23)$$

Rok	Roční výnos	Provozní náklady	Odpisy- technologie	Odpisy- stavba	Hrubý zisk	Daň z příjmu	Čistý zisk	Tok hotovosti	Kumulovaný tok hotovosti	Čistý tok hotovosti	Čistý kumulovaný tok hotovosti
s	T _r	N _p	O _t	O _s	Z _h	D	Z _č	T _h	KT _h	T _č	KT _č
[-]	[Kč/rok]	[Kč/rok]	[Kč/rok]	[Kč/rok]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]
1	307467	35000	212800	41067	18601	2790	15811	269678	-3090322	269462	-3090538
2	307467	36400	212800	41067	17201	2580	14621	268488	-2821835	268273	-2822265
3	307467	37856	212800	41067	15745	2362	13383	267250	-2554585	267036	-2555228
4	307467	39370	212800	41067	14231	2135	12096	265963	-2288622	265750	-2289478
5	307467	40945	212800	41067	12656	1898	10758	264624	-2023997	264413	-2025065
6	307467	42583	212800	41067	11018	1653	9366	263232	-1760765	263022	-1762043
7	307467	44286	212800	41067	9315	1397	7918	261784	-1498981	261575	-1500468
8	307467	46058	212800	41067	7544	1132	6412	260279	-1238702	260071	-1240397
9	307467	47900	212800	41067	5701	855	4846	258713	-979989	258506	-981892
10	307467	49816	212800	41067	3785	568	3217	257084	-722905	256879	-725013
11	307467	51809	0	41067	214593	32189	182404	223470	-499434	223292	-501721
12	307467	53881	0	41067	212520	31878	180642	221709	-277726	221532	-280189
13	307467	56036	0	41067	210365	31555	178810	219877	-57849	219701	-60488
14	307467	58278	0	41067	208124	31219	176905	217972	160123	217798	157309
15	307467	60609	0	41067	205793	30869	174924	215990	376113	215818	373127
16	307467	63033	0	41067	203368	30505	172863	213930	590043	213759	586886
17	307467	65554	0	41067	200847	30127	170720	211786	801830	211617	798503
18	307467	68177	0	41067	198225	29734	168491	209558	1011387	209390	1007893
19	307467	70904	0	41067	195498	29325	166173	207240	1218627	207074	1214967
20	307467	73740	0	41067	192661	28899	163762	204829	1423456	204665	1419632
21	307467	76689	0	41067	189712	28457	161255	202322	1625778	202160	1621792
22	307467	79757	0	41067	186644	27997	158648	199714	1825492	199555	1821347
23	307467	82947	0	41067	183454	27518	155936	197003	2022494	196845	2018192
24	307467	86265	0	41067	180136	27020	153116	194182	2216677	194027	2212219
25	307467	89716	0	41067	176686	26503	150183	191249	2407926	191097	2403316
26	307467	93304	0	41067	173097	25965	147132	188199	2596125	188049	2591364
27	307467	97036	0	41067	169365	25405	143960	185027	2781152	184879	2776243
28	307467	100918	0	41067	165483	24822	140661	181727	2962879	181582	2957825
29	307467	104955	0	41067	161447	24217	137230	178296	3141176	178154	3135979
30	307467	109153	0	41067	157248	23587	133661	174728	3315903	174588	3310567

Tab. 5.6 – Hodnocení efektivity investice

Metoda čisté současné hodnoty:

Tato metoda vyjadřuje rozdíl mezi současnou hodnotou peněžních příjmů z investice a hodnotou výdajů vynaložených na investici. [18]

$$NPV = \sum_{j=1}^n \frac{P_j}{(1+i)^j} - K_i \quad (5.24)$$

Kde:

NPV	čistá současná hodnota	[Kč]
n	doba životnosti	[-]
P_j	peněžní příjem z investice v j-tém roce její životnosti	[Kč]
i	roční úroková míra (požadovaná výnosnost investice)	[%]
K_i	pořizovací náklady	[Kč]

$$P_j = Z_{\check{c}j} + O_j$$

Kde:

