

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



NÁVRH MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY

**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2020

VOJTĚCH JANČÁLEK

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství
Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jančálek** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **473458**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh malé vodní elektrárny

Název bakalářské práce anglicky:

Design of a small hydro power station

Pokyny pro vypracování:

Navrhnete a ekonomicky zhodnotíte malou vodní elektrárnu situovanou ve zvolené lokalitě.
Práce bude obsahovat:

- 1) Rešerši technického řešení, podmínek realizace a provozu MVE.
- 2) Výběr lokality a specifikaci hydrologických podmínek pro umístění a provoz MVE.
- 3) Bilanci energetického potenciálu lokality.
- 4) Návrh MVE ve dvou variantách a jejich provozní bilance.
- 5) Ekonomické vyhodnocení a porovnání variant.

Seznam doporučené literatury:

Holata, M.: Malé vodní elektrárny. Academia, 2002 ISBN 978-80-200-0828-2
Melichar, J.: Malé vodní turbíny-konstrukce a provoz. ČVUT 1998, ISBN 80-01-01808-0

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc., ústav energetiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **25.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.06.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2021**

doc. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

25.04.2020

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Návrh malé vodní elektrárny* vypracoval samostatně s využitím odborné literatury a pramenů uvedených v příloženém seznamu využitých zdrojů.

V Praze dne: 26.06.2020


.....
Podpis autora

Abstrakt

V této práci je zkoumán návrh malé vodní elektrárny ve zvolené lokalitě. Je navrženo několik výkonových variant, které jsou následně ekonomicky zhodnoceny a porovnány mezi sebou. Porovnávacím kritériem je čistá současná hodnota za předpokladu stálých hydrologických podmínek a konstantní ceny elektrické energie.

Klíčová slova

návrh malé vodní elektrárny; malá vodní elektrárna; výpočet výkonu; ekonomické zhodnocení; průtok; spád; čistá současná hodnota; elektrická energie; turbína

Summary

This work deals with the design of a small hydro power station in a selected locality. Several performance variants are proposed, then they are economically evaluated and compared to each other. The comparative criterion is net present value, assuming constant hydrological conditions and a constant price of electricity.

Key words

design of a small hydro power station; small hydro power station; power calculation; economic evaluation; flow; fallout; net present value; electrical energy; turbine

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Tomášovi Dlouhému, CSc. za poskytnutí jeho odborných a užitečných rad ve vedení mé bakalářské práce. Mé díky patří i Ing. Josefu Sedláčkovi za poskytnutí dat potřebných pro návrh malé vodní elektrárny v konkrétní lokalitě. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině a blízkým za jejich podporu, díky které jsem mohl této práci věnovat maximum času.

Obsah

1	Úvod	- 11 -
2	Vodní elektrárny obecně.....	- 12 -
2.1	Princip vodní elektrárny	- 12 -
2.2	Rozdělení vodních elektráren.....	- 12 -
2.2.1	Podle instalovaného výkonu.....	- 12 -
2.2.2	Podle využitého spádu	- 12 -
2.2.3	Podle využití vodního toku.....	- 12 -
2.2.4	Podle polohy hřídele.....	- 14 -
2.2.5	Podle způsobu přenosu energie	- 14 -
2.3	Výběr některých vodních elektráren	- 14 -
2.3.1	V České republice.....	- 14 -
2.3.2	Na Slovensku.....	- 15 -
2.4	Zbývající hydropotenciál pro MVE v ČR.....	- 16 -
2.5	Porovnání výroby elektrické energie v průběhu několika let.....	- 18 -
3	Turbíny využívané ve vodních elektrárnách	- 19 -
3.1	Kaplanova turbína	- 19 -
3.2	Francisova turbína	- 19 -
3.3	Peltonova turbína	- 20 -
3.4	Bánkiho turbína.....	- 20 -
3.5	Šneková turbína.....	- 21 -
3.6	Vírová turbína	- 21 -
3.7	Savka	- 22 -
3.7.1	Mokrý savka	- 22 -
3.7.2	Suchá savka	- 23 -
4	Postup návrhu malé vodní elektrárny	- 24 -
4.1	Průtok	- 24 -
4.2	Určení sanačního průtoku	- 24 -
4.3	Spád.....	- 24 -
4.4	Návrh turbíny	- 25 -
4.4.1	Výkon turbíny.....	- 26 -
4.5	Celkový výkon elektrárny	- 26 -
4.6	Ekonomické zhodnocení	- 27 -
5	Konkrétní návrh MVE	- 28 -
5.1	Výběr lokality.....	- 28 -
5.2	Hydrologické podmínky.....	- 28 -

5.3	Výběr typu turbíny	- 29 -
5.4	Určení sanačního průtoku	- 30 -
5.5	Zadaná turbína.....	- 30 -
5.6	Výpočetní postup	- 32 -
5.7	Volba průtoků.....	- 35 -
5.8	Výsledné hodnoty.....	- 36 -
6	Závěr.....	- 42 -
7	POUŽITÁ LITERATURA	- 43 -
8	Seznam příloh.....	- 4 -

Seznam symbolů, indexu a zkratk

VE		Vodní elektrárna
MVE		Malá vodní elektrárna
PVE		Přečerpávací vodní elektrárna
UDP		User datagram protocol
P	[W]	Výkon
H _b	[m]	Hrubý spád
H _z	[m]	Ztrátový spád
H _u	[m]	Užitný spád
Q	[m ³ /s]	Průtok
Q _{SAN}	[m ³ /s]	Sanační průtok
Q _{opt}	[m ³ /s]	Optimální průtok turbíny
Q _n	[m ³ /s]	Návrhový průtok turbíny
Q _{max}	[m ³ /s]	Maximální průtok turbíny (= hltnost turbíny)
Q _{min}	[m ³ /s]	Minimální průtok turbíny
Q _m	[m ³ /s]	Průtok, který je dosažen nebo překročen m dní v roce
O	[m ³ /s]	Odběr/vypouštění v daném profilu
S	[m ³ hod/s]	Plocha vymezená hodnotami průtoků a dní
K	[kg/m s ²]	Koeficient pro výpočet E
ρ	[kg/m ³]	Hustota
g	[m/s ²]	Gravitační zrychlení
η _C	[%]	Celková účinnost
η _G	[%]	Účinnost generátoru
η _P	[%]	Účinnost převodu
η _T	[%]	Účinnost turbíny
E	[Wh/rok]	Množství vyrobené elektrické energie
t	[h]	Čas
m	[den]	Počet dní
N	[rok]	Počet let
n	[let]	Návratnost investice
R	[%]	Procento z návrhového průtoku
C	[Kč]	Cena
PC	[Kč/kW]	Poměrná cena
Z	[Kč]	Zisk
V	[Kč]	Výnosy
NK	[Kč]	Náklady
d	[%]	Diskontní míra
CF	[Kč]	Cash flow (= roční peněžní tok)
ČSH	[Kč]	Čistá současná hodnota

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma derivační elektrárny [1]	- 13 -
Obrázek 2: Mapa všech vodních elektráren na území ČR [32].....	- 16 -
Obrázek 3: Kaplanova turbína [33]	- 19 -
Obrázek 4: Francisova turbína [34].....	- 19 -
Obrázek 5: Peltonova turbína [35]	- 20 -
Obrázek 6: Bánkiho turbína [36].....	- 20 -
Obrázek 7: Šneková turbína [23].....	- 21 -
Obrázek 8: Vírová turbína [37]	- 21 -
Obrázek 9: Mokrá savka [19].....	- 22 -
Obrázek 10: Suchá savka [19].....	- 23 -
Obrázek 11: Návrhový diagram pro určení typu turbíny [38].....	- 25 -
Obrázek 12: Původní jez před úpravou, foto Josef Sedláček	- 28 -
Obrázek 13: Průtokový graf	- 29 -
Obrázek 14: Graf závislosti účinnosti na průtoku zadané turbíny	- 31 -
Obrázek 15: Graf mnou uvažované závislosti účinnosti na průtoku.....	- 32 -
Obrázek 16: Dělení Q_{in}	- 32 -
Obrázek 17: Zobrazení S_{ij} do upraveného průtokového grafu	- 33 -
Obrázek 18: Vyznačení mnou uvažovaných Q_{in} do průtokového grafu	- 35 -
Obrázek 19: Graf závislosti ceny turbíny na P_{max}	- 38 -
Obrázek 20: Závislost $\check{C}SH_{min}$ na N	- 40 -
Obrázek 21: Závislost $\check{C}SH_{stř}$ na N	- 41 -
Obrázek 22: Závislost $\check{C}SH_{max}$ na N	- 41 -

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled některých VE v ČR [2]	- 14 -
Tabulka 2: Přehled některých VE na Slovensku [3] [4] [5]	- 15 -
Tabulka 3: Legenda k rovnici (2.1) [6]	- 17 -
Tabulka 4: Přehled E a instalovaného výkonu v minulých letech [7]	- 18 -
Tabulka 5: Určení Q_{SAN} podle Q_{355} [28]	- 24 -
Tabulka 6: Význam veličin použitých v rovnicích (4.2) - (4.6) [29]	- 27 -
Tabulka 7: Zadané m-denní průtoky	- 28 -
Tabulka 8: Zadané N-leté průtoky	- 29 -
Tabulka 9: Parametry zadané turbíny KP 1050 K3	- 31 -
Tabulka 10: Závislost účinnosti na průtoku zadané turbíny	- 31 -
Tabulka 11: Hodnoty Q_i	- 36 -
Tabulka 12: Hodnoty m_j	- 36 -
Tabulka 13: Hodnoty ploch S_{ij} a K	- 36 -
Tabulka 14: Výsledné hodnoty E, P_{max}	- 37 -
Tabulka 15: Odhadované a vypočtené ceny MVE	- 37 -
Tabulka 16: Vypočtené ceny turbín pro jednotlivé Q_{in}	- 38 -
Tabulka 17: Přehled ceny elektrárny a PC pro jednotlivé průtoky	- 39 -
Tabulka 18: Výnosy a zisky za rok	- 39 -
Tabulka 19: ČSH pro jednotlivé Q_n	- 40 -

1 Úvod

Na našem území jsou vodní toky doslova obklopeny mnoha vodními elektrárnami různých velikostí. Snaha o návrh pro výstavbu nové elektrárny vyžaduje obrovské úsilí především v hledání správné lokality, která má nevyužitý hydrologický potenciál a je technicky dostupný. Hlavní překážkou v takovýchto lokalitách je fakt, že často spadají pod chráněná území, kde je velmi obtížné a někdy i nemožné získat od správních orgánů stavební povolení.

Ačkoli je lokalit pro výstavbu nových elektráren málo, vždy bude na trhu potřeba kvalifikovaných lidí na opravy, renovace nebo obnovy již stojících elektráren a jejich zařízení.

Rozhodl jsem se svoji bakalářskou práci zaměřit na návrh malé vodní elektrárny v místě, kde v historii již elektrárna stála a fungovala. Tato elektrárna vznikla ze starého mlýna a jako zařízení pro přeměnu mechanické energie vody na elektrickou energii využívala turbogenerátor vybavený oběžným kolem. Tuto starou elektrárnu se v roce 2014 pokoušel investor obnovit, ale stavební práce zde ustaly a nyní je elektrárna mimo provoz. Mým úkolem je navrhnout elektrárnu v tomto místě úplně od nuly. Potřebná data jsem získal od návrháře, který měl přestavbu na starosti. Cílem práce je ekonomicky porovnat několik návrhových variant pro různé návrhové průtoky, které si zvolím.

V této práci zanedbávám povinnosti týkající se biologických studií v dané lokalitě a formalitám ke stavebnímu povolení. Můj návrh MVE bude čistě technický s ekonomickým zhodnocením jednotlivých návrhových variant.

Pro moji bakalářskou práci bylo zvoleno následující zadání:

- 1) Proveďte rešerši možných technických řešení, podmínek realizace a provozu malé vodní elektrárny. Porovnejte vlastnosti jednotlivých typů vodních turbín tak, abyste byli schopni navrhnout vlastní MVE.
- 2) Vyberte vhodnou lokalitu pro umístění a provoz MVE. V této lokalitě specifikujte hydrologické podmínky.
- 3) Proveďte bilanci energetického hydropotenciálu ve zvolené lokalitě.
- 4) Navrhněte MVE ve dvou variantách. Vypočtete hodnoty výkonů a množství vyrobené elektrické energie za rok pro jednotlivé Vámi zvolené průtoky.
- 5) Proveďte ekonomické vyhodnocení jednotlivých variant a tyto varianty porovnejte.

2 Vodní elektrárny obecně

2.1 Princip vodní elektrárny

Vodní elektrárna je zařízení určené k přeměně mechanické (potenciální + kinetické) energie vody na elektrickou energii. Jednou z jejich největších předností je rychlé najetí z nuly na plný výkon a nulové emise. [1]

Principem vodní elektrárny je, že voda z vodního zdroje roztočí svou mechanickou energii turbínu, která přes hřídel a případné zpřevodování roztočí rotor generátoru. rotační energie rotoru generátoru se mění pomocí elektromagnetické indukce na elektrickou energii. Celé toto soustrojí tvoří dohromady tzv. turbogenerátor. [1]

Při výrobě elektřiny využívá VE hydrologický cyklus. Využívání energie vody je jeden ze způsobů výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Tento typ získávání elektřiny má nespornou výhodu ve velmi vysokých dosažitelných účinnostech, narozdíl například od větrné energie. Množství vody ve vodních tocích je většinou lépe předvídatelné v dlouhodobém měřítku než ostatní obnovitelné zdroje. Možnost regulace vody na vstupu do elektrárny zajišťuje dobrou ovladatelnost okamžitých výkonů. Touto schopností je VE spolehlivým pomocníkem ve vykrývání špiček v elektrizační soustavě. [1]

2.2 Rozdělení vodních elektráren

2.2.1 Podle instalovaného výkonu

Pokud je celkový instalovaný výkon na VE větší než 100 MW, jedná se o velkou VE. Jestliže je instalovaný výkon menší než 100 MW a zároveň větší než 10 MW, jde o střední VE. Pokud má VE instalovaný výkon menší než 10 MW, nazýváme toto dílo malou vodní elektrárnou. [1]

2.2.2 Podle využitého spádu

Vodní elektrárna s využitým spádem větším než 100 m se řadí mezi vysokotlaké. Pokud je využitý spád menší než 100 m a větší než 20 m, jde o středotlakou VE. Jestliže má VE využitý spád menší než 20 m, jedná se o nízkotlakou VE. [1]

2.2.3 Podle využití vodního toku

1) Průtočné VE

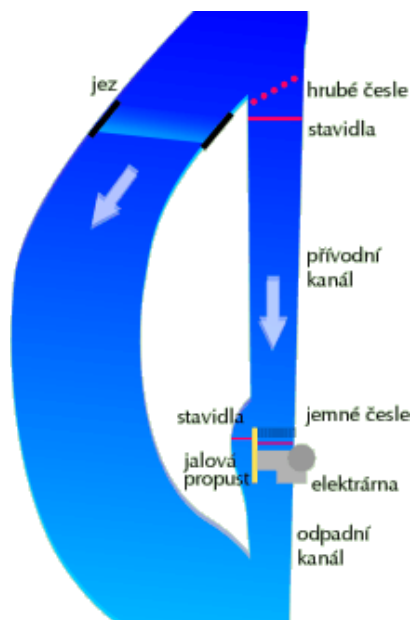
Využívá pouze přirozený průtok ve vodním toku, který nelze nijak ovlivnit. Jestliže je průtok větší, než na který byla VE dimenzována, přebytečné množství vody je odvedeno bez užitku. [1]

2) Jezové VE

Jez zvedne hladinu toku a zajistí elektrárně větší spád, který je daný rozdílem úrovní horní a dolní hladiny. Z pravidla se jedná především o nízkotlaké VE. [1]

