

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická
Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd



Studie proveditelnosti využití vodního toku
pro výrobu elektrické energie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce:
Autor práce:

Ing. Josef Černošus
František Pokorný

2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pokorný** Jméno: **František** Osobní číslo: **465457**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Studie proveditelnosti využití vodního toku pro výrobu elektrické energie

Název bakalářské práce anglicky:

Feasibility study for use of water stream for electric power generation

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte charakteristiku malých a mikro vodních elektráren
Ve vybrané lokalitě navrhnete vodní elektrárnu
Proveďte technicko ekonomické vyhodnocení provozu vodní elektrárny

Seznam doporučené literatury:

MASTNÝ, P. a kol., 2011. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: ČVUT.
PAŽOUT, F., 1987. Malé vodní elektrárny 1. Ekonomika - předpisy. 1. vyd. Praha: SNTL
SYNEK, KISLINGEROVÁ, 2010. Podniková ekonomika, C. H. Beck

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Josef Černohous CVUT v Praze FEL K13116

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

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.02.2024**

Ing. Josef Černohous
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
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.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 20. května 2022

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Josefovi Černoňovi, který mě provázel psáním této bakalářské práce a poskytoval mi důležité rady.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem malé vodní elektrárny ve vybrané lokalitě. Nejprve se teoreticky rozebírají důležité pojmy spojené s malými vodními elektrárnami, jejich dělení, jejich částmi, význam v České republice a legislativa spojená s provozem malé vodní elektrárny. V praktické části dojde k postupnému návrhu malé vodní elektrárny v několika variantách, a to v lokaci s malým spádem a s relativně malým průtokem za použití vírové turbíny. V prvních dvou variantách dojde k návrhu mírně rozdílných vodních elektráren za použití odlišných vírových turbín, zatímco v poslední variantě dojde k navržnutí dvou typů elektráren se stejnou turbínou, které se budou chovat podobně jako off-grid elektrárny. Zároveň zjistíme, zda se vyplatí kvůli stabilní dodávce elektřiny a off-grid chování investovat do výkonnější elektrárny anebo do baterií s větší kapacitou. Dále si u všech variant ukážeme ekonomické zhodnocení.

Klíčová slova

Elektrárna, Malá vodní elektrárna, návrh malé vodní elektrárny, vírová turbína, výroba energie, ekonomické zhodnocení, legislativa vodních elektráren.

Abstract

This bachelor thesis deals focuses on the design of a small hydroelectric power plant at a selected location. Firstly, we analysed important terms associated with small hydropower plants, its categorisation, its parts, the significance in the Czech Republic and legislation related to the operation of small hydropower plants. In the practical part, there will be a gradual designing of a small hydroelectric power plant in multiple variants, at a location with a small gradient and a relatively low water flow using a vortex turbine. In the first two variants, two slightly different hydropower plants will be designed each with different type of vortex turbine, while in the last variant, two types of power plants with the same turbine will be designed, which will behave similarly to off-grid power plants. At the same time, we will find out whether it pays off to invest in a more powerful power plant or in batteries with higher capacity due to the stable supply of electricity and off-grid behaviour. Furthermore, we will show the economic evaluation of all variants.

Keywords

Powerplant, small hydropower plant, design of small hydropower plant, vortex turbine, energy production, economic evaluation, hydropower legislation.

Obsah

Obsah.....	11
Seznam zkratek a symbolů	13
1. Úvod	1
2. Teorie vodních elektráren	1
2.1. Obnovitelné zdroje energie	1
2.2. Vodní energie	2
2.3. Historie hydroenergetiky.....	4
2.4. Vodní elektrárny	5
2.5. Rozdělení dle celkové koncepce.....	5
2.6. Rozdělení dle způsobu využití vodního toku	5
2.7. Rozdělení dle využívaného spádu	6
2.8. Rozdělení dle velikosti instalovaného výkonu.....	6
2.9. Základní části vodní turbíny.....	7
2.9.1. Turbína	7
2.9.2. Generátor	9
2.9.3. Silnoproudá část	10
2.9.4. Porovnání s ostatními typy elektráren	10
2.10. Výhody a nevýhody vodních elektráren	10
2.11. Rozvoj malých vodních elektráren na území ČR.....	11
2.12. Podpora obnovitelných zdrojů na území České republiky	11
3. Legislativa vodních elektráren.....	11
3.1. Legislativní postup při zakládání MVE [29].....	11
3.1.1. Výběr a vyhodnocení lokality	12
3.1.2. Územní řízení.....	12
3.1.3. Stavební řízení.....	12
3.1.4. Uvedení do zkušebního provozu.....	12
3.1.5. Ostatní povinnosti	13
4. Praktická část.....	13
4.1. Výběr lokality.....	13
4.2. Parametry turbíny	16
4.3. Vznik víru	17
4.4. Generátor	19
4.5. Ekonomické zhodnocení.....	20
4.6. Návrh – Varianta I.....	22

4.6.1.	Turbína	22
4.6.2.	Vznik víru	23
4.6.3.	Generátor	24
4.6.4.	Ekonomické zhodnocení.....	25
4.7.	Návrh – Varianta II.....	27
4.7.1.	Turbína	27
4.7.2.	Vznik víru	28
4.7.3.	Generátor	29
4.7.4.	Ekonomické zhodnocení.....	30
4.8.	Návrh – Varianta III.....	32
4.8.3.	Turbína	33
4.8.4.	Vznik víru	34
4.8.5.	Generátor	34
4.8.6.	Ekonomické zhodnocení.....	35
4.9.	Souhrnné informace.....	38
5.	Závěr	39
6.	Zdroje	40
7.	Přílohy.....	42