$Z_{\check{c}j}$	čistý zisk v j-tém roce	[Kč]
O_j	Odpisy v j-tém roce	[Kč]

$$NPV = 6670567 - 3360000 = 3\,310\,567 \quad [\text{Kč}] \quad (5.25)$$

NPV > 0 - investiční projekt je považován za efektivní

NPV < 0 - investiční projekt není považován za efektivní

5.3 Environmentální zhodnocení

V této kapitole bude posuzován dopad Bánkiho turbíny na životní prostředí. Jak je známo, vodní elektrárny patří mezi obnovitelné zdroje energie a je to jeden z nejčistších způsobů výroby elektrické energie. Hlavními přínosy MVE jsou: zachycování naplavenin, které se nesmí vracet zpět do řeky, provzdušňování vody, jenž může podpořit obnovování života v řece, velmi nízká hluchnost, nulový vznik odpadů (používají se ekologicky šetrná maziva, nebo jako v případě Bánkiho turbíny se voda vůbec nedostane do kontaktu s ložisky a tedy i mazivy) a esteticky bezproblémový vzhled budovy. Tím největším přínosem vodních elektráren z hlediska ekologie je, že neprodukuje žádné emise (CO_x, NO_x, SO₂,...) a skleníkové plyny. V tabulce (tab. 5.7) lze vidět, kolik bude ušetřeno emisí, které by byly vyprodukovány hnědouhelnou elektrárnou, které jsou v ČR (i v Srbsku) nejběžnějším zdrojem pro výrobu elektrické energie. Pro výpočet budeme brát v úvahu emisní koeficienty odlučivosti filtrů tuhých částí (98%), a odsíření SO₂ (65%).

Hnědé uhlí	Tuhé látky	SO ₂	NO _x	CO	CO ₂
Emise [g/kWh]	3	5,3	7,7	0,7	1213

Tab. 5.7 – Vzniklé emise při výrobě 1 kWh v hnědouhelné elektrárně [19]

Hnědé uhlí	Tuhé látky	SO ₂	NO _x	CO	CO ₂
Emise [Kg]	291,23	514,56	747,56	67,96	117,77 tun

Tab. 5.8 – Množství ušetřených emisí při předpokládané roční výrobě 97,10 MWh.

6. Závěr

Tato diplomová práce se zabývá rekonstrukcí starého vodního mlýna na malou vodní elektrárnu. Na začátku práce je popsán současný stav a energetický potenciál dané lokality. Výpočtem bylo zjištěno, že maximální průtok v přívodním korytu je $0,540 \text{ m}^3/\text{s}$. Podle hydrostatických dat, která byla dodána zákazníkem, bude tento průtok zajištěn 75 dní v roce. V dalším kroku následuje výpočet čistého spádu, který je nezbytný pro návrh turbíny. Čistý spád je vypočítán odečtem ztráty na česlích, ztrátové výšky turbíny nad spodní hladinou a jednotlivých tlakových ztrát v potrubí od hrubého spádu. Výsledkem je čistý spád o velikosti 5,56 metru. V následující kapitole jsou na základě velikosti čistého spádu a průtoku v přívodním korytu (společně s M- denními průtoky), zvoleny a teoreticky popsány turbíny, které by bylo možné v dané lokalitě aplikovat. Na základě určených kritérií (jednoduchost konstrukce, náročnost provozu, cena) a cenových poptávek u firem zabývajících se výrobou vodních turbín byla zvolena jako nejideálnější pro danou lokalitu Bánkiho turbína. Pro tuto zvolenou turbínu byly v další části práce vypočítány a navrženy všechny potřebné konstrukční parametry. Maximální výkon turbíny bude $P = 25,33 \text{ kW}$.

V závěrečné části práce byla rekonstrukce posouzena z energetického, environmentálního a ekonomického hlediska. V kapitole ekonomického hodnocení efektivnosti investice byl ověřen přínos rekonstrukce.