3) Derivační VE

Využívá se v místech, kde koryto řeky opisuje tvar např. písmena U. Tento úsek je uměle zkrácen za účelem zvýšení využitelného spádu (provedení zkrácení úseku toku je zobrazeno na Obrázku 1). Derivační přivaděč dopravuje vodu z koryta řeky k lopatkám turbíny, odkud je odpadním kanálem přivedena do původního koryta. [1]



Obrázek 1: Schéma derivační elektrárny [1]

4) Akumulační VE

Řeka je přehrazena přehradní hrází, což zajišťuje dostatečně velký spád a možnost regulovat průtok vody na lopatky turbíny. Jestliže je elektrárna umístěna těsně pod přehradou, mluvíme o přehradní vodní elektrárně. Možností je i spojení přehrady a elektrárny tlakovým přivaděčem, v takovém případě se jedná o přehradní derivační vodní elektrárnu. [1]

Jedna z výhod je řízený odběr vody (regulace průtoku) podle toho, jestli je v elektrizační soustavě dostatek elektrické energie či nikoliv. Další výhodou spočívá v rychlém náběhu elektrárny na plný výkon. V porovnání s uhelnou elektrárnou, kde náběh trvá několik hodin až den, nebo s jadernou elektrárnou, kde tato činnost zabere až 3 dny, vodní elektrárna dosáhne maximálního výkonu do pár minut. [1]

Přehrady a nádrže přehrazené přehradní hrází slouží kromě výroby elektrické energie také jako ochrana před povodněmi, zásobárny pitné vody pro vodárny nebo technologické vody pro zemědělství a průmysl. [1]

5) Přečerpávací VE

Slouží především jako akumulace elektrické energie. V době, kdy je v síti přebytek energie, zapnou se čerpadla (možnost využít Francisovu turbínu v reverzním režimu) a voda se čerpá ze spodní nádrže do horní. Ve špičce, kdy je naopak v síti energie nedostatek, proudí voda z horní nádrže do spodní a turbíny vyrábí elektrickou energii. Kvůli potřebě horní nádrže, která by měla být položena co nejvýše nad dolní nádrží pro získání co největšího možného spádu, jsou vhodné lokality především na horách. [1]

6) Slapové (přilivové) VE

Tento druh VE využívá kinetickou energii při přílivu a odlivu. Slapové elektrárny nejsou hojně využívány, protože na jejich konstrukci je potřeba vysoká technologická náročnost a doba přílivu nebo odlivu není většinou ve špičkách, kdy je elektriny v síti nedostatek. [1]

2.2.4 Podle polohy hřídele

Poloha hřídele spojujícího turbínu s generátorem (může být použito převodů) může být horizontální (např. Kaplan, Francis, vírová turbína), vertikální (např. Kaplan, Francis, Bánki) nebo šikmá (např. šneková turbína). [1]

2.2.5 Podle způsobu přenosu energie

Porovnává se tlak před oběžným kolem turbíny a za ním. Jestliže je tlak na obou koncích stejný, jedná se o rovnotlakou turbínu. Typicky Peltonova nebo Bánkiho turbína. Pokud je tlak před oběžným kolem turbíny větší než tlak za ním, jedná se o přetlakovou turbínu, což zajišťuje možnost využití celého spádu. Typicky se zde jedná o turbínu Kaplanovu a Francisovu. Podtlak za oběžným kolem se většinou řeší savkou. [1]

2.3 Výběr některých vodních elektráren

2.3.1 V České republice

V Tabulce 1 jsou uvedeny některé z mnoha fungujících elektráren na území České republiky, přičemž všechny uvedené VE spravuje firma ČEZ, a.s. Tento přehled je orientační a pouze ukazuje, jakých hodnot instalovaných výkonů se běžně v praxi dosahuje a poukazuje také na dlouhou dobu životnosti vodních elektráren.

Oranžově jsou znázorněny přečerpávací elektrárny (PVE), modře vodní elektrárny (VE) a bíle malé vodní elektrárny (MVE).

Tabulka 1: Přehled některých VE v ČR [2]

Název VD	Typ turbíny	Počet soustrojí	Instalovaný výkon [MW]	Rok uvedení do provozu/rekonstrukce
Dalešice	Francis	4	450	1978
Dlouhé Stráně I	Francis	2	650	1996
Lipno I	Francis	2	120	1959
Kamýk	Kaplan	4	40	1957-62
Orlík	Kaplan	4	364	1961-62
Hněvkovice	Kaplan	2	9,6	1992
Bukovec	Kaplan	2	0,63	2007
Lipno II	Kaplan	1	1,5	1957
Pardubice	Kaplan	3	1,25	1978
Práčov	Francis	1	9,75	2001
Brno Kníničky (Brněnská přehrada)	Kaplan	1	3,5	1941
Brno Komín	Kaplan	2	0.2	1923/2007
Mohelno	Kaplan/ Francis	1/1	1,2/0,6	1978/1999
Štěchovice	Kaplan	2	22,5	1943/1944

2.3.2 Na Slovensku

Obdobně jako v kapitole 2.3.1 jsou v Tabulce 2 uvedeny některé fungující elektrárny na území Slovenska. Většina elektráren na našem a Slovenském území vznikla v minulém století v Československu. Tuto skutečnost dokazuje rok uvedení do provozu jednotlivých elektráren. Hydrologické podmínky jak na našem území, tak na území Slovenska jsou srovnatelné, to dokazují podobné hodnoty výkonů jednotlivých elektráren.

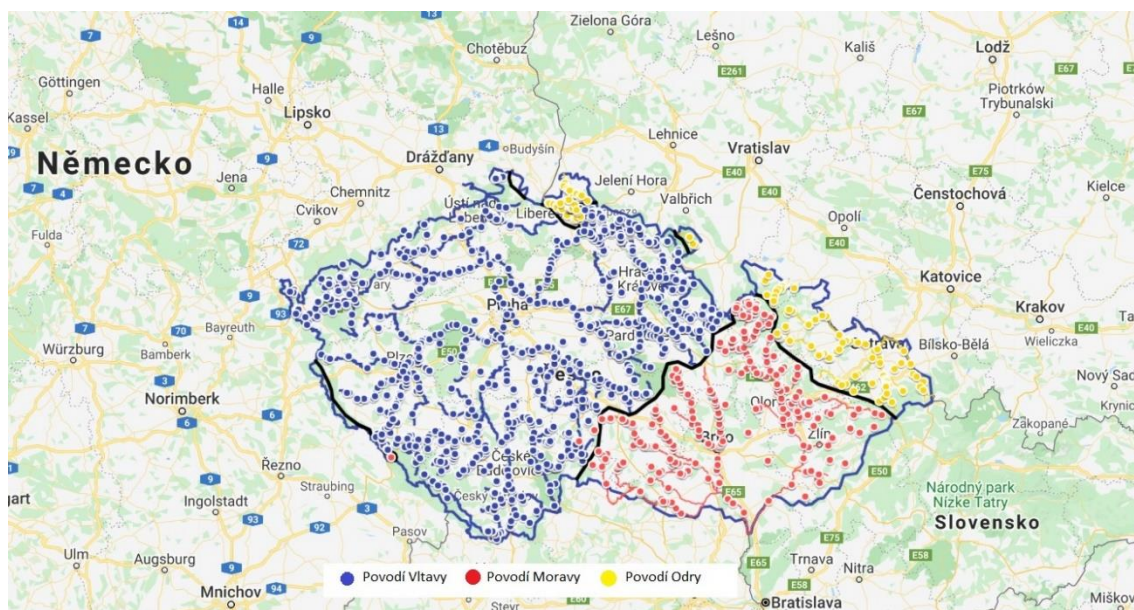
Oranžově jsou znázorněny přečerpávací elektrárny (PVE), modře vodní elektrárny (VE) a bíle malé vodní elektrárny (MVE).

Tabulka 2: Přehled některých VE na Slovensku [3] [4] [5]

Název VD	Typ turbíny	Počet soustrojí	Instalovaný výkon [MW]	Rok uvedení do provozu
Čierny Váh	Francis/ Kaplan	6/1	664,68/0,68	1981
Liptovská Mara	Kaplan/ Dériaz	2/2	198	1975
Ružín	Francis	2	60	1972
Gabčíkovo	Kaplan	8	720	1992
Orava	Kaplan	2	21,75	1953
Krpelany	Kaplan	3	24,75	1957
Sučany	Kaplan	3	38,4	1958
Liptovec	Kaplan	3	33,9	1960
Bešeňová	Kaplan	2	4,64	1976
Ružín II	Kaplan	1	1,8	1974
Kruppachy	Kaplan	1	0,33	1931
Mošon	Kaplan	2	1,22	1994
Rakovec	Francis	2	0,5	1912
Švedlár	Francis	2	0,09	1939
Dobšiná II	Kaplan	1	2	1994
Tvrdošín	Kaplan	3	6,1	1979
Velké Kozmálovce	Kaplan	3	5,32	1988

2.4 Zbývající hydropotenciál pro MVE v ČR

Na Obrázku 2 je zobrazena mapa ukazující využití vodních toků vodními elektrárnami na území ČR. Již na první pohled je zřejmé, že většina hydro-potenciálu je již vyčerpána a lokalit pro možnou výstavbu VE není mnoho. Zbývající nevyužitý potenciál pro stavbu nové vodní elektrárny je zejména na menších tocích (potoky, říčky), možnost je i ve využití již stávajícího jezového stupně. V těchto případech se jedná z velké většiny o spády do 5 metrů. Kromě výstavby nové vodní elektrárny je možno renovovat již některou ze starších vodních elektráren a tím dosáhnout většího výkonu.



Obrázek 2: Mapa všech vodních elektráren na území ČR [32]

Pro zjištění technicky využitelného hydroenergetického potenciálu na jezových stupních ležících na území ČR potřebujeme znát určitá data. Konkrétně jde o výšku užitého spádu, m-denní průtoky a odběr vody na konkrétním místě. Z těchto hodnot jsme schopni vybrat vhodnou turbínu a vypočítat teoretický výkon MVE. Dle předpokládaného výkonu určíme roční výrobu elektrické energie, např. podle kapitoly 5.6. Následuje ekonomické zhodnocení, ve kterém jsou pro nás důležité informace ohledně čisté současné hodnoty a návratnosti (za jak dlouho se nám vrátí investované náklady). Opomenout nesmíme údržbu celé MVE, která nám roční zisk o něco sníží. Výpočet a odečet hodnoty návratnosti je názorně popsán v kapitolách 5.6 a 5.8. Jestliže bude návratnost vyšší než celková doba životnosti MVE, výstavba se nevyplatí. V takovémto případě můžeme konstatovat, že jezový stupeň je technicky využitelný pro výstavbu MVE, nikoliv ale ekonomicky. Za předpokladu velmi malého spádu nebo průtoku, kdy nejsme schopni nainstalovat vhodnou turbínu, nebo v potencionální lokalitě pro výstavbu není možné postavit elektrárnu, např. kvůli geologickým podmínkám, považujeme takovýto jezový stupeň za technicky nevyužitelný. [6]

Zbývajícím hydroenergetickým potenciálem se zabývá projekt *Analýza efektivního využití malých vodních elektráren z hlediska přírodního potenciálu vodních toků jako energetického zdroje z let 2013–2015*. V tomto projektu autoři vyhodnocovali celkem 2309 jezových stupňů, o kterých získávali informace od Státních podniků povodí. Jezové stupně s nedostupnými informacemi z tohoto zdroje byly doplněny pouze výškou, která byla odečtena z vodohospodářské mapy. MVE byly již vystavěny na 703 jezech, přičemž celkový počet MVE byl 828. Z těchto informací jasně vyplývá možnost existence více MVE na jednom jezovém stupni za podmínky zachování sanačního průtoku tokem. [6]

Pro určení částečně nevyužitého nebo úplně nevyužitého hydroenergetického potenciálu si autoři zvolili dvě kritéria pro výběr vhodných lokalit. Těmito kritérii byl průtok Q_{90} větší než $2 \text{ m}^3/\text{s}$ a výška spádu H větší než $1,5 \text{ m}$. Těmito dvěma kritériím současně vyhovělo pouze 670 jezových stupňů. Po vyjmutí stupňů, kde již MVE existují a stupně jsou plně potenciálně vyčerpány, bylo toto číslo sníženo na pouhých 207 vhodných lokalit pro výstavbu MVE. Následně byl vypočítán teoretický výkon pro jednotlivé elektrárny dle rovnice (2.1). [6]

$$P = H \cdot g \cdot \rho \cdot \eta \cdot (Q_{90} - Q_{SAN} - O) \quad (2.1) [6]$$

Význam jednotlivých členů rovnice (2.1) je popsán v Tabulce 3.

Tabulka 3: Legenda k rovnici (2.1) [6]

P	Výkon MVE [kW]
H	Výška stupně (spád) [m]
g	Gravitační zrychlení [m/s^2]
ρ	Hustota vody [kg/m^3]
η	Účinnost soustrojí (uvažováno 90 %)
Q_{90}	Průtok, který je dosažen nebo překročen 90 dní v roce [m^3/s]
Q_{SAN}	Sanační průtok [m^3/s]
O	Odběr/vypouštění v daném profilu [m^3/s]

Výsledkem je celkový možný instalovaný výkon pro všech 207 lokalit pouze 45 MW, přičemž instalovaný výkon v roce 2012 pro MVE na jezových stupních (celkem 807 elektráren) byl 226,1 MW. Drtivá většina těchto potenciálních elektráren se pohybuje mezi 35 kW a 1 MW instalovaného výkonu. S výkonem pod 35 kW připadá v úvahu 26 MVE a pouhých 5 s výkonem mezi 1 MW a 10 MW (dvě z nich byly v průběhu projektu budovány). [6]

2.5 Porovnání výroby elektrické energie v průběhu několika let

V Tabulce 4 je porovnání výroby elektrické energie a přehled instalovaného výkonu v průběhu let 2010–2019. Z této tabulky můžeme odhadem určit množství srážek v jednotlivých letech podle množství vyrobené elektrické energie E.

Ze zdroje [7] jsou dostupná data okamžitých výkonů na svorkách generátoru všech vodních elektráren v ČR v intervalech 15 min. Při získávání těchto dat jsem využil možnost součtu těchto hodnot za jednotlivé roky. Získaná hodnota je čtyřikrát větší než MWh („4MWh“), což způsobuje sečtení hodnot, které se generují každých 15 min (0,25 h). Jestliže chci dostat hodnoty v MWh, musím tuto hodnotu podělit 4.

Tabulka 4: Přehled E a instalovaného výkonu v minulých letech [7]

Rok	E [4MWh]	E [MWh]	Instalovaný výkon [MW]
2010	8025118,5	2006297	1056,11 [8]
2011	5779701	1444925	1054,6 [9]
2012	6352422	1588106	1069,0 [10]
2013	7816488,5	1954122	1083,0 [11]
2014	4759053	1189763	1080,4 [12]
2015	4564121,5	1141030	1087,5 [13]
2016	5792638,5	1448160	1090,2 [14]
2017	5371024	1342756	1092,7 [15]
2018	4911680	1227920	1092,5 [16]
2019	6427292,5	1606823	1092,8 [17]

Z Tabulky 4 je patrné, že instalovaný výkon se v průběhu deseti let nijak razantně neliší. Veliký rozdíl můžeme pozorovat v množství vyrobené elektřiny v závislosti na množství srážek. Nejvodnatější rok je 2010 (2 TWh), nejsušší naopak 2015 (1,14 TWh). Rozdíl ve výrobě elektřiny mezi nejvodnatějším rokem a nejsušším je přibližně 0,86 TWh.