Seznam zkratk a symbolů

- A - vzdálenost os řemenic
- b_3 - šířka vstupu vody
- b_4 - šířka výstupu vody
- C - cena
- CF_j - peněžní toky v j-tém roce životnosti
- D₁ - průměr menší řemenice
- D₂ - průměr větší řemenice
- dH - element H
- D_{ok} - průměr oběžného kola
- D_{okm} - průměr oběžného kola modelu
- DSP - dokumentace pro stavební povolení
- E_B - velikost baterie
- E_c - celková vyrobená energie
- E_l - energie vyrobená v jednotlivých měsících
- E_k - kinetická energie
- E_p - potenciální energie
- ERÚ - energetický regulační úřad
- E_t - tlaková energie
- E_T - teoretická hodnota primárního hydroenergetického potenciálu
- E_z - zbývající energie v baterii
- Fr - Froudeho číslo
- g - tíhové zrychlení
- H - spád
- H - spád
- H' - kritická hloubka ponoru
- h₁ - výška prostoru pod turbínou
- h₃ - výška horní hladiny
- h₄ - výška dolní hladiny
- H_m - spád modelu
- H_z - zvolený referenční čistý spád
- i* - převodový poměr
- i - zvolená diskontní úroková míra
- IRR - vnitřní výnosové procento
- k - koeficient vyznačující účinnost výroby
- K_i - investiční výdaje
- L - celková délka klínového řemenu
- LPF - lesní půdní fond
- m - hmotnost
- MVE - malá vodní elektrárna
- n - otáčky oběžného kola

- n_{11} - jednotkové otáčky oběžného kola
- n_{11m} - otáčky oběžného kola modelu
- N_c - celkové roční náklady
- n_G - otáčky generátoru
- NPV - čistá součtová hodnota
- n_T - otáčky turbíny
- OTE - operátor trhu s elektřinou
- p - tlak
- P - výkon
- P_j - roční ekvivalentní příjem
- Q - průtok
- $Q(H)$ - střední objemový průtok elementárního úseku toku
- Q_{11} - Jednotkový průtok
- Q_{11m} - jednotkový průtok modelu
- Q_z - zvolený referenční průtok
- s - délka účetního období
- t - čas
- T_n - prostá doba návratnosti
- t_z - zvolený referenční den
- U_c - celková ušetřená cena za energie
- v - průřezová rychlost
- v_3 - průřezová rychlost horní hladiny
- v_4 - průřezová rychlost dolní hladiny
- VE - vodní elektrárna
- v_{pr} - rychlost proudění vody
- ZPF - zemědělský půdní fond
- β - velikost úhlu
- η - účinnost výroby vyjádřena jako součin účinností jednotlivých částí ve výrobě
- η_D - přepočtená účinnost turbíny
- η_M - účinnost turbíny modelu
- η_m - účinnost modelu
- P - hustota

1. Úvod

V dnešní době se čím dál tím víc upíná pozornost na energetiku a vše s ní spojené. Zvyšuje se zájem o elektromobilitu, čistou energii, dbá se na snížení uhlíkové stopy a soustředí se na menší spotřebu fosilních paliv. S tím jsou spojené vyšší nároky na zdroje elektrické energie, které všechny tyto požadavky uspokojí. Nejlepším kandidátem jsou jistě jaderné elektrárny, které mají největší výkon a zároveň jsou minimálně nebezpečné vůči životnímu prostředí. Problém s tímto zdrojem energie je cena a rozšířené fámy o jeho nebezpečnosti. Lidé se zkrátka bojí všeho, co je spojené s možnou jadernou reakcí. Tím se otevírá prostor pro méně výkonné zdroje, a to solární, větrné či vodní elektrárny.

V této práci se soustředíme na vodní elektrárny, konkrétně na malé vodní elektrárny, které mají obrovský potenciál jak ve světě, tak v České republice, a pravděpodobně budou hrát velkou roli v budoucí energetice. Nejdříve si vysvětlíme základní teoretické znalosti spojené s oblastí vodních elektráren tak, abychom byli uvedeni do problematiky a dále s ní mohli v dalších částech pracovat. K tomu se také seznámíme s potřebnými legislativními povinnostmi pro provozování vodní elektrárny

V praktické části si navrhne malé vodní elektrárny v několika variantách, u kterých si dále uděláme ekonomické zhodnocení.

Nejdříve navrhne dvě varianty malých vodních elektráren, kde využijeme dva rozdílné typy vírových turbín. Malou vodní elektrárnu navrhne v lokalitě s malým spádem, a relativně malým průtokem a dimenzujeme ji tak, aby vyrobila dostatek energie pro pokrytí spotřeby rodinného domu. Tímto si zároveň ověříme, zda se vírové turbíny hodí do lokalit s těmito podmínkami a zda se z ekonomického hlediska vyplatí.

Po získání výsledků navrhnutých elektráren vybereme tu výkonnější a použijeme ji pro následující variantu. V této variantě si navrhne dva typy malých vodních elektráren, které zajistí dostatečnou výrobu energie pro víkendovou chatu s použitím baterií. Baterie využijeme k tomu, aby došlo k stabilnějšímu pokrytí energie, kde patřičným provozem zajistíme téměř „off-grid“ chování víkendové chaty.

Zároveň si otestujeme, zda se vyplatí v rámci stability dodávky energie investice do baterií na úkor výkonu vodní elektrárny, nebo naopak. Jeden z navrhnutých typů bude mít větší baterie, zatímco druhý bude mít větší výkon.

2. Teorie vodních elektráren

Nejdříve se budeme soustředit na základní pojmy spojené s vodní elektrárnou, které si vysvětlíme, abychom se orientovali v dané problematice a poté s ní dále pracovali.