Při hodnocení se vycházelo z:

- ročního výnosu $T_r = 307\,467 \text{ Kč}$,
- z provozních nákladů vztažených na 1 rok $N_p = 35\,000 \text{ Kč}$,
- nákladů na výstavbu MVE $IN = 3\,360\,000 \text{ Kč}$.

Pomocí výpočtů bylo zjištěno, že doba splácení investice na rekonstrukci MVE bude činit necelých 14 let, čistá současná hodnota $NPV = 3\,310\,567 \text{ Kč}$ a index ziskovosti bude $PI = 2$.

Vzhledem k faktu, že se během rekonstrukce bude muset vybudovat několik nových částí MVE (strojovna, odpadní kanál, česle,...) a tudíž budou počáteční investice vyšší, doba splácení 14 let je adekvátní.

7. Seznam použité literatury

- [1] [online]. 30. 4. 2018 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z:
http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HYAR/ke_stazeni/prednasky/HYAR_pr_07.pdf
- [2] [online]. 30. 4. 2018 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z:
https://www.vuv.cz/files/pdf/edicni_cinnost/publikace/mattas_vypocet_prutoku.pdf
- [3] [online]. 30. 4. 2018 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z:
<http://mve.energetika.cz/vodnidilo/prepad.htm>
- [4] [online]. 30. 4. 2018 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z:
http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/pr ednasky/HY2V_06_Prepady.pdf
- [5] [online]. 30. 4. 2018 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z:
<http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/hydro/turbiny.cerpadla.pdf>
- [6] [online]. 30. 4. 2018 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z:
<http://mve.energetika.cz/pretlakoveturbiny/kaplan-s.htm>
- [7] [online]. 30. 4. 2018 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7074
- [8] [online]. 30. 4. 2018 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16730
- [9] [online]. 30. 4. 2018 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z:
<https://core.ac.uk/download/pdf/30290705.pdf>
- [10] [online]. 30. 4. 2018 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z:
<http://www.gess.cz/cz/male-vodni-elektrarny.html>

- [11] [online]. 30. 4. 2018 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65112
- [12] [online]. 30. 4. 2018 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z:
<http://cink-hydro-energy.com/en/2-cell-crossflow-turbine/>
- [13] [online]. 30. 4. 2018 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z:
http://www.malavoda.cz/jak_zacit_spad.htm
- [14] [online]. 30. 4. 2018 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16730
- [15] [online]. 30. 4. 2018 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z:
http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/prednasky/HY2V_04_Hydraulika_potrubi.pdf
- [16] [online]. 30. 4. 2018 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z:
<http://mve.energetika.cz/primotlaketurbiny/banki.htm>
- [17] [online]. 30. 4. 2018 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z:
<http://skat.ch/wp-content/uploads/2017/03/02-Hydraulics-Engineering-Manual.pdf>
- [18] CHMELA, Michal. Ekonomika a řízení 1. vyd. Brno : Vydavatelství VUT, 12.9.2007. SKRYPRTA PRO VUT.
- [18] ŠKOŠPIL, J.- KASÁRNIK, M: Obnovitelné zdroje energie I, 2. vyd., přeprac., Plzeň: ZČU, 1998, 126s