3 Turbíny využívané ve vodních elektrárnách

3.1 Kaplanova turbína

Kaplanova turbína se řadí mezi přetlakové turbíny a je vhodná pro malé až střední spády. Tato turbína lze využít pro široké měřítko průtoků. U Kaplanovy turbíny je voda přiváděna do spirálovité skříně, následně proudí mezi rozváděcí lopatky upevněné na rozváděcím kole. Turbína obvykle disponuje třemi až deseti lopatkami umístěnými na oběžném kole. Odpadní voda je odváděna savkou do odpadního kanálu, následně zpět do řeky. Toto zařízení pro odvod vody do odpadního kanálu zároveň zajišťuje i podtlak, který vysává vodu z turbíny, čímž zlepšuje její účinnost. [1] [18]



Obrázek 3: Kaplanova turbína [33]

Účinnost turbíny lze korigovat hned dvěma způsoby najednou – natáčením jak rozváděcích lopatek, tak i lopatek oběžného kola. Kromě možnosti natáčení lopatek patří mezi výhody také velká rychloběžnost a možnost turbínu spojit přímo s generátorem. Nevýhodou oproti Francisově turbíně je vyšší cena, která je dána především natáčecím mechanismem lopatek. [1] [18]

3.2 Francisova turbína

Francisova turbína se řadí mezi přetlakové turbíny a je vhodná pro střední spády a střední průtoky. Turbína se nachází ve stěně kašny, přičemž její osa musí být dostatečně vysoko nade dnem kašny, aby nehrozilo zaplavení turbíny nečistotami. Voda z kašny je přiváděna na turbínu přes regulovatelné rozváděcí lopatky, kde získává potřebnou rychlost a směr. Po předání mechanické energie na lopatkách turbíny je voda odváděna savkou do odpadního kanálu. Nachází-li se koleno savky uvnitř kašny, jedná se o tzv. mokrou savku. V opačném případě, kdy koleno savky prochází strojovnou elektrárny, se jedná o tzv. suchou savku. [19]



Obrázek 4: Francisova turbína [34]

Francisova turbína disponuje možností fungovat v reverzním režimu jako čerpadlo. Této funkce se využívá na přečerpávacích elektrárnách. Kromě uvedeného využití jsou touto turbínou osazovány také jezové a derivační vodní elektrárny. [19]

3.3 Peltonova turbína

Peltonova turbína je vhodná především pro velké spády a malé průtoky. Nejvíce se tedy hodí do hornatých oblastí, kde mají pramenící vodní toky malý průtokový potenciál, ale je zde možnost velkého využitelného spádu. Účinnost Peltonovy turbíny se obvykle pohybuje mezi 80 % až 95 %. [20]



Obrázek 5: Peltonova turbína [35]

Voda se na turbínu přivádí potrubím (většinou kruhového průřezu) přes dýzu, kde je veškerá potenciální energie přeměněna na pohybovou energii. Z dýzy paprsek vody dopadá na střed lopatky, tzv. břit, který rozdělí paprsek na dvě poloviny. Po opuštění lopatky padá voda volně do odpadního kanálu pod turbínou. [20]

Pro regulaci paprsku vody slouží jehla, která vsouváním nebo vysouváním do dýzy reguluje paprsek vody. Pro rychlé odstavení turbíny slouží deflektor, který nasměruje vodní paprsek mimo lopatky oběžného kola. [20]

3.4 Bánkiho turbína

Bánkiho turbína je vhodná pro malé spády a malé průtoky (říčky, potoky). Jedná se o rovnotlakou protěkanou turbínu s účinností okolo 80 %. [21]

Voda se na turbínu přivádí potrubím (většinou kruhového průřezu) přes mezikus, který mění průřez z kruhového na obdélný. Při prvním průtoku vody turbínou předá voda přibližně 79 % celkového výkonu, zbývajících 21 % výkonu předá voda při druhém průtoku. [21]



Obrázek 6: Bánkiho turbína [36]

3.5 Šneková turbína

Šneková turbína se řadí mezi gravitační mechanické stroje. Využívá se zde Archimédova šroubu ve zpětném režimu, který se ve starověku používal jako čerpadlo. Voda je na turbínu přiváděna kanálem a vtéká do žlabu turbíny, který má vůči hladině úhel takový, aby voda pomocí gravitace protekla celou turbínou. Při protékání tlačí svou hmotností na listy turbíny, čímž ji roztáčí. Tato turbína je vhodná na MVE se spádem 1-10 m a průtokem 0,1-10 m³/s. [22] [23]



Obrázek 7: Šneková turbína [23]

3.6 Vírová turbína

Vírová turbína je vhodná pro spády 1-5 m a větší průtoky. Funguje na opačném principu než ostatní typy turbín. Voda vtéká do oběžného kola bez rotace a vytéká z něj s rotací. Výhodou je, že turbína nemusí být vybavena rozváděcími lopatkami, což zjednodušuje konstrukci turbíny a výrobní proces. Tím se možnosti jejího využití rozšířily pro lokality s nízkými spády a velkými průtoky. Další úsporu můžeme získat instalací turbíny v násoskovém provedení. Turbína je rychloběžná, což umožňuje její přímé spojení s generátorem. [24] [25]

Na MVE Želina jsou v provozu dvě vírové turbíny v násoskovém provedení s instalovaným výkonem 14,5 kW, kde dosahují až 85% účinnosti. Využívají zde spád 1,9 - 2,4 m a průtok 2 m³/s. [24] [25]



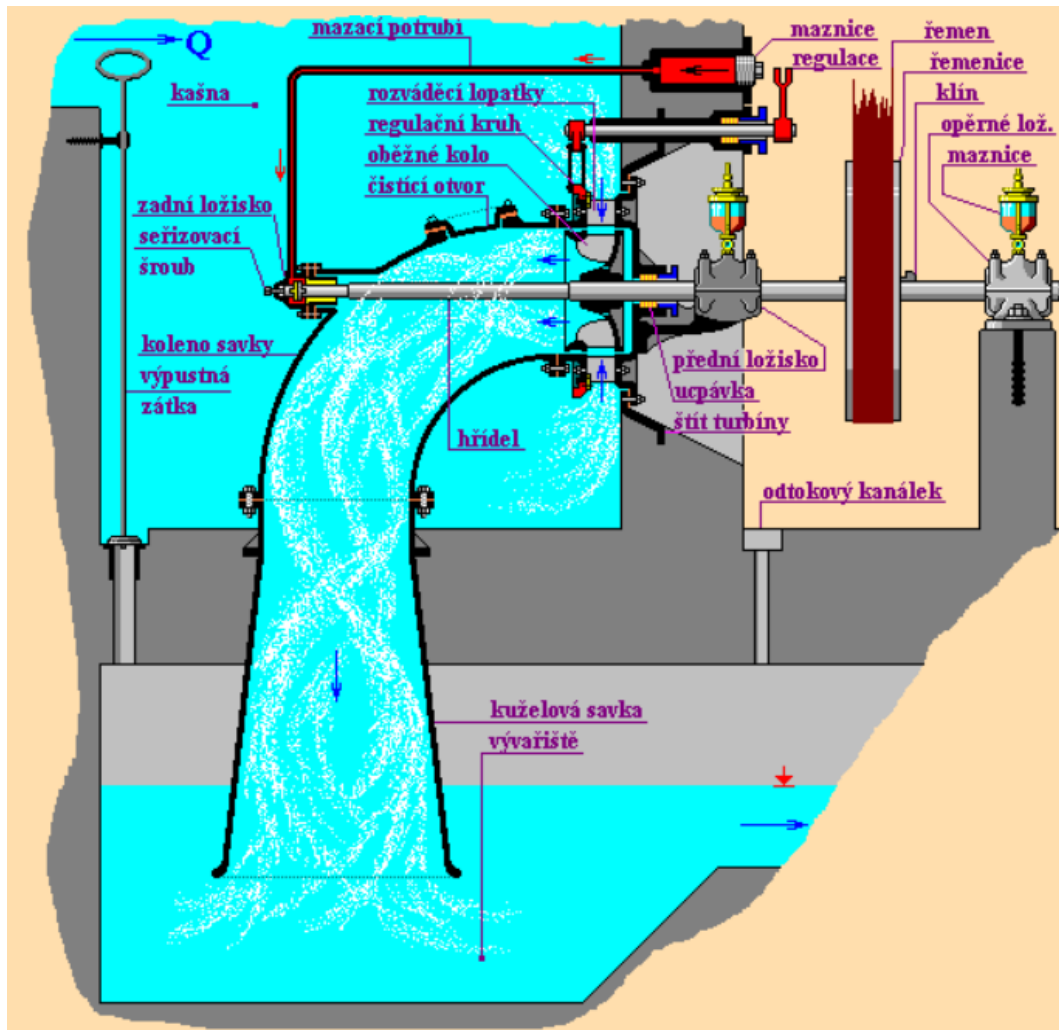
Obrázek 8: Vírová turbína [37]

3.7 Savka

Savka je zařízení určené k vytváření podtlaku za oběžným kolem. Využívá se u přetlakových turbín (Kaplanova, Francisova). Voda protéká oběžným kolem lépe, protože je vsakována do savky, která slouží také jako odpadní kanál. Možnost instalace savky je buď přímo v kašně (mokrý savka), nebo mimo kašnu ve strojovně (suchá savka). [1]

3.7.1 Mokrý savka

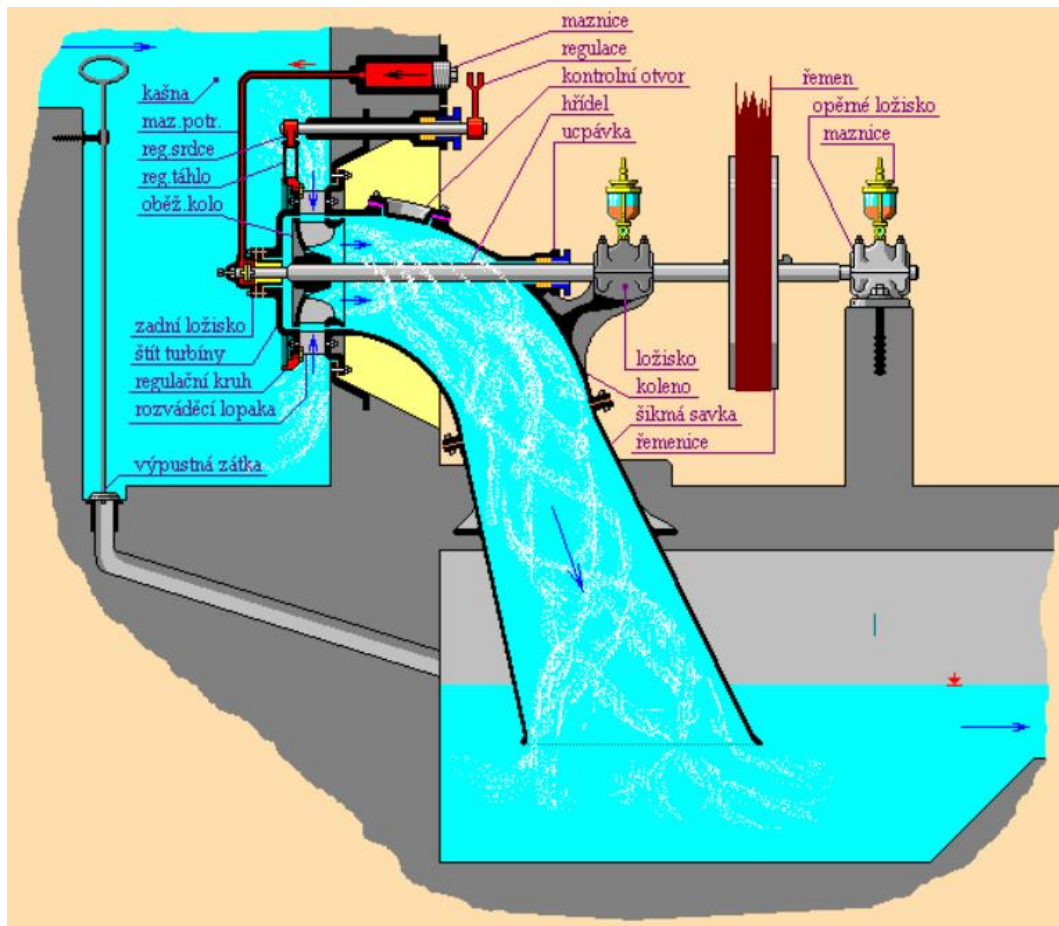
U této instalace odpadu vody je potřeba mít dostatečně velké vývařiště přímo pod kašnou. Tato varianta se nepoužívá, pokud je kašna postavena na nestabilním podloží (písek, navážka). Výhodou mokré savky je minimální prosak a úspora místa ve strojovně. [19]



Obrázek 9: Mokrý savka [19]

3.7.2 Suchá savka

Toto uspořádání odpadu vody se využívá v případě, jestliže není možná instalace mokré savky (nedostatek místa pod savkou na vývařiště, nestabilní podloží uvnitř kašny). Výhodou je snadnější údržba turbíny, jelikož přímo v kašně toto uspořádání odpadu nezabírá příliš místa, které se využívá při montážních pracích. Nevýhodou oproti mokré savce je koleno savky, které zasahuje do prostoru strojovny, a dále fakt, že na provoz turbíny je potřeba minimálně jedno ložisko, které může pracovat pod vodou. [19]



Obrázek 10: Suchá savka [19]

4 Postup návrhu malé vodní elektrárny

Pro návrh malé vodní elektrárny je nutné nejdříve zvolit vhodnou lokalitu. Pro tuto volbu můžeme využít následující možnosti: stávající jezové stupně, využití rybníků nebo jiných akumulacích nádrží, obnovu vodních děl, využití vodárenských objektů pro zásobování pitnou/užitkovou vodou. Po určení dané lokality musíme zjistit hodnoty průtoku, který můžeme využít pro energetické účely (viz. kapitola 4.1) a užitného spádu (viz. kapitola 4.2), abychom byli schopni určit přibližný výkon MVE. Podle parametrů spádu a průtoku jsme schopni navrhnout vhodný typ turbíny (viz. kapitola 4.4).

4.1 Průtok

Průtok je veličina určující množství tekutiny, v našem případě vody, která protéká danou plochou (profilem vodního toku) za jednotku času. Na změření průtoku neexistuje žádná přímá metoda. Pro jeho určení musíme změřit rychlost proudění vody, kterou vynásobíme plochou kolmou na směr tohoto proudění (je nutné znát profil vodní hladiny pro určení plochy). [26]

Průtok se během roku mění v závislosti na počasí a ročním období. K návrhu MVE potřebujeme znát informace o m-denních průtocích. Tyto průtoky je možné získat z [27] nebo obdobných zdrojů. Při výpočtech nesmíme opomenout na odečtení sanačního průtoku od hodnoty m-denního průtoku. Jednotkou průtoku je m^3/s .

4.2 Určení sanačního průtoku

Sanační průtok je minimální zůstatkový průtok, který musí v daném toku zůstat technicky nevyužit. Účelem je zachování ekologických a vodohospodářských funkcí toku. [28]

Zůstatkový průtok může být využit v projektu výstavby/rekonstrukce MVE, např. pro rybí přechod a proud vábíci ryby k němu. [28]

Sanační průtok se většinou určuje podle hodnoty průtoku Q_{355} tak, jak je znázorněno v Tabulce 5.