2.1. Obnovitelné zdroje energie

Vodní elektrárny patří mezi tzv. obnovitelné zdroje energie. Obnovitelné zdroje energie jsou zdroje, jež se dokážou při spotřebování sami, či za přispění člověka částečně či úplně obnovovat. [1]. Patří mezi ně dle zákona 165/2012 Sb., § 2, odrážka a): energie větru, energie slunečního záření, geotermální energie, energie vody, energie půdy, energie vzduchu, energie biomasy, energie skládkového plynu, energie kalového plynu a energie bioplynu [2].

Obnovitelné zdroje se poslední dobou dostávají do popředí, a to z důvodu rostoucích cen energií, redukce spotřeby fosilních paliv, snahy států o energetickou soběstačnost a klimatických změn [3]. Tyto zdroje přeci jen patří k těm šetrnějším vůči přírodě, jak z pohledu spotřeby fosilních paliv, tak z pohledu znečištění. Realita je taková, že největším limitujícím faktorem pro lidstvo jsou omezené zásoby neobnovitelných zdrojů, které zpomalují tempo technologického rozvoje a které úzce souvisí s ekologickými problémy spojené s produkcí odpadů, které nejdou bez následků odstranit [4]. Právě kvůli nevyčerpatelnosti jsou obnovitelné zdroje energie důležité.

V České republice je hlavním používaným obnovitelným zdrojem energie voda, a to převážně kvůli výhodné geografické poloze. Česká republika je označována jako „střecha Evropy“, a to z důvodu, že zde pramení velké množství vodních toků, které dále odtékají do zahraničí [5]. Ve výsledku je většina vodní energie rozprostřena v menších tocích po celé České republice. Toto je jeden z důvodů, proč se budují převážně malé vodní elektrárny, které tyto menší toky dokážou využít. Do roku 2019 bylo zaznamenáno 1600 vodních elektráren s instalovaným výkonem do 10 MW na území České republiky [6].

2.2. Vodní energie

Vodní energie je forma obnovitelné energie, jenž se dá využít k práci. Můžeme jí rozdělit na několik typů, a to na mechanickou vodní energii, vycházející z proudění vody, na chemickou vodní energii, což je energie uložena ve formě rozpuštěných solí, a v poslední řadě na vodní energii tepelnou, což je energie uložena v tepelném spádu mezi hladinou a hloubkou. Poslední dvě se výrazně nevyužívají, zatímco mechanická energie se masivně využívá k výrobě elektrické energie.

Mechanická energie je úzce spojena s energií pocházející ze Slunce v podobě záření. Na celou planetu Zemi dopadá energie přepočtená na výkon kolem $1,7 \cdot 10^{14}$ kW, přičemž 19,6 % se spotřebuje k ohřevu vody a způsobí, že se ročně kolem $1,06 \cdot 10^{14}$ m³ vody odpaří a následně spadne ve formě srážek na pevninu [7]. Hlavním zdrojem vodní energie je právě ta odpařená voda, která dopadne na pevninu a poté putuje zpět do větších zásobáren vody (např. oceány), odkud se znovu může odpařit. Tomuto jevu říkáme hydrologický cyklus, a právě tento pohyb vody je největším představitelem vodní energie, kterého se zúčastní odhadem $5 \cdot 10^{13}$ m³ vody ročně [7].

Mechanickou energii lze popsat pomocí tří složek, a to pomocí kinetické (závisící na rychlosti proudění vody), potenciální (závisící např. na rozdílu v nadmořské výšce) a tlakové energie (závislost na tlaku vody). Vztah mezi těmito složkami můžeme popsat pomocí Bernoulliho rovnice [8]:

$$E = E_p + E_t + E_k = g \cdot H + \frac{p}{\rho} + \frac{v_{pr}^2}{2} \quad (2.1)$$

kde:

E ... měrná energie na 1 kg [J.kg⁻¹]

H ... výška nad srovnávací rovinou [m]

p ... tlak [N/m²]

v_{pr} ... rychlost [m/s]

ρ ... hustota vody [kg/m³]

g... tíhové zrychlení [m.s⁻²]

V každém bodě toku má voda odlišnou mechanickou energii. Pokud by bylo potřeba zjistit rozdíl mechanické energie dvou bodů, tak se využije vztah (2.1):

$$E_1 = E_{t1} + E_{p1} + E_{k1} = g \cdot H_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} \quad (2.2)$$

$$E_2 = E_{t2} + E_{p2} + E_{k2} = g \cdot H_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} \quad (2.3)$$

a upraví se do podoby [10]:

$$E = E_1 - E_2 = g_1 \cdot (H_1 - H_2) + \frac{p_1 - p_2}{\rho} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \quad (2.4)$$

Tato hodnota lze získat i pomocí integrace potenciálu jednotlivých částí vodních toků určených ze střední hodnoty objemového průtoku dle vztahu:

$$E_T = g \cdot \int_0^H Q(H) \cdot dH \quad (2.5)$$

kde:

E_T ... teoretická hodnota primárního hydroenergetického potenciálu [W; m³.s⁻¹; m]

$Q(H)$... střední objemový průtok elementárního úseku toku [m³.s⁻¹]

H ...spád mezi začátkem a koncem toku [m]

dH ... element H [m]

Hodnota popisující energii toku se nazývá hydroenergetický potenciál, což je hodnota celkové energie odtékající vody. Tento hydroenergetický potenciál se dále dělí na primární a sekundární. Primární vyjadřuje hodnotu energie obsažené v řekách a malých tocích, zatímco sekundární vyjadřuje energii obsaženou v přečerpávacích elektrárnách [9].