8. Seznam obrázků

Obrázek č. 2.1: Geodetické zaměření lokality.....	13
Obrázek č. 2.2: Přírodní kanál.....	14
Obrázek č. 2.3: Objekt starého mlýna.....	14
Obrázek č. 2.4: Koryto řeky.....	15
Obrázek č. 2.5: Starý jez.....	15
Obrázek č. 2.6: Technologie starého mlýna.....	16
Obrázek č. 2.7: Schéma jalového přepadu.....	21
Obrázek č. 2.8: Geodetické zaměření odpadního kanálu.....	24
Obrázek č. 2.9: Jezová sklopná klapka.....	27
Obrázek č. 2.10: Sklopená jezová sklopná klapka.....	28
Obrázek č. 2.11: Schéma koryta řeky.....	28
Obrázek č. 2.12: Schéma MVE.....	29
Obrázek č. 2.13: Q/H diagram vodních turbín.....	33
Obrázek č. 3.1: Schéma Kaplanovy turbíny.....	35
Obrázek č. 3.2: Schéma semi-Kaplanovy turbíny.....	35
Obrázek č. 3.3: Schéma šnekové (Archimedovy) turbíny.....	36
Obrázek č. 3.4: Schéma Bánkiho turbíny.....	37
Obrázek č. 4.1: Schéma příváděcího potrubí.....	39
Obrázek č. 4.2 Schéma změny směru potrubí.....	41
Obrázek č. 4.3: Schéma rychlostních trojúhelníků.....	45
Obrázek č. 4.4: Schéma konstrukce geometrie lopatek.....	50
Obrázek č. 4.5: Průřezy profilů potrubí.....	52
Obrázek č. 4.6: Znázornění proudění na vstupu do oběžného kola.....	53
Obrázek č. 4.7: Návrh vstupní křivky.....	53
Obrázek č. 5.1: Přehled charakteristik elektromotoru.....	57

9. Seznam tabulek

Tabulka 2.1: Hodnoty průtoků v přívodním kanále.....	20
Tabulka 2.2: Hodnoty průtoků přes jalový přepad.....	23
Tabulka 2.3: Hodnoty průtoků v odpadním kanále.....	26
Tabulka 2.4: Hodnoty průtoků přes jez.....	28
Tabulka 2.5: Hodnoty průtoků korytem.....	30
Tabulka 2.6: Návrhové parametry MVE.....	31
Tabulka 2.7: Předběžné parametry MVE.....	33
Tabulka 4.1: Hodnoty součinitele místní ztráty kónickým zúžením.....	40
Tabulka 4.2: Hodnoty součinitele místní ztráty změnou směru.....	41
Tabulka 4.3: Hodnoty součinitele místní ztráty kónickým zúžením.....	41
Tabulka 4.4: Souhrn výsledných parametrů turbíny.....	45
Tabulka 4.5: Hodnoty rychlostí a úhlů.....	49
Tabulka 4.6: Výsledné rozměry křivky.....	54
Tabulka 5.1: Přehled vyrobené energie za určité období.....	59
Tabulka 5.2: Kalkulace nákladů na stavební úpravy.....	59
Tabulka 5.3: Kalkulace nákladů na technologické vybavení.....	60
Tabulka 5.4: Kalkulace nákladů na rekonstrukci MVE.....	60
Tabulka 5.5: Přehled vstupních hodnot.....	60
Tabulka 5.6: Hodnocení efektivity investice.....	63
Tabulka 5.7: Vzniklé emise při výrobě 1 kWhe v hnědouhelné elektrárně.....	66
Tabulka 5.8: Množství ušetřených emisí při předpokládané roční výrobě 97,1 MW.....	66

10. Seznam grafů

Graf 2.1: M- denní průtoky.....	17
Graf 2.2: Konzumpční křivka přívodního kanálu.....	21
Graf 2.3: Konzumpční křivka jalového přepadu.....	23
Graf 2.4: Konzumpční křivka odpadního kanálu.....	26
Graf 2.5: Konzumpční křivka koryta.....	30
Graf 4.1: Graf závislosti součinitele k_{1d} na spádu.....	42
Graf 5.1: Účinnostní charakteristika Bánkiho turbíny.....	56
Graf 5.2: Rozdělení M-denních průtoků po 30 dnech.....	58

Graf 5.3 Křivka předpokládané návratnosti investice.....	65
--	----

11. Seznam příloh

Výkresová dokumentace 01: Oběžné kolo turbíny

Výkresová dokumentace 02: Oběžné kolo turbíny

Výkresová dokumentace 03: Bánkiho turbína