Tabulka 5: Určení Q_{SAN} podle Q_{355} [28]

Průtok Q_{355}	Sanační průtok (Q_{SAN})
$< 0,05 \text{ m}^3/\text{s}$	Q_{330}
$0,05 - 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$	$(Q_{330} + Q_{355}) * 0,5$
$0,51 - 5 \text{ m}^3/\text{s}$	Q_{355}
$> 5 \text{ m}^3/\text{s}$	$(Q_{355} + Q_{364}) * 0,5$

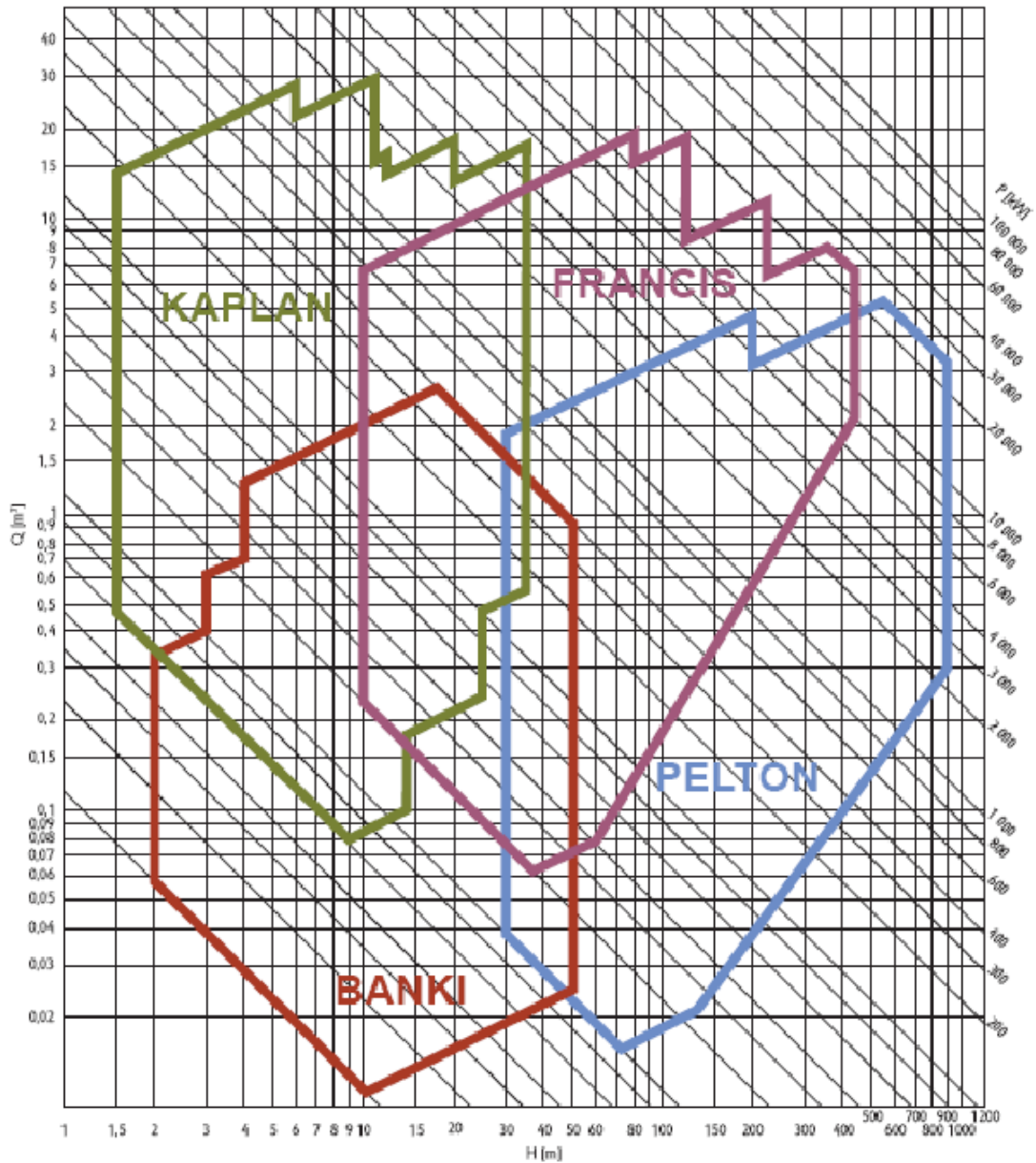
4.3 Spád

Spád je výškový rozdíl mezi horní a dolní hladinou toku udávaný v metrech. Takto definovaný rozdíl hladin označujeme *hrubým spádem* H_b . Pro výpočty je nutné používat tzv. *užitný spád* H_u . Hodnota užitného spádu určuje výškový rozdíl mezi horní hladinou a polohou turbíny. Výškový rozdíl mezi turbínou a dolní hladinou je tzv. *ztrátový spád* H_z . Platí zde vztah uvedený v rovnici (4.1) [26]

$$H_u = H_b - H_z \quad (4.1)$$

4.4 Návrh turbíny

Ze známých hodnot návrhového průtoku a užitého spádu určíme turbínu. K tomuto účelu slouží např. diagram na Obrázku 11, kde můžeme orientačně volit Kaplanovu, Francisovu, Peltonovu nebo Bánkiho turbínu podle průtoku a užitého spádu. Pro přesnější určení turbíny je nutné získat informace od výrobce turbín.



Obrázek 11: Návrhový diagram pro určení typu turbíny [38]

Na území ČR je velmi obtížné nalézt vhodnou lokalitu, která disponuje velkými hodnotami průtoků a spádů. Většinou se při výběru turbín omezuje zejména na Kaplanovu, Bánkiho, vírovou nebo šnekovou turbínu. Vírová a šneková turbína v tomto diagramu zakresleny nejsou, jejich určení je pro menší toky s malými hodnotami průtoků i spádů.

4.4.1 Výkon turbíny

Výkon turbíny P_T určuje rovnice (4.2). Hodnotu účinnosti je nutné dosazovat v desetinném čísle, nikoli v procentech. Číselný výsledek této rovnice je v jednotkách W, pro použití v energetickém průmyslu je nutné tuto hodnotu převést na kW (10^{-3} W), nebo na MW (10^{-6} W). [29]

$$P_T = \rho \cdot (Q - Q_{SAN}) \cdot g \cdot H \cdot \eta_T \quad (4.2)$$

4.5 Celkový výkon elektrárny

Pro výpočet celkového výkonu elektrárny je nutné nejprve určit výkon jednotlivých generátorů v elektrárně. Výkon generátoru určíme podobně, jako výkon turbíny. Vzorec je podobný, liší se jen v účinnosti. Namísto účinnosti turbíny η_T musíme dosadit celkovou účinnost η_C . Takto obměněná účinnost je zobrazena v rovnici (4.3). [29]

$$P_G = \rho \cdot (Q - Q_{SAN}) \cdot g \cdot H \cdot \eta_C \quad (4.3)$$

Celkovou účinnost η_C určíme jako násobek účinností všech převodů, účinnosti generátoru a turbíny, jak je znázorněno v rovnici (4.4). Jestliže je turbína spojena s generátorem napřímo, účinnost převodu je rovna 100 %. Účinnost převodu bývá obvykle 94–100 % a účinnost generátoru se většinou pohybuje mezi 88 % a 94 %. [29]

$$\eta_C = \eta_G \cdot \eta_T \cdot \sum \eta_P \quad (4.4)$$

Jestliže dosadíme rovnici (4.4) do rovnice (4.3), dostáváme rovnici (4.5) určující výkon generátoru v základním tvaru.

$$P_G = \rho \cdot (Q - Q_{SAN}) \cdot g \cdot H \cdot \eta_G \cdot \eta_T \cdot \sum \eta_P \quad (4.5) [29]$$

Výkon celé elektrárny je součtem všech výkonů generátorů elektrárny, což znázorňuje rovnice (4.6).

$$P_C = \sum P_G \quad (4.6)$$

Význam jednotlivých veličin z rovnic (4.2), (4.3), (4.4), (4.5) a (4.6) je vysvětlen v Tabulce 6.

Tabulka 6: Význam veličin použitých v rovnicích (4.2) - (4.6) [29]

Název veličiny	Označení veličiny	Jednotka
Celkový výkon	P_C	W, kW, MW
Výkon generátoru	P_G	W, kW, MW
Výkon turbíny	P_T	W, kW, MW
Hustota vody	ρ	kg/m ³
Průtok, na který je turbína dimenzována	Q	m ³ /s
Sanační průtok	Q_{SAN}	m ³ /s
Tíhové zrychlení	g	m/s ²
Užitný spád	H	m
Celková účinnost	η_C	%, 1
Účinnost generátoru	η_G	%, 1
Účinnost převodu	η_P	%, 1
Účinnost turbíny	η_T	%, 1

4.6 Ekonomické zhodnocení

Při rozhodování, zda se zařízení ekonomicky vyplatí či nikoliv je důležitým rozhodovacím kritériem čistá současná hodnota zisku po N letech provozování VE. Nejprve je nutné provést výpočet nebo odhad počáteční investice pro výstavbu/renovaci elektrárny a jejího zařízení. Často se musí ceny odhadovat, nebo porovnávat s jinými, již stojícími elektrárnami.

Druhý krok je určení ročního zisku elektrárny. Pro tento výpočet je nutné zjistit výkupní cenu elektřiny, a vypočítat hodnotu zisku např. podle rovnice (5.11), v nultém roce z rovnice (5.12).

Čistou současnou hodnotu můžeme vypočítat např. vztahem uvedeným v rovnici (5.10). Názornější možný postup je uveden v kapitole 5.6.

5 Konkrétní návrh MVE

V návrhové části jsem se věnoval jak výběru vhodné lokality pro umístění MVE, tak vyhodnocení hydrologických podmínek, výpočtům a následnému výběru typu turbíny a ekonomickému zhodnocení. Data pro zpracování návrhu mi poskytl Ing. Josef Sedláček, odborný expert na VE.

5.1 Výběr lokality

Lokalitu pro návrh malé vodní elektrárny jsem si vybral v kraji Vysočina na řece Želivce, říční kilometr 48,757. Na tomto místě je jezový stupeň s dnes nefungující MVE Tuklečský mlýn, patřící pod obec s rozšířenou působností Humpolec (okres Pelhřimov, místo Senožaty) a spadající pod katastrální území Tukleky [771431].



Obrázek 12: Původní jez před úpravou, foto Josef Sedláček

5.2 Hydrologické podmínky

Od pana Ing. Josefa Sedláčka jsem dostal informace o m-denních a N-letých průtocích viz. Tabulka 7 a Tabulka 8. Na jezovém stupni byla provedena úprava za účelem zvednutí horní hladiny. Užité spád je zde po úpravě 1,8 m.

Tabulka 7: Zadané m-denní průtoky

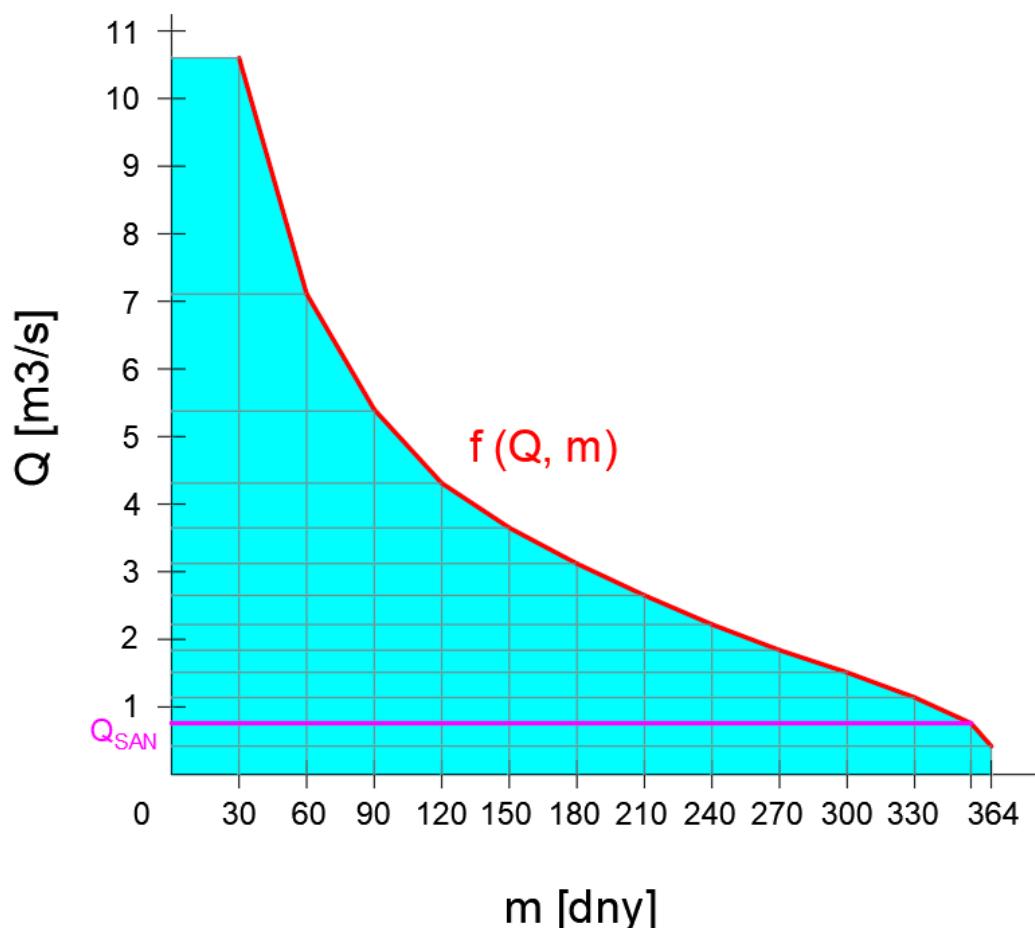
m [dny]	30	60	90	120	150	180	210	240
Q [m ³ /s]	10,6	7,11	5,40	4,31	3,65	3,12	2,65	2,22

m [dny]	270	300	330	335	364
Q [m ³ /s]	1,84	1,51	1,14	0,76	0,42

Tabulka 8: Zadané N-leté průtoky

N [roky]	1	2	5	10	20	50	100
Q [m ³ /s]	44	72	117	151	190	241	278

Z hodnot m-denních průtoků z Tabulky 7 jsem vytvořil průtokový graf, do kterého jsem vyznačil sanační průtok Q_{SAN} (určení Q_{SAN} v kapitole 4.2), viz. Obrázek 13. Tento graf jsem v kapitole 5.6 využil pro určení množství vyrobené energie za rok pro jednotlivé uvažované turbíny.



Obrázek 13: Průtokový graf

5.3 Výběr typu turbíny

Nejdříve jsem se rozhodoval, jaký typ turbíny je vhodný pro mnou navrhovanou MVE. Vzal jsem v úvahu dostupné typy turbín na trhu a porovnal vlastnosti jednotlivých typů s ohledem na použitelnost v dané lokalitě. Konkrétně jsem se zaměřil na vhodnost nebo nevhodnost Peltonovy, Francisovy, Kaplanovy, Bánkiho, vírové a šnekové turbíny. Konkrétní návrh MVE by měl dle zadání být ve více variantách. Podle následující úvahy jsem určil typ turbíny, kterou jsem v kapitole 5.7 vyhodnocoval pro různé návrhové průtoky.

Peltonova turbína není vhodná kvůli velmi malému spádu. Tato turbína je použitelná v prostředí, kde je spád desítky, lépe stovky metrů. Při použití na mnou zvolené lokalitě by se buď neroztočila vůbec, nebo velmi málo. Účinnost Peltonovy turbíny v podmínkách na MVE Tuklecký mlýn by byla minimální.

Pro Francisovu turbínu je zde spád sice příznivější než u Peltonovy turbíny, stále však není dostatečně velký na to, aby byl pro Francisovu turbínu optimální. Tato turbína by nejspíše byla schopná v dané lokalitě fungovat, ale nedosahovala by uspokojivých optimálních výkonů.

Kaplanova turbína je v tomto případě více vyhovující typ turbíny než turbína Francisova. Je určena pro menší spády a zabírá poměrně velkou škálu velikostí průtoků. Tato turbína je použitelná na mnou zvolené lokalitě ve více typových variantách.