Teoretickou hodnotu primárního hydroenergetického potenciálu lze slovně popsat tak, že „protéká-li každou sekundu množství Q [m³.s⁻¹] kapaliny o měrné hmotnosti ρ [kg.m⁻³] výškový rozdíl H [m] ve smyslu zemské tíže, koná každou sekundu práci čili odevzdá výkon P [W]“ [9]. Z tohoto tvrzení vyplývá vztah:

$$P = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H = m \cdot E \quad (2.6)$$

Technický hydroenergetický potenciál je celkově menší než teoretický, a to asi přibližně o 50 %. Je to z toho důvodu, že do teoretického hydroenergetického potenciálu není započítána velikost sanačního průtoku (nutný průtok v místě odběru) a ztráty (třecí, ztráty vniklé při převodu energie atd), které hodnotu potenciálu snižují. Průměrná hodnota technického hydroenergetického potenciálu v České republice se pohybuje kolem 400 MW [11].

Technický hydroenergetický potenciál, který odpovídá výkonu vodní elektrárny, lze vypočítat pomocí vztahu:

$$P = H \cdot Q \cdot k \quad (2.7)$$

kde:

P...hydroenergetický potenciál [kW]

H... výška nad srovnávací rovinou [m]

Q... průtok turbínou [m³/s]

k...koeficient vyznačující účinnost výroby, jenž v praxi nabývá hodnot 5-7 [kg.m².s⁻³]

Koeficient *k* lze dále dopočítat pomocí vztahu:

$$k = \frac{\eta \cdot \rho \cdot g}{1000} \text{ [kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}] \quad (2.8)$$

kde:

k...koeficient vyznačující účinnost výroby [kg.m².s⁻³]

η ... účinnost výroby vyjádřena jako součin účinnost jednotlivých částí ve výrobě [-]

ρ... hustota vody [kg/m³]

g... tíhové zrychlení [m.s⁻²]

Pro uživatele je důležitý převod hydroenergetického potenciálu na energii vyrobenou pomocí vodní elektrárny s určitým výkonem za jednotku času. Energii lze vypočítat ze vztahu:

$$E = P \cdot t \quad (2.9)$$

kde:

E ... energie [kWh]

P ... výkon [kW]

t... čas [h]

2.3. Historie hydroenergetiky

Hydroenergetika patří mezi nejstarší způsoby získávání energie. První využití se datuje již ve starověku, kdy se v 2. století v západní části Balkánského poloostrova použilo vodní kolo s vertikální hřídelí pro pohon mlýnského kamene. K výraznému posunu došlo až kolem 14. století, kdy vznikla konstrukce tzv. korečnicku neboli vodního kola s vrchním nátokem. Díky tomuto zlepšení došlo ke zvýšení výkonu vodního aparátu až o dvojnásobek. Další technologicky posun přinesl až Benoit Fourneyron, který sestrojil v roce 1827 vodní provozuschopnou přetlakovou turbínu.

K prvnímu použití vodních elektráren k výrobě elektrické energie došlo až v roce 1881, kdy se vyrobená elektrická energie používala k napájení osvětlení v USA a Anglii. Problémem však bylo jednoduché provedení a neschopnost přenosu energie na větší vzdálenost. Až po vyřešení problému s přenosem energie došlo k masivnímu rozmachu vodních elektráren [12].

V českých zemích má využívání vodní energie dlouholetou tradici. Nejstarším zařízením tohoto typu byla vodní elektrárna v Písku, vybudovaná v roce 1888. Byla zřízena v návaznosti na velký úspěch propagačního osvětlení centra města Františkem Křížkem 23. června 1887. Písek se v tu dobu stal prvním městem v Čechách se stálým veřejným elektrickým osvětlením. V Praze existovaly na začátku 20. století dokonce dvě vodní elektrárny – na Těšnově a na Štvanici. Těšnovská elektrárna byla roku 1929 zrušena a štvanická je po rekonstrukci dodnes v provozuschopném stavu [13].

2.4. Vodní elektrárny

Vodní elektrárna je zařízení využívající stálý hydrologický cyklus neboli stálý oběh vody na Zemi, k přeměně mechanické energie na energii elektrickou [14]. Při této přeměně neprodukuje téměř žádné emise a je tedy vhodným kandidátem pro budoucí výrobu tzv. zelené energie. Vodní elektrárny můžeme konstruovat s výkony od desítek kW až do tisíců MW. Patří mezi velmi spolehlivé zdroje elektrické energie, a to hlavně kvůli dobré ovladatelnosti a předvídatelnosti.

Princip fungování je možno velmi jednoduše popsat následovně: protékající voda předává svou kinetickou energii turbíně, která roztáčí generátor a ten díky elektromagnetické indukci přeměňuje kinetickou energii na energii elektrickou. Ta se následně pomocí transformátoru transformuje a pomocí přenosové soustavy přenesení do míst potřeby.

Vodní elektrárny lze rozdělit do několika skupin podle odlišných kritérií, které se vzájemně prolínají.

2.5. Rozdělení dle celkové koncepce

Z hlediska celkové koncepce lze rozdělit vodní elektrárny na derivační a říční. Říční vodní elektrárny se nachází přímo na vodním toku a přitékající voda neopustí svoje původní místo toku. Například přímo v korytu řeky. Derivační vodní elektrárna je taková elektrárna, kde libovolným způsobem odvádíme vodu mimo místo svého původního toku a přivádíme ho do elektrárny mimo původní tok [15].

2.6. Rozdělení dle způsobu využití vodního toku

Podle tohoto kritéria lze rozdělit vodní elektrárny na **průtočné, jezové, derivační, akumulační, přečerpávací a slapové**.

Průtočné využívají pouze přirozený průtok a nijakým závratným způsobem neovlivňují přirozený průtok toku. Průtočné se dále rozdělují na **jezové** a **derivační**.