Bánkiho turbína by zde měla nestálou a velmi malou účinnost vlivem kolísání horní i spodní hladiny. Tato turbína se mnohem hůře reguluje na nekonstantní průtok než turbína Kaplanova, která na rozdíl od Bánkiho turbíny disponuje možností naklápění lopatek dle potřeby. Jelikož zde není příliš velký prostor pro vytvoření vtoku do přiváděcího mechanismu na lopatky turbíny, musel by být vytvořen blízko horní hladiny. S jejím poklesem by kleslo množství vody přitékající k turbíně, což by mělo velký důsledek v poklesu účinnosti. Pro nedostatek místa by musela turbína být umístěna těsně nad dolní hladinu řeky. Při zvýšení dolní hladiny by se dostávala voda do turbíny z druhé strany, čímž by turbíně rapidně ubrala na účinnosti.

Šneková turbína má na mnou zvolené lokalitě dostačující podmínky. Vyhovuje jak velikost spádu, tak i velikost průtoku. Tato turbína je vhodný typ turbíny pro moji navrhovanou MVE.

Pro vírovou turbínu je v daném místě sice vyhovující velikost spádu, ale průtok je spíše horší. Vírová turbína je navržena pro větší průtoky, zde je průtok malý. Tato turbína je na mnou zvolené lokalitě nevyhovující.

Pro návrh MVE Tuklecký mlýn připadají v úvahu turbíny Kaplanova a šneková. Zvolil jsem Kaplanovu turbínu, k níž mám dostupnější konkrétní data.

5.4 Určení sanačního průtoku

Sanační průtok jsem určil podle kapitoly 4.2. Jelikož je můj průtok $Q_{355} = 0,76 \text{ m}^3/\text{s}$, který spadá do kategorie: $Q_{355} \in (0,51; 5) \text{ m}^3/\text{s}$, podle Tabulky 5 platí:

$$Q_{SAN} = Q_{355} = 0,76 \text{ m}^3/\text{s}.$$

5.5 Zadaná turbína

Dostal jsem k dispozici kompletní informace o přímoproudé Kaplanově turbíně s označením KP 1050K3, jedná se o typ PIT (parametry turbíny viz. Tabulka 9). Tuto turbínu vyrábí společnost Mavel a.s. a veškeré informace o ní jsem získal od Ing. Josefa Sedláčka. Turbína je zpřevodována řemenovým převodem do rychla pomocí plochého řemenu. Regulace turbíny je řešena pomocí rozváděcích a oběžných lopatek. S touto turbínou je v ceně i asynchronní generátor na napínacím rámu nad turbínou. Cena této turbíny včetně příslušenství, generátoru, elektro částí, montáže a UDP je 8 000 000 Kč. Tato turbína je navržena pro návrhový průtok $Q_n = 3,5 \text{ m}^3/\text{s}$, po odečtení Q_{SAN} .

Jelikož jsem měl jednu turbínu a celkem 6 návrhových průtoků, uvažoval jsem parametry této turbíny (zejména závislost účinnosti na průtoku) stejné pro všechny mé návrhy. Liší se bude pouze cena, kterou jsem uvažoval lineárně závislou na výkonu turbíny. Konkrétní ceny turbín pro jednotlivé návrhové průtoky jsou uvedeny v Tabulce 16.

Tabulka 9: Parametry zadané turbíny KP 1050 K3

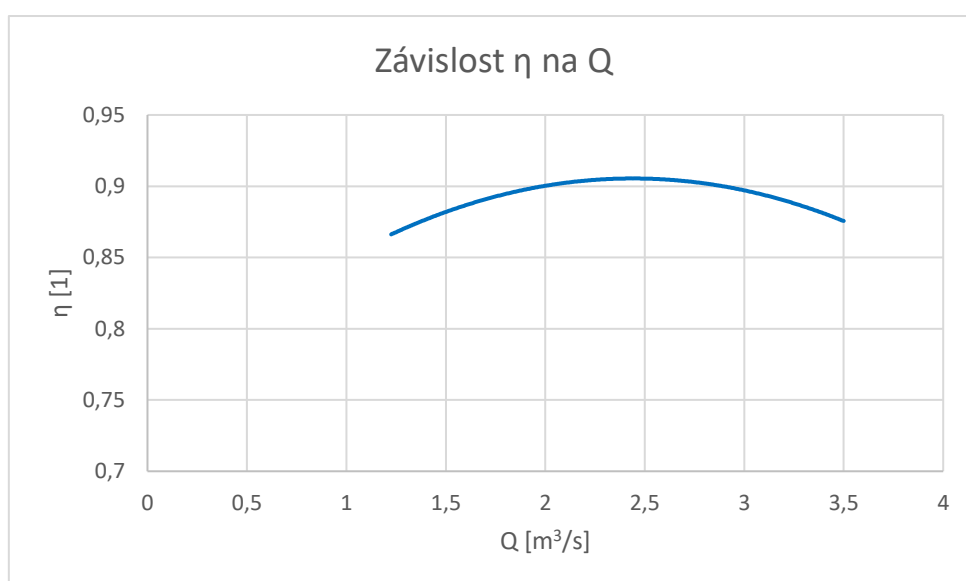
	Q [m ³ s ⁻¹]	η [%]	P [kW]
Q _{max}	3,7	86,385	56,3527
Q _n	3,5	87,317	53,9406
Q _{opt}	2,25	90,544	35,9424
Q _{min}	0,81312	85,510	2,272

Dostal jsem k dispozici závislost účinnosti turbíny na průtoku, data jsou v Tabulce 10. Veličina R určuje procento z návrhového průtoku Q_n, na který je tato turbína dimenzována. Platí tedy vztah: Q_R = R * Q_n. Z Tabulky 10 je patrné, že daná turbína je plně funkční i při dodávce zhruba 25 % z návrhového průtoku Q_n.

Tabulka 10: Závislost účinnosti na průtoku zadané turbíny

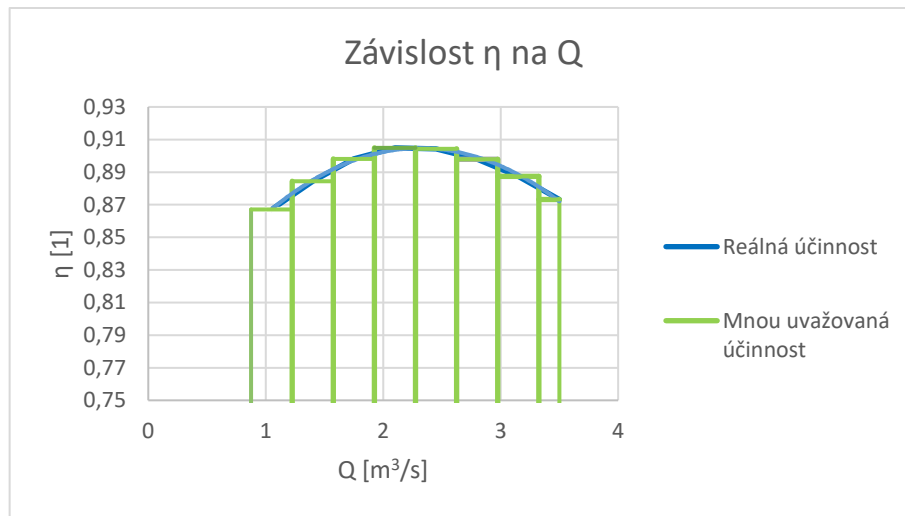
R [1]	Q _R [m ³ s ⁻¹]	η [%]
0,1	0,35	0
0,2	0,7	0
0,3	1,05	86,71
0,4	1,4	88,44
0,5	1,75	89,81
0,6	2,1	90,49
0,7	2,45	90,43
0,8	2,8	89,79
0,9	3,15	88,74
1,0	3,50	87,32

Pro své výpočty jsem uvažoval, že zadaná účinnost platí v rozsahu ± 5 %. Na Obrázku 14 je zobrazen graf závislosti průtoku na účinnosti, data jsem čerpal z Tabulky 10.



Obrázek 14: Graf závislosti účinnosti na průtoku zadané turbíny

Do tohoto grafu jsem zobrazil mnou uvažovaný rozsah účinnosti, tato úprava je zobrazena na Obrázku 15. Mnou uvažovaná účinnost turbíny zanesla do výpočtů určitou chybu, která mi způsobila drobnou nepřesnost výsledků.

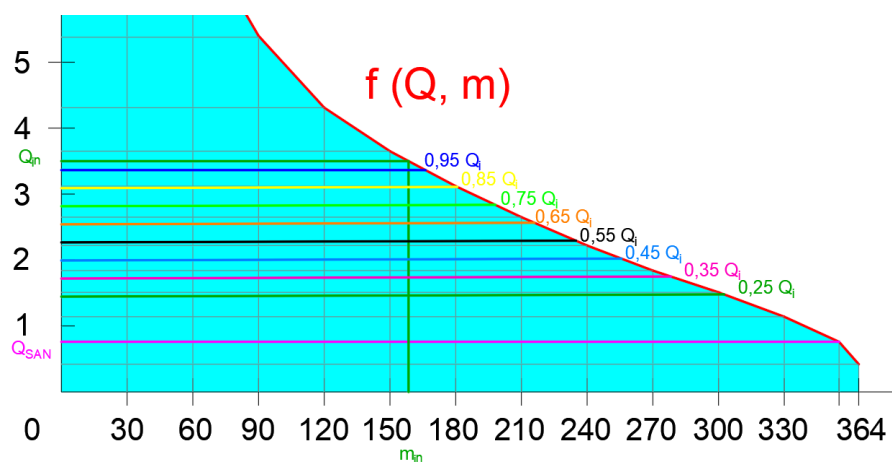


Obrázek 15: Graf mnou uvažované závislosti účinnosti na průtoku

5.6 Výpočetní postup

Jelikož jsem měl k dispozici graf průtoků v závislosti na čase jejich trvání, mohl jsem z tohoto grafu odečítat hodnoty pro zakreslené Q_{in} a R. Protože zadané účinnosti turbíny byly pouze do 100 % návrhového průtoku Q_n uvažoval jsem tento průtok po odečtení sanačního průtoku Q_{SAN} jako hltnost turbíny (= maximální průtok Q_{max}). Na Obrázku 16 je zobrazen princip mého postupu. Vše bylo zakresleno do Obrázku 13, na Obrázku 16 je zobrazen detail pro lepší přehlednost.

Nejprve byl zakreslen návrhový průtok Q_{in} (= Q_{max}). Poté jsem vypočetl průtok Q_i podle vzorce z rovnice (5.1) a tuto hodnotu rozdělil po 5 % a 10 % viz. průtokový graf na Obrázku 16. Pro tyto průtoky lze odečíst počet dní m (v grafu zobrazen odečet pro průtok Q_{in}).

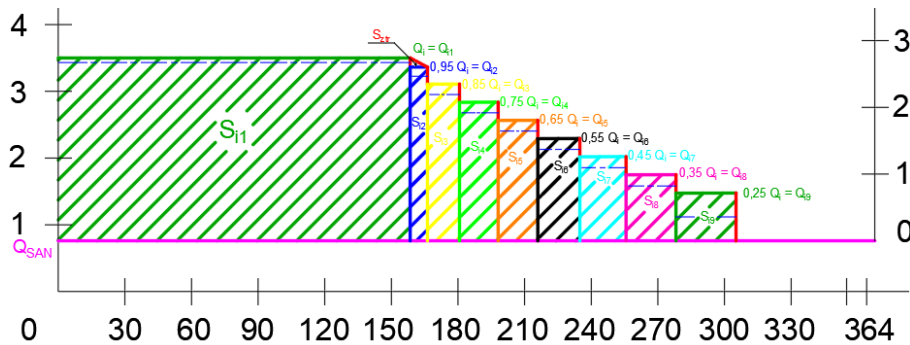


Obrázek 16: Dělení Q_{in}

Průtok Q_i , který je znázorněn na Obrázcích 16 a 17 jsem vypočetl ze vztahu uvedeném v rovnici (5.1). Tímto krokem jsem posunul nulovou hodnotu průtoků do Q_{SAN} . Pro názornější ukázkou této mé úvahy jsem do Obrázku 17, na kterém jsou znázorněny úpravy vedoucí k lepší práci s grafem, zakreslil pomocnou osu pro přímý odečet průtoků Q_{ij} .

Úpravou grafu provedenou dle Obrázku 17, jsem se dopustil drobné chyby ve výpočtu (moje hodnoty jednotlivých S_{ij} budou menší o znázorněnou plochu S_{ztr}). Následně jsem mohl vypočíst obsahy ploch S_{ij} , kde $j \in \langle 1; 9 \rangle$. Na Obrázku 17 je pro každou plochu S_{ij} zobrazen čerchovanou čarou střední průtok $Q_{stř}$ pro výpočet výkonu v jednotlivých oblastech.

$$Q_i = Q_{in} - Q_{SAN} \quad (5.1)$$



Obrázek 17: Zobrazení S_{ij} do upraveného průtokového grafu

Výpočet obsahu plochy S_{ij} jsem provedl pomocí vzorce z rovnice (5.2).

$$S_{ij} = \iint_S dS \quad (5.2)$$

Po dosazení mezí do integrálu: $m \in \langle m_{ij}; m_{i(j+1)} \rangle$ a $Q \in \langle 0; Q_{ij} \rangle$ a vztahu $dS = dQ dm$ jsem dostal rovnici (5.3). Hodnoty jednotlivých Q_{ij} byly počítány z rovnice (5.1).

$$S_{ij} = \iint_{m_{ij}^0}^{m_{i(j+1)} Q_{ij}} dQ dm \quad (5.3)$$

Po integraci vypadá výsledný vztah pro výpočet plochy S_{ij} [$m^3 \text{ den}^{-1}$] dle rovnice (5.4).

$$S_{ij} = (Q_{ij} - Q_{SAN}) * (m_{i(j+1)} - m_{ij}) \quad (5.4)$$

Pro další výpočty je nutné převést dny na hodiny. Z tohoto důvodu jsem celou pravou stranou rovnice vynásobil 24. Výsledný vztah je dle rovnice (5.5) pro S_{ij} [$m^3 \text{ h}^{-1}$].

$$S_{ij} = (Q_{ij} - Q_{SAN}) * (m_{i(j+1)} - m_{ij}) * 24 \quad (5.5)$$

Pro výpočet plochy S_{i1} , kde $m_{ij} = 0$ lze použít upravený vzorec v rovnici (5.6), který jsem získal po dosazení do rovnice (5.5).

$$S_{i1} = (Q_{i1} - Q_{SAN}) * m_{i1} * 24 \quad (5.6)$$

Pro získání hodnoty množství vyrobené elektrické energie E [Wh/rok] byla nejdříve každá plocha S_{ij} vynásobena příslušnou účinností a koeficientem K [$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$], který je definovaný v rovnici (5.7). Provedl jsem součet všech takto vynásobených ploch S_{ij} a dostal výslednou hodnotu E dle rovnice (5.8).

$$K = H \rho g \eta_P \eta_G \quad (5.7)$$

$$E = K \sum_{j=1}^9 S_{ij} \eta_{Tj} \quad (5.8)$$

Poměrná cena PC [Kč/kW] slouží v mém případě spíše informativně. Vztáhnul jsem celkovou cenu elektrárny na jednotku výkonu. Výpočetní vztah je uveden v rovnici (5.9). Tato hodnota ukazuje, kolik stojí jedna kW výkonu v mnou navržené MVE.

$$PC = \frac{\text{Cena elektrárny}}{P_{max}} \quad (5.9)$$

Moje srovnávací kritérium pro porovnání jednotlivých návrhových variant byla *čistá současná hodnota ČSH*, kterou jsem vypočetl pomocí vztahu uvedeném v rovnici (5.10).

$$\check{C}SH = \sum_{T=0}^N CF * (1 + d)^{-T} \quad (5.10)$$

Ve rovnici (5.10) jsem uvažoval veličinu *cash flow* CF (= roční peněžní tok) jako hodnotu zisku, který byl získán rozdílem výnosů a nákladů za rok. Tento vztah je uveden v rovnici (5.11). Diskontní míra d se pohybuje většinou v řádu jednotek procent.

$$CF = Z = V - NK \quad (5.11)$$

V nultém roce, tj. v roce, kdy je elektrárna uvedena do provozu, byla do výpočtu zahrnuta také hodnota investice podle rovnice (5.12).