Jezové využívají přehradu pro zvýšení hladiny a soustředění spádu na jedno místo, čímž se docílí soustředěného průtoku vody.

Derivační vodní elektrárny se používají v částech vodního toku, kde koryto opisuje tvar písmena U. Umělým řečištěm je vytvořena „zkratka“, která odvede část vody do turbíny a následným odpadním kanálem je dovedena zpět do původního řečiště. Výhodou tohoto typu je umělé vytvoření vyššího spádu a lepší možnost regulace průtoku vody vodní elektrárnou.

Akumulační využívají přehrazení řeky hrází, která zajišťuje větší spád a akumulaci vody. Vodní elektrárna je pak umístěna přímo pod hrází, nebo se nachází mimo a nádrž slouží

k řízenému odběru vody. Tento typ závratně mění průtok toku, ale zároveň má několik dalších výhod, jako například akumulace pitné vody či ochrana proti povodním [16].

Přečerpávající využívají dvě rozdílně výškově položené vodní nádrže. Při přebytku elektrické energie dochází k využití tohoto přebytku k přečerpání vody do výše položené nádrže. Naopak při nedostatku elektrické energie dochází k proudění z výše položené nádrže do níže položené nádrže skrz turbíny a dochází k výrobě elektrické energie, která dokáže nedostatek v síti pokrýt. Tento typ elektráren slouží k akumulaci elektrické energie.

Slapové v dnešní době patří do skupiny méně využívaných vodních elektráren. Fungují na principu změny polohy měsíce, při čemž dochází k přílivu a odlivu, který tento typ dokáže využít.

2.7. Rozdělení dle využívaného spádu

Mezi důležitý provozní parametr patří spád H [m]. Tento parametr nám vyjadřuje výškový rozdíl mezi dvěma místy. Spád dělíme na hrubý a čistý. Hrubý spád je rozdíl horní a spodní hladiny toku, zatímco čistý spád je hodnota, která v sobě zahrnuje změny tlaku a výšky vody při proudění

elektrárnou[17]. Podle spádu dělíme vodní elektrárny na:

- Nízkotlaké – využívají spád o výšce do 20 metrů
- Středotlaké – využívají spád od 20 metrů do 100 metrů
- Vysokotlaké – využívají spád nad 100 metrů

Vysokotlaké elektrárny jsou většinou využívány jako zásobárny energie. Jsou spojeny s derivačním přivaděčem, který mimo špičkové zatížení čerpá vodu do vysoko položené nádrže. V případě potřeby se tato voda využije pro kompenzaci jalového výkonu při vysoké zátěži [16].

2.8. Rozdělení dle velikosti instalovaného výkonu

Při výběru vodní elektrárny do dané lokality je pravděpodobně nejdůležitější parametr instalovaný výkon. Podle požadovaného výkonu se dále pak upravují části vodní elektrárny tak, aby elektrárna dosahovala požadovaného výkonu (velikost turbíny, typ turbíny, velikost nádrže apod.)

Podle tohoto dělení lze rozdělit vodní elektrárny na:

- Velké VE s výkonem nad 200 MW.
- Střední VE s výkonem od 10 MW do 200 MW.
- Malé VE s výkonem do 10 MW.

Malé vodní elektrárny lze dále rozdělit na:

- Malé VE průmyslové s výkonem od 1 MW do 10 MW.
- Mini VE elektrárny s výkonem od 100 kW do 1000 kW
- Mikroelektrárny VE s výkonem od 35 kW do 100 kW.
- Domácí VE s výkonem do 35 kW.

2.9. Základní části vodní turbíny

Vodní elektrárna je komplexní výroba elektrické energie skládající se z několika částí. Některé si tu v následující pasáži blíže popíšeme.

2.9.1. Turbína

Turbína je pravděpodobně nejdůležitější část vodní elektrárny. Turbínu můžeme nazvat též jako vodní motor. Technicky to jsou nejdokonalejší motory vůbec, s účinností kolem 95 % [18]. Správná volba turbíny je pro účinný chod vodní elektrárny velmi důležitá. Volba typu a provedení turbíny závisí značně na terénu, potřebného výkonu a na hydrologických podmínkách dané lokality. Turbína se skládá ze tří částí, a to z oběžného kola, přívodu vody k oběžnému kolu a odvodu vody od oběžného kola.

Důležitým kritériem u turbín je orientace proudění vody, podle které rozdělujeme turbíny na [19]:

- Radiální odstředivé (centrifugální) – s vnitřním vtokem vody, kde voda protéká mezi lopatkami oběžného kola směrem od hřídele
- Radiální dostředivé (centripetální) – s vnějším vtokem vody, kde voda protéká mezi lopatkami oběžného kola směrem k hřídeli
- Radiálně axiální – oběžným kolem voda proudí nejprve radiálně (kolmo na osu) a po přiblížení k ose mění směr na přibližně osový
- Diagonální – voda protéká oběžným kolem kolmo ke hřídeli
- Axiální – voda protéká mezi lopatkami oběžného kola zhruba ve stejné vzdálenosti od jeho osy
- Tangenciální – na lopatky oběžného kola vstupuje voda ve směru tečny ke kružnici se středem na ose rotace kola
- S dvojnásobným průtokem – voda vstupuje do oběžného kola dostředivě a vystupuje z něj odstředivě
- Se šikmým průtokem – na lopatky oběžného kola vstupuje voda z boční strany a vystupuje v osovém směru

Dalším kritériem pro rozdělení turbín je způsob nakládání s energií vody. Podle tohoto způsobu dělíme turbíny na **přetlakové** a **rovnotlakové**.

Přetlakové jsou typy turbín, kde dochází k částečné přeměně tlakové měrné energie v zařízení pro přívod vody na kinetickou energii. Zbývající část tlakové měrné energie se při průchodu vody oběžným kolem mění na měrnou kinetickou energii. Zjednodušeně řečeno, tlak za turbínou je menší než před oběžným kolem z důvodu předání energie. U těchto turbín voda teče z rozváděcích kanálů do opačně zakřivených oběžných kanálů, ve kterých jsou působením proudu roztáčené lopatky. Vertikální přetlakové turbíny jsou specifické svou speciální částí zvanou savkou neboli rourou. Savka spojuje odtokovou stranu turbíny se spodní vodou, tudíž se sloupec kapaliny chová spojitě. Hlavními výhodami savky jsou zvýšení účinnosti turbíny a snadné spojení dvou výškově rozdílných hladin, díky čemuž se dá snadno využít celý spád. Zároveň umožňuje umísťovat oběžné kolo jinam než přímo nad spodní hladinu, díky čemuž se mohli začít používat turbíny s jinou než svislou hřídelí. Nevýhoda savky je taková, že pokud dojde k její poruše, tak dochází k mnohem větší ztrátě účinnosti, než kdyby savka nebyla vůbec použita. Proto se musí zajišťovat naprostá bezchybnost a pravidelné kontroly savky [20]. Přetlakové

turbíny se též označují jako turbíny reakční, neboť při urychlování proudu vody dochází k reakčnímu působení na oběžné lopatky [21].

Rovnotlaké jsou takovým typem turbín, kde se celková hodnota tlakové měrné energie postupně v zařízení mění v měrnou kinetickou energii vody a ta se mění na kinetickou energii oběžného kola turbíny. Jako důsledek je na výstupu turbíny stejný tlak jako na vstupu. U těchto turbín teče voda z rozváděcích kanálů do zakřivených oběžných kanálů, ve kterých se nachází zakřivené oběžné lopatky. U rovnotlakých se místo savky objevuje tzv. odpadní potrubí. Tyto turbíny též označujeme jako turbíny akční [20].

Mezi základní typy patří tzv. **Francisova turbína**, která spadá do přetlakových turbín s radiálně axiální vstupem. Patří mezi nejdéle využívané typy turbín malých vodních elektráren a její vznik se datuje již od roku 1849 [22]. Charakteristickým znakem je normálové oběžné kolo, jehož tvar připomíná buben. Francisova turbína se dále rozděluje na dva typy, a to na vertikální a horizontální.

Vertikální Francisova turbína se využívá u vodních děl jezových či derivačních. Tato turbína je většinou umístěna na dně kašny, jenž je spojena svislou hřídelí se strojovnou nacházející se nad kašnou. Používá se zde savka, která zajišťuje větší účinnost než u Francisových turbín horizontálních. V minulosti nacházela využití ve velkém ve mlýnech, městských elektrárnách, či v průmyslových závodech. Používá se v rozmezí spádu 1,5 m do 5 m při středních a velkých průtocích (600-8000 l/s) [20].

Horizontální Francisova turbína je jedna z nejpoužívanějších přetlakových turbín. Používá se většinou u vodních děl derivačních, a to na spádech 2 do 8 metrů při malých a středních průtocích (100 až 2000 l/s). Oproti vertikální má o něco menší účinnost, avšak má jiné přednosti. K hlavní výhodě patří využití vodorovné hřídele, která vychází z turbíny přímo do strojovny, a umístění turbíny přímo ve stěně kašny. Oproti vertikální se dále liší použitím kolenové savky, díky jejímu speciálnímu tvaru lze využít vyšší spády a zároveň mít umístěnou turbínu ve stěně. Podle umístění savky se dále dělí na mokrou a suchou. Mokrý savka zůstává uvnitř kašny, zatímco suchá savka prochází strojovnou. [20].

Kaplanova turbína je axiální přetlaková turbína, jenž vznikla v roce 1913. K jejímu vytvoření vedla snaha o využití velkých toků s malými spády. Využívá se především na vodních dílech derivačních a jezových, na spádu v rozmezí 2 až 4 metrů spádu a na průtoku 500 až 3000 l/s. Umožňuje použití i na menších spádech 1,5 až 5 metrů a průtoku od 250 do 6000 l/s. Velkou výhodou kaplanovi turbíny je absence využití kašny a malá stavební výška. Nevýhodou této turbíny je vysoká hodnota Thomsova kavitačního činitele a s tím spojené vyšší náklady. Thomsovův kavitační činitel nám vyjadřuje jev vzniku a zániku bublin v proudící vodě. Tento jev lze zmenšit či potlačit využitím korozi-vzdorných materiálů na lopatkách, čímž ale dojde ke zvýšení ceny turbíny [22].

Peltonova turbína je rovnotlaká tangenciální turbína, jež vznikla v roce 1880. Využívá se na malých tocích s vysokými spády v rozmezí 20-300 metrů. Je specifická dvojitými lžícovitými lopatkami a břitem, jež dělí vodní paprsek na dvě stejné části působící zároveň na dvojitě lopatky. Lžícovitý tvar lopatky zapříčiní, že oběžné kolo se snaží otočit směr tekoucí vody zpět. Díky tomuto jevu po „nárazu“ vody do lopatek voda odevzdá většinu svojí energie vodnímu kolu a s minimální energií dopadá do odpadního kanálu. Nevýhoda je nevyužití celého spádu [22].

Bánkiho turbína je rovnotlaká turbína s dvojnásobným průtokem, která byla vynalezena v roce 1918 a je většinou konstruována jako horizontální. Voda je přiváděna trubkou

kruhovitého tvaru, která těsně před turbínou změní tvar na obdélníkovitý. Tato část se nazývá mezikus a nachází se zde regulační klapka, která napomůže k využití celého spádu a zvýšení energie vody. Ta poté dopadá na oběžné kolo s dlouhými lopatkami, které se snaží vodu odklonit směrem do středu hřídele, a při této snaze o změnu směru získají lopatky z vody většinu energie. Voda poté volně dopadá do odpadního kanálu [20].