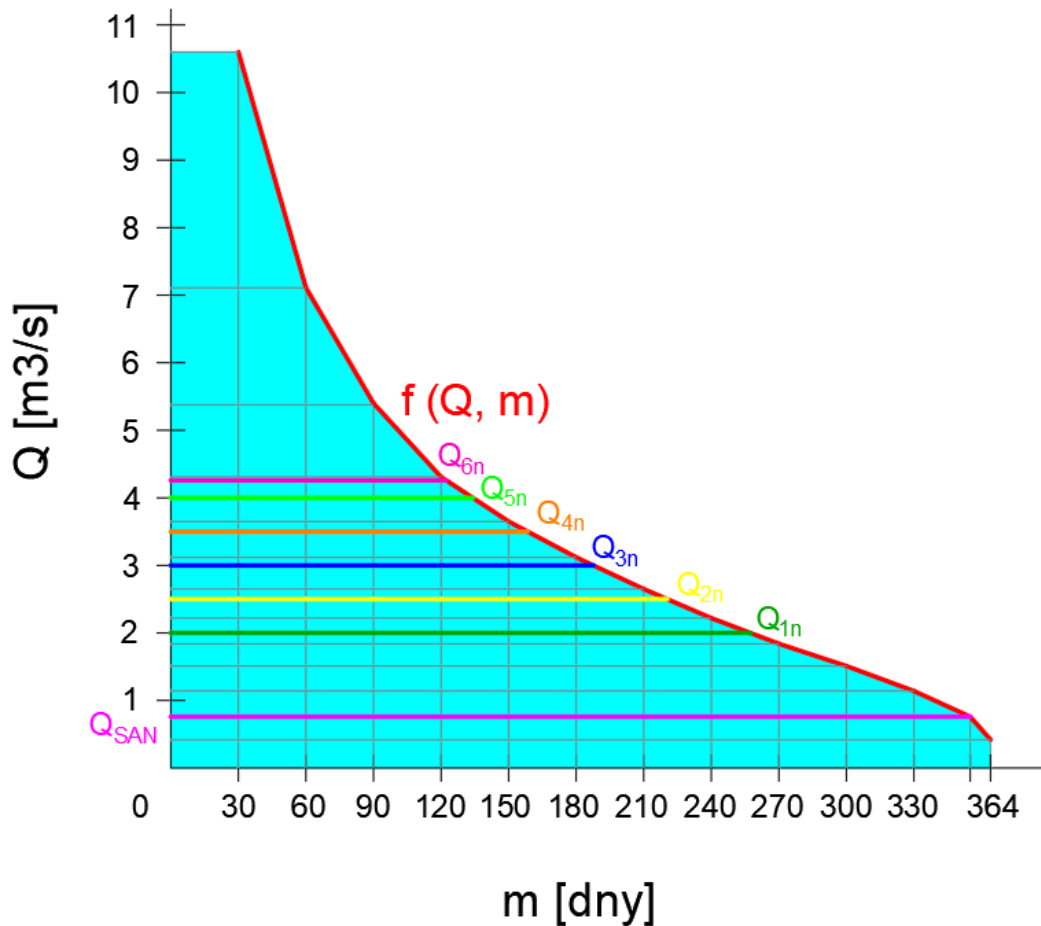
$$CF = Z = V - NK - I \quad (5.12)$$

Hodnotu ročního výnosu jsem určil jako součin množství vyrobené elektrické energie za rok a výkupní cenou elektrické energie podle vztahu uvedeném v rovnici (5.13).

$$V = E \cdot C_{el.energie} \quad (5.13)$$

5.7 Volba průtoků

Rozhodl jsem se, že svůj návrh MVE provedu v šesti variantách. Návrhové průtoky Q_n jsem volil v rozmezí 2–4 m³/s a krokem 0,5, jelikož v tomto rozmezí byla očekávána nejvýhodnější varianta. Šestou variantu jsem uvažoval pro průtok 4,26 m³/s, protože turbína, k níž mám dostupná data, má hltnost 3,5 m³/s. Jestliže k této hltnosti přičtu sanační průtok, dostávám hodnotu 4,26 m³/s. Všechny moje návrhové průtoky Q_{in} , kde $i \in \{1; 6\}$ jsou zobrazeny na Obrázku 18.



Obrázek 18: Vyznačení mnou uvažovaných Q_{in} do průtokového grafu

Použil jsem postup popsáný v kapitole 5.6, zakreslil jsem jednotlivé návrhové průtoky do grafu, rozdělil v něm průtoky dle popsaného postupu a z grafu odečetl hodnoty, které jsem pomocí rovnice (5.1) přepočtl a zobrazil v Tabulce 11 a Tabulce 12. Přepočet měřítka pro určení m_i je uveden v Příloze 1. Pomocí vzorce z rovnice (4.2) jsem vypočetl výkony $P_{stř}$ pro střední průtoky $Q_{stř}$ v jednotlivých plochách S_{ij} (na Obrázku 17 jsou zobrazeny čerchovanou čarou). Výpočty a výsledky jsou také uvedeny v Příloze 1.

Tabulka 11: Hodnoty Q_i

R [l]	Q_1 [m ³ /s]	Q_2 [m ³ /s]	Q_3 [m ³ /s]	Q_4 [m ³ /s]	Q_5 [m ³ /s]	Q_6 [m ³ /s]
1	1,24	1,74	2,24	2,74	3,24	3,5
0,95	1,178	1,653	2,128	2,603	3,078	3,325
0,85	1,054	1,479	1,904	2,329	2,754	2,975
0,75	0,93	1,305	1,68	2,055	2,43	2,625
0,65	0,806	1,131	1,456	1,781	2,106	2,275
0,55	0,682	0,957	1,232	1,507	1,782	1,925
0,45	0,558	0,783	1,008	1,233	1,458	1,575
0,35	0,434	0,609	0,784	0,959	1,134	1,225
0,25	0,31	0,435	0,56	0,685	0,81	0,875

Tabulka 12: Hodnoty m_i

R [l]	m_1 [dny]	m_2 [dny]	m_3 [dny]	m_4 [dny]	m_5 [dny]	m_6 [dny]
1	257,4	220,4	187,6	158,4	134	122,2
0,95	262,22	226,6	194,8	166,2	141,4	130,2
0,85	272,4	238,6	209,2	180,6	157,6	146,2
0,75	283,6	252,2	224,6	198	176	165
0,65	295	266	240,4	215	196,2	185,4
0,55	305,6	281,2	258	234,8	217,6	207,8
0,45	315,6	297	276,6	255,6	240,2	232
0,35	325,6	311,4	297	278,2	265,8	258,6

5.8 Výsledné hodnoty

V Tabulce 13 je přehled výsledných hodnot pro jednotlivé plochy S_{ij} a koeficientu K . Hodnoty jsou zaokrouhleny na celá čísla, přesné hodnoty i s výpočty jsou uvedeny v Příloze 3. Pro výpočet ploch jsem použil vzorce z rovnic (5.4) a (5.5). Vztah pro výpočet koeficientu jsem uvažoval dle rovnice (5.6). Do koeficientu K jsem dosadil hodnotu spádu $H = 1,8$ m, gravitačního zrychlení $9,81$ m/s², hustoty vody při 15 °C: $\rho = 999$ kg/m³ [30], účinnost generátoru $\eta_G = 92$ % a účinnost převodu $\eta_P = 97$ %.

Tabulka 13: Hodnoty ploch S_{ij} a K

Návrhový průtok Q_n	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6
K [kg m ⁻¹ s ⁻²]	15742	15742	15742	15742	15742	15742
S_{i1} [m ³ h s ⁻¹]	383	460	504	521	521	513
S_{i2} [m ³ h s ⁻¹]	780	946	1047	1093	1100	1094
S_{i3} [m ³ h s ⁻¹]	711	996	1125	1188	1226	1228
S_{i4} [m ³ h s ⁻¹]	844	1053	1207	1302	1369	1386
S_{i5} [m ³ h s ⁻¹]	878	1111	1292	1420	1526	1557
S_{i6} [m ³ h s ⁻¹]	909	1174	1387	1544	1692	1746
S_{i7} [m ³ h s ⁻¹]	939	1240	1487	1681	1868	1949
S_{i8} [m ³ h s ⁻¹]	969	1300	1597	1829	2067	2172

V Tabulce 14 jsou zobrazeny zaokrouhlené výsledky množství vyrobené elektrické energie za rok pro jednotlivé návrhové průtoky. Pro tyto průtoky jsem také spočítal výkon P_{max} pro maximální průtok na turbínu Q_{max} (hltnost turbíny). Výkon jsem počítal pomocí rovnice (4.2). Podle tohoto výkonu jsem linearizoval a přepočítával ceny jednotlivých turbín. Veškeré výpočty a přesné výsledky jsou uvedeny v Příloze 1 a Příloze 3. V Příloze 2 jsou uvedeny výsledné hodnoty ploch S_{ij} .

Tabulka 14: Výsledné hodnoty E , P_{max}

	Q_{max} [m ³ /s]	E [kWh/rok]	E [MWh/rok]	P_{max} [kW]
Q ₁	1,24	100654	101	19,1
Q ₂	1,74	128134	128	26,8
Q ₃	2,24	149433	149	34,5
Q ₄	2,74	164058	164	42,2
Q ₅	3,24	176533	177	49,9
Q ₆	3,5	180963	181	53,9

Provedl jsem zjednodušený odhad investičních nákladů. Ze známé ceny turbíny pro průtok Q_6 , jsem vypočetl cenu stavebních prací, kterou budu uvažovat pro všechny návrhové varianty totožnou.

Odhadnul jsem celkovou cenu elektrárny, od které jsem poté odečetl cenu turbíny, ve které je zahrnuto vše, kromě stavebních prací. Bral jsem v úvahu celkem tři různé varianty, minimální cenu C_{min} , střední cenu $C_{stř}$ a maximální cenu C_{max} . Odhadnul jsem cenu elektrárny vztahenou na kW maximálního výkonu. Maximální výkon P_{max} pro návrhový průtok Q_6 je 53,9 kW. Moje odhadované a vypočtené částky ceny jsou uvedeny v Tabulce 15. Výsledné porovnání výsledků pro tři různé velikosti investic považuji za citlivostní analýzu ČSH na investicích. Z toho plyne, že změna výše investice neovlivní volbu optimální návrhové varianty.

Tabulka 15: Odhadované a vypočtené ceny MVE

	Odhad ceny [Kč/kW]	Cena elektrárny [Kč]	Cena stavby [Kč]
Minimální cena	160 000	8 624 000	624 000
Střední cena	180 000	9 702 000	1 702 000
Maximální cena	200 000	10 780 000	2 780 000

Jelikož mám k dispozici cenu turbíny pro návrhový průtok Q_6 , cenu ostatních turbín jsem dopočítával pomocí vztahu v rovnici (5.14). Uvažuji lineární průběh mezi cenou a výkonem.

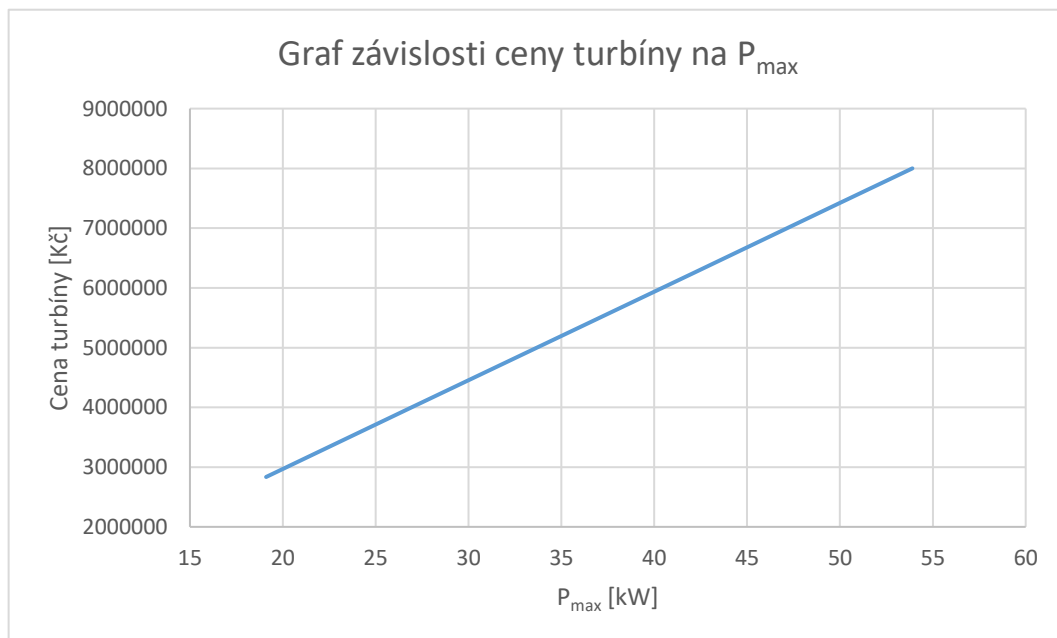
$$Cena\ turbíny = \frac{8\,000\,000 * P_{max}}{53,9} \quad [Kč] \quad (5.14)$$

Cenu stavebních úprav terénu a budovy strojovny jsem uvažoval v rozmezí 624 000 – 2 780 000 Kč, viz. Tabulka 15. Výsledné ceny turbíny pro jednotlivé návrhové průtoky jsou uvedeny v Tabulce 16.

Tabulka 16: Vypočtené ceny turbín pro jednotlivé Q_{in}

Návrhový průtok	P_{max} [kW]	Cena turbíny [Kč]
Q_1	19,1	2 834 879
Q_2	26,8	3 977 727
Q_3	34,5	5 120 594
Q_4	42,2	6 263 451
Q_5	49,9	7 406 308
Q_6	53,9	8 000 000

Pomocí hodnot z Tabulky 16 jsem vytvořil graf, ze kterého lze odečíst cenu pro libovolný maximální výkon P_{max} v rozmezí 19,1 – 53,9 kW. Tento graf je na Obrázku 19.



Obrázek 19: Graf závislosti ceny turbíny na P_{max}

V Tabulce 17 jsou výsledné hodnoty minimální, střední a maximální ceny elektrárny pro jednotlivé návrhové průtoky. Dále je zde uvedena poměrná cena PC [Kč/kW], kterou jsem vypočetl vztahem z rovnice (5.8).

Tabulka 17: Přehled ceny elektrárny a PC pro jednotlivé průtoky

Návrhový průtok	C_{\min} [Kč]	$C_{\text{stř}}$ [Kč]	C_{\max} [Kč]	PC_{\min} [Kč/kW]	$PC_{\text{stř}}$ [Kč/kW]	PC_{\max} [Kč/kW]
Q ₁	3 458 879	4 536 879	5 614 879	181 093	237 533	293 973
Q ₂	4 601 737	5 679 737	6 757 737	171 707	211 930	152 154
Q ₃	5 744 594	6 822 594	7 900 594	166 510	197 756	229 003
Q ₄	6 887 451	7 965 451	9 043 451	163 210	188 755	214 300
Q ₅	8 030 308	9 108 308	10 186 308	160 928	182 531	204 134
Q ₆	8 624 000	9 702 000	10 780 000	160 000	180 000	200 000

Z Tabulky 17 je zřejmé, že poměrná cena se snižujícím se P_{\max} roste. Znamená to, že podle poměrné ceny by se nejvíce vyplatila varianta pro návrhový průtok Q₆. Toto kritérium ale pouze poukazuje na fakt, že čím vyšší instalovaný výkon v MVE bude, tím budou náklady na 1 kW tohoto výkonu menší. Poměrná cena je pouze informativní, na neefektivnější variantu nemá žádný vliv.

Pro výpočet výnosů jsem ze zdroje [31] získal informace ohledně výkupní ceny elektrické energie pro letošní rok (2020). Výkupní cena pro MVE uvedené do provozu v rozmezí 1.1.2020 - 31.12.2020 a jsou vybudovány ve stávajících lokalitách je 2,214 Kč/kWh. Pro své výpočty jsem zanedbal růst cen elektrické energie v čase a inflaci.

Jako kompenzaci všech chyb zavedených do výpočtů (např. zjednodušený odhad investičních a provozních nákladů, neuvažování plochy S_{ztr} , linearizace ceny turbíny, zanedbání zdanění zisků, zanedbání inflace a růstu cen v čase) jsem neuvažoval žádnou dotaci pro výstavbu nebo provoz MVE. Pracoval jsem pouze se zvýhodněnou výkupní cenou elektrické energie. Vypočetl jsem hodnotu výnosů pro jednotlivé návrhové varianty podle rovnice (5.13). Ze vztahu v rovnici (5.12) byl vypočítán zisk za rok. Náklady na údržbu MVE jsem odhadnul na 100 000 Kč/rok (přibližně 1 % z $C_{\text{stř}}$ pro Q₆), tuto hodnotu uvažuji pro všechny návrhové varianty stejnou.

V Tabulce 18 jsou zobrazeny hodnoty výnosů a zisků za rok pro jednotlivé návrhové varianty.

Tabulka 18: Výnosy a zisky za rok

Návrhový průtok	E [kWh/rok]	Výnos [Kč/rok]	Náklady [Kč/rok]	Zisk [Kč/rok]	Zisk v nultém roce [Kč/rok]
Q ₁	124 195	274 967	100 000	174 967	-4 361 912
Q ₂	161 341	357 209	100 000	257 209	-5 422 528
Q ₃	215 588	425 120	100 000	325 120	-6 497 474
Q ₄	236 927	477 976	100 000	377 976	-7 587 475
Q ₅	236 927	524 556	100 000	424 556	-8 683 752
Q ₆	245 536	543 617	100 000	443 617	-9 258 383

Kritérium při rozhodování, která z návrhových variant je výhodnější, byla hodnota ČSH, která byla vypočtena ze vztahu (5.10). Diskontní míru d jsem zvolil 3 %.

Uvažoval jsem životnost MVE 50 let. Pro určení, která z variant je nejvýhodnější, jsem porovnal ČSH u každé varianty pro $N = 50$ let. Výsledné hodnoty jsou zobrazeny v Tabulce 19, výpočet je uveden v Příloze 4.

Tabulka 19: ČSH pro jednotlivé Q_n

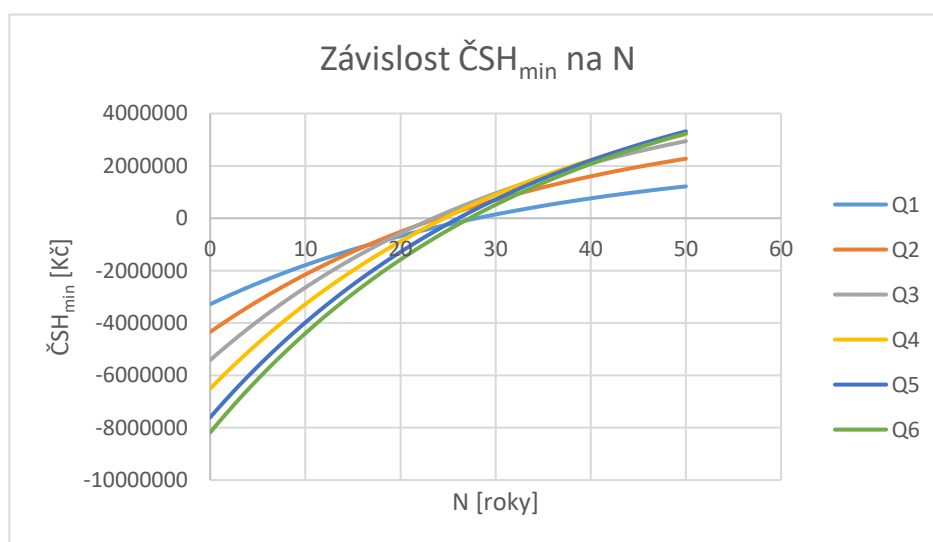
Návrhový průtok	ČSH _{min} [Kč]	n _{min} [let]	ČSH _{stř} [Kč]	n _{stř} [let]	ČSH _{max} [Kč]	n _{max} [let]
Q ₁	1 217 947	29	139 947	47	-938 053	není
Q ₂	2 273 398	24	1 195 398	34	117 398	49
Q ₃	2 945 787	24	1 867 787	31	789 787	41
Q ₄	3 215 759	25	2 137 759	32	1 059 759	40
Q ₅	3 317 974	27	2 239 974	33	1 161 974	40
Q ₆	3 233 777	28	2 155 777	34	1 077 777	41

Z vypočtených hodnot uvedených v Příloze 4 jsem vytvořil grafy zobrazující závislost ČSH měnící se v průběhu let. Průsečík křivky ČSH a osy N znázorňuje hodnotu návratnosti investice n. Z těchto grafů jsem odečetl hodnoty návratnosti investic uvedené v Tabulce 19 a zaokrouhlil tyto hodnoty je na nejbližší vyšší celočíselnou hodnotu let. Na Obrázku 20 je zobrazen graf s uvažováním minimálních nákladů, na Obrázku 21 uvažují střední náklady a na Obrázku 22 maximální náklady.

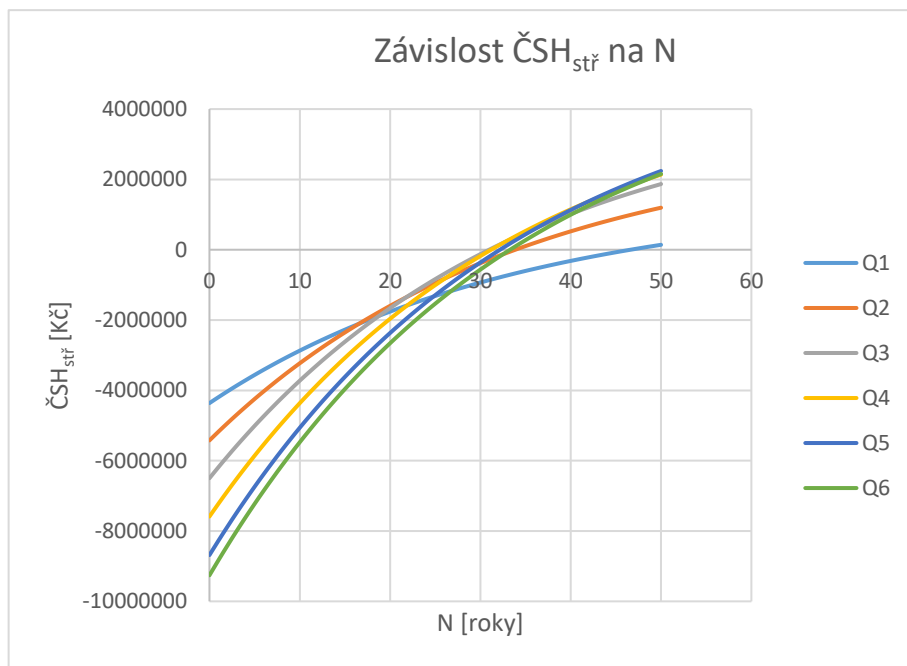
Při porovnávání hodnot ČSH v Tabulce 19 je patrné, že pro všechny hodnoty investice je nejlepší zvolit variantu pro návrhový průtok Q₅. Z výsledných hodnot v Tabulce 19 mohu konstatovat skutečnost, že nezáleží na velikosti investice pro určení nejuvhodnější varianty. S velikostí vložené investice se mění pouze doba návratnosti n, která ale pouze poukazuje na to, za jak dlouho se investice vrátí. Jako kritérium výhodnosti je tato veličina nepodstatná.

Návrhový průtok Q₁ je při uvažování maximální investice zcela ztrátový. Při porovnání s nejuvhodnější variantou vydělá téměř třikrát méně při uvažování minimálních investičních nákladů a při středních nákladech přibližně šestnáctkrát méně. Označuji proto tuto variantu jako nejhorší možnou.

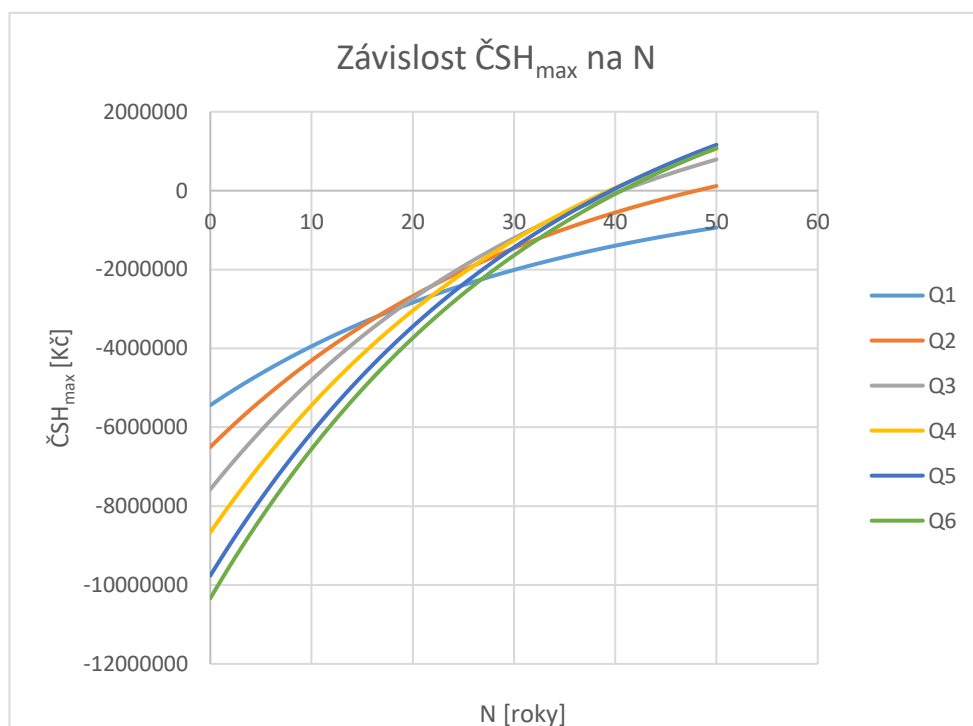
Tato ekonomická analýza slouží pro určení optimálního výkonu mnou navrhované MVE, který by neměl být ovlivněn žádnými mnou použitými zjednodušujícími předpoklady.



Obrázek 20: Závislost ČSH_{min} na N



Obrázek 21: Závislost $\check{C}SH_{stř}$ na N



Obrázek 22: Závislost $\check{C}SH_{max}$ na N

6 Závěr

Pro svůj návrh malé vodní elektrárny jsem zvolil řeku Želivku, konkrétně říční kilometr 48,757, kde se nachází dnes nefunkční elektrárna Tuklecký mlýn. Toto místo se nachází v kraji Vysočina nedaleko od města Humpolec.

Dostal jsem k dispozici hodnotu užitého spádu a informace o N-letých průtocích a m-denních průtocích, ze kterých jsem vytvořil průtokový graf. Do tohoto grafu jsem vyznačil sanační průtok, který jsem určil pomocí Q_{355} a zpracoval obecné řešení pro výpočet množství elektrické energie vyrobené za rok. Pro přeměnu mechanické energie vody na elektrickou energii jsem zvolil turbogenerátor vybavený Kaplanovou turbínou. Dostal jsem k dispozici informace o Kaplanově turbíně KP 1050K3 typu PIT, kterou vyrábí firma Mavel a.s. Informace o turbíně obsahovaly i data ohledně závislosti průtoku na účinnosti dané turbíny. Z těchto dat jsem vypracoval graf a uvažoval tyto hodnoty pro všechny návrhové průtoky totožné. Zadána mi byla i cena turbíny, generátoru a celého příslušenství včetně montáže.

Zvolil jsem si celkem šest návrhových průtoků, vypočetl maximální výkon turbíny, výsledné množství vyrobené elektrické energie za rok pro jednotlivé návrhové průtoky a odhadnul ceny stavebních prací. Tento odhad jsem provedl ve třech variantách: minimální (optimistický), střední a maximální (pesimistický). Následně jsem linearizoval cenu turbíny podle výkonu a dopočítal ceny dalších pěti turbín. Dohledal jsem výkupní cenu elektrické energie a ekonomicky zhodnotil všech šest návrhových variant při uvažování doby životnosti MVE 50 let. Náklady na údržbu MVE jsem zvolil 100 000 Kč a tuto hodnotu považoval pro všechny návrhové varianty totožnou. Dle kritéria čisté současné hodnoty jsem vyhodnotil jako nejlepší návrhový průtok Q_5 ($4 \text{ m}^3/\text{s}$) a nejhorší Q_1 ($2 \text{ m}^3/\text{s}$). Vytvořil jsem grafy závislosti ČSH na letech při uvažování minimálních, středních a maximálních investic. Z těchto grafů jsem následně odečetl hodnoty návratnosti investic pro jednotlivé návrhové průtoky.

Pro konečný návrh MVE Tuklecký mlýn jsem zvolil návrhovou variantu 5 s hltností turbíny $3,24 \text{ m}^3/\text{s}$ a maximálním výkonem 49,9 kW. Mnou zvolená varianta vyrobí 236,9 MWh elektrické energie za rok. Z hlediska ekonomického hodnocení vychází návratnost investice 27-40 let v závislosti na velikosti počáteční investice. Možný čistý zisk po 50 letech fungování mnou navržené MVE je v rozmezí 1 až 3,2 milionu Kč. Tato částka závisí především na výši vložené investice při uvažování konstantního množství vyrobené elektrické energie za rok.

Před rozhodnutím o realizaci mnou vybrané varianty pro výstavbu MVE by bylo nutné do ekonomické analýzy promítnout i všechny zanedbané vlivy, provést biologické studie toku a od pověřených orgánů získat stavební povolení.