Turgo turbína je rovnotlaká turbína s parciální vstupem vynalezená v roce 1920. Voda je přiváděna potrubím k šikmo umístěné jedné nebo k více dýzám, kde se celý spád vody transformuje na pohybovou energii a začne působit na oběžné kolo. Dýza je mechanický prvek, který může omezovat průtok kapalin pro zvýšení rychlosti proudění. Oběžné kolo je tvořeno dvěma prstenci, na kterých jsou speciálně zakřivené lopatky působící proti vodě tak, aby otočili její směr. Při téhle snaze voda odevzdá většinu své energie lopatkám a pak je opouští na vnější straně oběžného kola, kde následně padá do odpadu pod turbínou. Tato turbína se většinou konstruuje jako vertikální a používá se jako kompromis mezi Peltonovou a Francisovou turbínou. Největší výhodou je možnost regulace pomocí zvyšování či snižování množství dýz. Další výhodou jsou tak vysoké otáčky, že se turbína může napojit přímo na hřídel generátoru [20].

Zotlötererova turbína patří mezi nový typ turbín, jež byla vynalezena v roce 2007 Rakušanem Franzem Zotlötererem. Nachází využití na tak malých spádech, na kterých nemohli použít normální turbíny, a to již od spádu 0,5 m s účinností kolem 80 % [24]. Voda je přiváděna ke speciální kašně cylindrovitého tvaru v jejímž prostředku voda padá do hloubky a vytváří vír, který otáčí turbínou. Turbína lze dimenzovat na průtok do 20 m³/s. Výhodou je velmi snadná realizace a šetrnost k vodním živočichům, kteří snadno proplují touto turbínou [23].

Vírová turbína Františka Pochylého patří mezi nový typ turbín vynalezený v roce 2000 v Brně pod vedením prof. Ing Františka Pochylého. Vychází z principu Zotlötererovy turbíny, kdy využívá vír vzniklý prouděním vody. Voda vstupuje do oběžného kola axiálně, díky čemuž nejsou potřeba rozváděcí lopatky a turbína je snadno realizovatelná. Je určena pro menší spády v rozmezí 1-5 m a pro relativně velké průtoky. Oproti Zotlötererově turbíně dosahuje vyšší účinnosti až 86 %. Mezi další výhody patří specifické vysoké otáčky, díky čemu není často potřeba převod pro generátor. Existují dvě varianty vírových turbín, a to násosková a přímoproudá. [23].

2.9.2. Generátor

Generátor je stroj pro přeměnu mechanické energie na energii elektrickou na základě elektromagnetické indukce. U malých vodních elektráren se nejčastěji používají asynchronní či synchronní generátory.

Asynchronní generátory jsou nejvíce používané jako generátory malých vodních elektráren. Patří mezi spolehlivé, jednoduché generátory s minimální údržbou s výkony do 2000 kW [20]. Mezi jejich největší výhody patří je jednoduchá konstrukce, pořizovací cena a minimální náklady na údržbu. Princip si zde zjednodušeně popíšeme. Na statoru se nachází troje vinutí geometricky posunutá o 120°, které je vyvedené mimo stroj. Po mechanickém otáčení rotoru, například propojenou turbínou, dojde k indukování třífázového napětí, stroj začne fungovat jako generátor a začne dodávat do sítě činný výkon. Ze sítě však začne odebírat jalový výkon, který se případně musí vykompenzovat [25].

U větších vodních elektráren se používají nejvíce **synchronní generátory**, a to přesněji stroje s vyniklými póly. Stator je konstrukčně totožný se státorem u asynchronního generátoru. Rotor se od asynchronního liší tím, že je na rotoru vinutí, které je napájené stejnosměrným napětím.

To vytvoří magnetické pole, které při mechanickém otáčení rotoru indukuje třífázové napětí na statoru. Největší výhodou synchronního generátoru je možnost startovat ze tmy.

2.9.3. Silnoproudá část

Silnoproudá zařízení jsou určena k přenosu, transformaci, spínání a jištění vyrobené elektrické energie. Slouží také k zásobování pohonů a jiných elektrických spotřebičů zahrnutých do vlastní spotřeby MVE. K přenosu výkonu z objektu je určena přípojka venkovním nebo kabelovým vedením, která je na úrovni NN (3 x 400 V) nebo při vyšších výkonech a větší vzdálenosti VN (22 a 35 kV) [25].

Důležitou částí je elektrická přípojka, která končí v hlavní skříni nebo v rozvodně vysokého napětí. Pokud se používá více napěťových úrovní, tak se zde používají jednofázové či trojfázové transformátory.

2.9.4. Porovnání s ostatními typy elektráren

Existuje hned několik způsobů, jak porovnávat zdroje elektrické energie. Způsobů, jak je můžeme porovnávat, se nabízí hned několik.

Elektrárny lze porovnávat podle vytvořených emisí, kde vodní, větrné a fotovoltaické patří mezi nejekologičtější. Nevytváří žádné tuhé znečišťující látky a ani při provozu nevznikají emise oxidu dusíku. Problém daných elektráren je náročnost na plochu, kde dochází při výstavbě k velkému zásahu do přírody a poměr cena/výkon.