7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] VOBOŘIL, David. *Vodní elektrárny - princip, rozdělení, elektrárny v ČR* [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/vodni-elektrarny-princip-a-rozdeleni>
- [2] ČESKÁ REPUBLIKA. *SKUPINA ČEZ* [online]. 2020 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny/ceska-republika>
- [3] Hydroenergetika na Slovensku. *TV-ADams.wz.cz* [online]. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <http://www.tv-adams.wz.cz/seznamy/evropa/ve/slovensko.html>
- [4] ABAFFY, Dušan a Michal LUKÁČ. *PRIEHRADY A NÁDRŽE: NA SLOVENSKU*. Bratislava: ALFA, 1991. ISBN 80-05-00926-7.
- [5] VODNÁ ELEKTRÁREŇ. *SLOVENSKÉ ELEKTRÁRNE* [online]. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <https://www.seas.sk/vodna-elektraren>
- [6] ANALÝZA EFEKTIVNÍHO VYUŽITÍ MVE Z HLEDISKA PŘÍRODNÍHO POTENCIÁLU VODNÍCH TOKŮ JAKO ENERGETICKÉHO ZDROJE. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. c2008-2020 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/vodni_elektrarny_vyuziti_analyza/\\$FILE/OOV_priloha_1_20171004.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/vodni_elektrarny_vyuziti_analyza/$FILE/OOV_priloha_1_20171004.pdf)
- [7] Data. *ČEPS, a.s.* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/data#Generation>
- [8] LUKÁŠ, Jaroslav. ROČNÍ ZPRÁVA O PROVOZU ES ČR 2010. *Energetický regulační úřad* [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2010.pdf/e33fe1d5-b15c-4a0e-bcc8-08cfaf3252ae
- [9] ROČNÍ ZPRÁVA O PROVOZU ES ČR 2011. *Energetický regulační úřad* [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2011.pdf/0a6d2cad-019e-49df-8fa4-8b11767c9ace
- [10] ROČNÍ ZPRÁVA O PROVOZU ES ČR 2012. *Energetický regulační úřad* [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2012.pdf/4fdde065-9e59-442f-ba17-74651ff68625
- [11] ROČNÍ ZPRÁVA O PROVOZU ES ČR 2013. *Energetický regulační úřad* [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2013.pdf/20c3f587-a658-49f7-ace9-56be8a66b7b9
- [12] ROČNÍ ZPRÁVA O PROVOZU ES ČR 2014. *Energetický regulační úřad* [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2014.pdf/933fc41a-ad79-4282-8d0f-01eb25a63812

- [13] ROČNÍ ZPRÁVA O PROVOZU ES ČR 2015. *Energetický regulační úřad* [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2015.pdf/3769f65b-3789-4e93-be00-f84416e1ca03
- [14] ROČNÍ ZPRÁVA O PROVOZU ES ČR 2016. *Energetický regulační úřad* [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2016.pdf/800e5a09-a58a-4a73-913f-abc30cda42a5
- [15] ROČNÍ ZPRÁVA O PROVOZU ES ČR 2017. *Energetický regulační úřad* [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2017.pdf/521bff99-fdcf-4c86-8922-3a346af0bb88
- [16] ROČNÍ ZPRÁVA O PROVOZU ES ČR 2018. *Energetický regulační úřad* [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Rocni_zprava_provoz_ES_2018.pdf/1420388b-8eb6-4424-9ad9-c06a57b5326c
- [17] Čtvrtletní zpráva o provozu ES ČR IV. čtvrtletí 2019. *Energetický regulační úřad* [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/5381883/Ctvrtletni_zprava_2019_IV_Q.pdf/78ade820-c6b2-41e0-8a72-56bd8d20a94d
- [18] Kaplanova turbína. *Energyweb* [online]. 2001 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: https://www.energyweb.cz/web/schemata/vodni/turbina_kaplan.htm
- [19] Francisova horizontální turbína. *Abeceda malých vodních pohonů* [online]. [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/pretlakoveturbiny/francis-horiz.htm>
- [20] Peltonova turbína. *Abeceda malých vodních pohonů* [online]. [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://www.ckdblansko.cz/cs/produkty-a-sluzby/turbiny>
- [21] Bankiho turbína. *Abeceda malých vodních pohonů* [online]. [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/primotlaketurbiny/banki.htm>
- [22] ŠNEKOVÉ TURBÍNY. *ŽELEZO HRANICE s.r.o* [online]. 2018 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: https://www.zelezo-hranice.cz/uploads/images/snekova_cerpadla/snekove-turbiny.pdf
- [23] Princip šnekové turbíny. *GESS-CZ, s.r.o* [online]. 2019 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <http://www.gess.cz/products/snekove-turbiny>
- [24] ČEŠI DÁVAJÍ SVĚTU UNIKÁTNÍ VYNÁLEZ, VÍROVÁ TURBÍNA JE V PROVOZU NA VODNÍ ELEKTRÁRNĚ ŽELINA! SKUPINA ČEZ. *ČEZ, a. s.* [online]. 2020 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/promedia/tiskove-zpravy/cesi-davaji-svetu-unikatni-vynalez-virova-turbina-je-v-provozu-na-vodni-elektrarne-zelina-44510>
- [25] POCHYLÝ, František a Pavel RUDOLF. Vírová turbína: řešení pro malé elektrárny. *MM* [online]. 2018, **2018**(3), 98 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/virova-turbina-reseni-pro-male-elektrarny.html>
- [26] MELICHAR, Jan, Jan VOJTEK a Jaroslav BLÁHA. *Malé vodní turbíny: Konstrukce a provoz*. První. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-010-1808-0.

- [27] Český hydrometeorologický ústav [online]. [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/>
- [28] KINKOR, Jaroslav. METODICKÝ POKYN odboru ochrany vod Ministerstva životního prostředí ke stanovení hodnot minimálních zůstatkových průtoků ve vodních točích. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/BB978B5BAEDF46C0C1256FC8003F1EB8/\\$file/metod.html](https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/BB978B5BAEDF46C0C1256FC8003F1EB8/$file/metod.html)
- [29] Vodní elektrárny. *Svaz podnikatelů pro využití energetických zdrojů, z.s.* [online]. [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <http://www.spvez.cz/pages/OZE/voda.htm>
- [30] Hustota ρ , kinematická viskozita vody ν a povrchové napětí σ v závislosti na teplotě při tlaku 105 Pa. *Hydraulika.fsv.cvut* [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/Hya/ke_stazeni/cviceni/laboratore/tabulky.pdf
- [31] TRÁVNÍČEK, Stanislav. NÁVRH: Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. x/2019, ze dne Y. srpna 2019, kterým se stanovuje podpora pro podporované zdroje energie. *ERÚ* [online]. Energetický regulační úřad, c2014-2020 [cit. 2020-07-05]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/5438957/N%C3%A1vrh+CR_POZE_2020_VKP.pdf/f3f8785c-57ea-4a13-bcdf-ae5041e38968
- [32] Vodní elektrárny v České republice. *TV-ADams.wz.cz* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: http://www.tv-adams.wz.cz/vodni_elektrarny_v_cr.html
- [33] Kaplanovy turbíny. *Strojírny Brno, a.s.* [online]. 2020 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://strojirnybrno.com/vodni-turbiny/kaplan/>
- [34] Francisova turbína. *HYDROSERVIS UNION a.s.* [online]. [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <http://www.h-union.cz/c-16-francisova-turbina.html>
- [35] Peltonova turbína. *ČKD BLANSKO* [online]. [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://www.ckdblansko.cz/cs/produkty-a-sluzby/turbiny>
- [36] MVE Pod Zámekem. *KOVOVITÁK vodní turbíny* [online]. [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://www.opravymve.cz/mve-pod-zamkem/>
- [37] Vírová turbína na Želině. In: *Obnovitelné zdroje* [online]. Třipól, 2014 [cit. 2020-06-17]. ISSN 2464-7888. Dostupné z: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/obnovitelne-zdroje/1919-virova-turbina-na-zeline>
- [38] Vodná energia. *OZE* [online]. Bratislava, 2020 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <http://www.oze.stuba.sk/oze/vodna-energia/>

Seznam příloh

- Příloha 1: Odečtené průtoky a dny
- Příloha 2: Výpočet S_{ij}
- Příloha 3: Výpočet E
- Příloha 4: Ekonomické zhodnocení

Přílohy

Příloha 1: Odečtené průtoky a dny

Q1			Q2			Q3		
m [dny]			m [dny]			m [dny]		
Q [m3/s]	reál	graf	Q [m3/s]	reál	graf	Q [m3/s]	reál	graf
2	30	1,5	2,5	30	1,5	3	30	1,5
1,24	257,4	12,87	1,74	220,4	11,02	2,24	187,6	9,38
1,178	262,2	13,11	1,653	226,6	11,33	2,128	194,8	9,74
1,054	272,4	13,62	1,479	238,6	11,93	1,904	209,2	10,46
0,93	283,6	14,18	1,305	252,2	12,61	1,68	224,6	11,23
0,806	295	14,75	1,131	266	13,3	1,456	240,4	12,02
0,682	305,6	15,28	0,957	281,2	14,06	1,232	258	12,9
0,558	315,6	15,78	0,783	297	14,85	1,008	276,6	13,83
0,434	325,6	16,28	0,609	311,4	15,57	0,784	297	14,85
0,31	334,6	16,73	0,435	325,6	16,28	0,56	315,4	15,77
Pmax [kW]	19,1		Pmax [kW]	26,8		Pmax [kW]	34,5	
Q [m3/s]			Q [m3/s]			Q [m3/s]		
2 Pstř [kW]			2,5 Pstř [kW]			3 Pstř [kW]		
1,209	18,6		1,6965	26,1		2,184	33,6	
1,116	17,5		1,566	24,5		2,016	31,6	
0,992	15,7		1,392	22		1,792	28,4	
0,868	13,8		1,218	19,4		1,568	25	
0,744	11,9		1,044	16,7		1,344	21,5	
0,62	9,8		0,87	13,8		1,12	17,7	
0,496	7,7		0,696	10,9		0,896	14	
0,372	5,7		0,522	8		0,672	10,3	
0,155	2,4		0,2175	3,3		0,28	4,3	

Q4			Q5			Q6		
m [dny]			m [dny]			m [dny]		
Q [m3/s]	reál	graf	Q [m3/s]	reál	graf	Q [m3/s]	reál	graf
3,5	30	1,5	4	30	1,5	4,26	30	1,5
2,74	158,4	7,92	3,24	134	6,7	3,5	122,2	6,11
2,603	166,2	8,31	3,078	141,4	7,07	3,325	130,2	6,51
2,329	180,6	9,03	2,754	157,6	7,88	2,975	146,2	7,31
2,055	198	9,9	2,43	176	8,8	2,625	165	8,25
1,781	216	10,8	2,106	196,2	9,81	2,275	185,4	9,27
1,507	234,8	11,74	1,782	217,6	10,88	1,925	207,8	10,39
1,233	255,6	12,78	1,458	240,2	12,01	1,575	232	11,6
0,959	278,2	13,91	1,134	265,8	13,29	1,225	258,6	12,93
0,685	305,2	15,26	0,81	294,6	14,73	0,875	288,6	14,43
Pmax [kW]	42,2		Pmax [kW]	49,9		Pmax [kW]	53,9	
Q [m3/s]			Q [m3/s]			Q [m3/s]		
3,5 Pstř [kW]			4 Pstř [kW]			4,26 Pstř [kW]		
2,6715	41,2		3,159	48,7		3,4125	52,6	
2,466	38,6		2,916	45,6		3,15	49,3	
2,192	34,7		2,592	41,1		2,8	44,3	
1,918	30,6		2,268	36,2		2,45	39,1	
1,644	26,2		1,944	31		2,1	33,5	
1,37	21,7		1,62	25,7		1,75	27,7	
1,096	17,1		1,296	20,2		1,4	21,8	
0,822	12,6		0,972	14,9		1,05	16,1	
0,3425	5,2		0,405	6,2		0,4375	6,7	

Příloha 2: Výpočet S_{ij}

	S _{ij}					
j	S1j	S2j	S3j	S4j	S5j	S6j
1	7660,224	9203,904	10085,376	10416,384	10419,84	10264,8
2	135,7056	245,9664	367,7184	487,2816	546,6528	638,4
3	258,0192	425,952	658,0224	804,9024	1070,7552	1142,4
4	249,984	425,952	620,928	858,168	1073,088	1184,4
5	220,5216	374,5872	552,1152	769,392	1020,9888	1113,84
6	173,5008	349,1136	520,3968	679,9584	915,2352	1034,88
7	133,92	296,9136	449,9712	615,5136	790,8192	914,76
8	104,16	210,4704	383,8464	520,1616	696,7296	782,04
9	66,96	148,248	247,296	443,88	559,872	630

Příloha 3: Výpočet E

	E					
	E1	E2	E3	E4	E5	E6
	105298396,8	126518015	138634839,3	143184916,7	143232423,3	141101224,1
	1895761,749	3436068,17	5136902,804	6807160,635	7636556,401	8918234,035
	3647090,652	6020813,789	9301119,233	11377261,92	15135080,18	16147776,45
	3558699,408	6063728,6	8839350,143	12216629,68	15276168,2	16860773,41
	3141364,166	5336052,374	7864966,084	10960107,57	14544142,75	15866822,4
	2452972,844	4935805,37	7357425,548	9613324,494	12939693,03	14631243,99
	1864492,913	4133761,222	6264696,187	8569450,007	11010131,37	12735689,49
	1421794,139	2872941,448	5239540,726	7100256,475	9510426,863	10674922,13
	914010,5182	2023599,631	3375614,473	6059005,21	7642307,301	8599561,327
Ecelk [Wh/rok]	124194583,1	161340785,6	192014454,5	215888112,7	236926929,4	245536247,3
Ecelk [kWh/rok]	124194,6	161340,8	192014,5	215888,1	236926,9	245536,2
Ecelk [MWh/rok]	124,2	161,3	192	215,9	236,9	245,5

Příloha 4: Ekonomické zhodnocení

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50			
63401	63402	63403	63404	63405	63406	63407	63408	63409	63410	63411	63412	63413	63414	63415	63416	63417	63418	63419	63420	63421	63422	63423	63424	63425	63426	63427	63428	63429	63430	63431	63432	63433	63434	63435	63436	63437	63438	63439	63440	63441	63442	63443	63444	63445	63446	63447	63448	63449	63450			
244438	244439	244440	244441	244442	244443	244444	244445	244446	244447	244448	244449	244450	244451	244452	244453	244454	244455	244456	244457	244458	244459	244460	244461	244462	244463	244464	244465	244466	244467	244468	244469	244470	244471	244472	244473	244474	244475	244476	244477	244478	244479	244480	244481	244482	244483	244484	244485	244486	244487	244488	244489	244490
63451	63452	63453	63454	63455	63456	63457	63458	63459	63460	63461	63462	63463	63464	63465	63466	63467	63468	63469	63470	63471	63472	63473	63474	63475	63476	63477	63478	63479	63480	63481	63482	63483	63484	63485	63486	63487	63488	63489	63490	63491	63492	63493	63494	63495	63496	63497	63498	63499	63500			
63501	63502	63503	63504	63505	63506	63507	63508	63509	63510	63511	63512	63513	63514	63515	63516	63517	63518	63519	63520	63521	63522	63523	63524	63525	63526	63527	63528	63529	63530	63531	63532	63533	63534	63535	63536	63537	63538	63539	63540	63541	63542	63543	63544	63545	63546	63547	63548	63549	63550			
63551	63552	63553	63554	63555	63556	63557	63558	63559	63560	63561	63562	63563	63564	63565	63566	63567	63568	63569	63570	63571	63572	63573	63574	63575	63576	63577	63578	63579	63580	63581	63582	63583	63584	63585	63586	63587	63588	63589	63590	63591	63592	63593	63594	63595	63596	63597	63598	63599	63600			

1	4180132	5422328	6417424	7281475	8088192	8933835	9819712	10736825	11677480	12619185	13562040	14505945	15450910	16396875	17342950	18289125	19235400	20181775	21128250	22074825	23021400	23968075	24914850	25861725	26808700	27755775	28702950	29650225	30597600	31545075	32492650	33440325	34388100	35335975	36283950	37232025	38180200	39128475	40076850	41025325	41973900	42922575	43871350	44820225	45769200	46718275	47667450	48616725	49566100	50515575	51465150	52414825	53364600	54314475	55264450	56214325	57164300	58114375	59064450	60014575	60964700	61914825	62864950	63815100	64765250	65715400	66665650	67615900	68566350	69517200	70467500	71418800	72370200	73321700	74273200	75224800	76176400	77128100	78079800	79031600	79983500	80935500	81887600	82839800	83792100	84744500	85697000	86649600	87602300	88555100	89508000	90461000	91414100	92367300	93320700	94274200	95227800	96181500	97135300	98089200	99043100	100000000
---	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------

50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1																																
50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1																																
3309438	6309422	8554026	5445304	5548426	5028925	7205166	9093937	10126138	10616028	10952833	11042447	11095285	11107823	11119051	11129111	11138034	11145838	11152532	11158131	11162742	11166371	11169024	11170706	11171428	11171189	11170002	11167872	11164804	11160802	11155852	11149962	11143128	11135356	11126552	11116724	11105976	11094296	11081676	11068116	11053616	11038176	11021816	11004536	10986356	10967276	10947296	10926416	10904536	10881756	10858076	10833496	10808016	10781636	10755356	10728176	10701096	10673016	10644936	10616856	10588776	10560696	10532616	10504536	10476456	10448376	10420296	10392216	10364136	10336056	10307976	10279896	10251816	10223736	10195656	10167576	10139496	10111416	10083336	10055256	10027176	10000000