Proces tvorby elektrické energie je po technické stránce velmi náročný. Jsou s tím spojeny různé náklady jako například výstavba zařízení, koupě pozemku, skladování paliv apod. Pokud bychom vzali celkové náklady, tak můžeme vypočítat, za jakou cenu vyrobíme 1 kWh. V tabulce cen jednotlivých elektráren (viz. Příloha 7) vidíme, že vodní elektrárny patří mezi levnější alternativy, kdy 1 kWh s ohledem na počáteční náklady stojí kolem 3083 \$/kWh. V příloze lze i vidět, že pořizovací cena není oproti ostatním tak vysoká a následné náklady pro provoz jsou minimální.

2.10. Výhody a nevýhody vodních elektráren

Mezi největší **výhody** vodních elektráren patří ekologická šetrnost. Jakožto obnovitelný energetický zdroj nevyčerpávají přírodu a v rámci dlouhodobého užívání jsou obecně velmi šetrné k životnímu prostředí. K dalším výhodám jistě patří minimální provozní náklady, bezporuchovost a snadná udržitelnost. Vodní elektrárny zastupují i jiné funkce než vznik elektrické energie, a to regulaci vodního průtoku, hospodaření s vodou či protipovodňovou ochranu. Zároveň se mohou používat jako zdroje pitné či požární vody a případně i jako rekreační objekt [26]. Mezi další výhodou patří možnost akumulace energie a případné pokrytí denního zátěžového diagramu při špičce, viz přečerpávací vodní elektrárny, které dokážou najet z nulového výkonu na maximální během cca 2 sekund a pokrýt zatíženou síť.

Mezi **nevýhodami** patří velký počáteční zásah do přírody. Budují se velké akumulární nádrže, upravuje se vodní tok či koryto. To ve výsledku velmi ovlivňuje okolí, jako například vytvoření stojaté vody, snížení hladiny či průtoku. Kvůli těmto zásahům patří k ekologicky kontroverzním elektrárnám, jelikož nevytváří žádné odpady, ale na počátku velmi zasahuje do přírody. Mezi další nevýhody patří závislost na počasí, které může být často velmi nevyzpytatelné. Kvůli počasí může docházet například ke změně spádu a průtoku, které pak negativně ovlivňují činnost vodní elektrárny.

2.11. Rozvoj malých vodních elektráren na území ČR

Ve 30. letech 20. století se nacházelo na území bývalého Československa téměř 15000 lokalit, kde byla využívána vodní energie převážně na pohon pil a mlýnů [27]. V současnosti toto číslo kleslo na 1300 malých vodních elektráren, z nichž je 570 dále používaných pro výrobu elektrické energie. Na území České republiky se nachází přibližně kolem 4000 použitelných lokalit pro malé vodní elektrárny. Hydroenergetický potenciál využitý k výrobě elektřiny je využit jen z 25 %, což nám do budoucnosti naskytuje příležitost pro rozvoj výroby elektrické energie z vodních obnovitelných zdrojů v České republice.

V současné době se soustředí převážně na obnovu a rekonstrukci vodních děl využívaných v minulosti. Nové malé vodní elektrárny se tolik nebudují, a to především kvůli ekonomickým či legislativním důvodům. Některé lokality vhodné pro výstavbu se nachází v chráněných oblastech a výstavba zde současně není možná.

Vodní elektrárny představují největší skupinu pro výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů. Přibližně 3 % z celkové výroby elektrické energie, což představuje kolem 2376,3 GWh/rok, z čehož je vyrobeno 40,7 % v malých vodních elektrárnách [28].

2.12. Podpora obnovitelných zdrojů na území České republiky

Na území České republiky dochází k velké podpoře obnovitelných zdrojů. Energetický regulační úřad vydává cenové rozhodnutí, kterým stanoví podporu pro obnovitelné zdroje energie. Podporu lze získat ve formě speciální výkupní ceny anebo ve formě zelených bonusů. Pokud tuto podporu chceme získat, musíme se zaregistrovat u OTE (Operátor trhu s elektřinou) a vyrobená energie musí být v souladu s energetickým zákonem [30].

Výkupní ceny nezahrnují daň z přidané hodnoty, ale je k nim připočítána daň z přidané hodnoty podle jiného právního předpisu. Konkrétně podle zákona č. 235/2004 Sb. [31]. Zároveň má vykupující povinnost vykoupit veškerý objem elektřiny v předávacím místě za domluvenou cenu. Zelené bonusy jsou vypláceny OTE a jejich výše je stanovena podle zákona č. 165/2012 Sb. [32].

Pro distribuci vyrobené elektrické energie si výrobce musí najít svého odběratele a sjednat s ním cenu, jinak energie nemůže být prodána a může být použita pouze pro vlastní potřeby. Výši zeleného bonusu na elektřinu vyměřuje ERÚ podle vyhlášky [33]. V tabulce cen podpor jednotlivých vodních elektráren (viz. Příloha 8) vidíme příklad podpory vodních elektráren na území České republiky.

3. Legislativa vodních elektráren

V České republice bez patřičného povolení není možné postavit, rekonstruovat či půdorysně upravit trvale umístěnou budovu. Existuje dlouhý poustup, jimž si musí projít každá fyzická či právnická osoba, která chce stavět či rekonstruovat malou vodní elektrárnu [29].

3.1. Legislativní postup při zakládání MVE [29]

Před zahájením jakýkoliv prací či žádostí se nejdříve doporučuje kontaktovat odborníka a danou lokalitu následně podrobně prokonzultovat.

Následovný legislativní postup lze rozdělit do pěti kategorií, které na sebe chronologicky navazují.

3.2. Výběr a vyhodnocení lokality

Nejdříve se musí kontaktovat příslušný úřad a zjistit podmínky pro realizaci stavby. Pokud lokalita není součástí územního planu, tak je nutné zažádat o změnu. Změna územního plánu je dlouhodobá a může být zpoplatněna.

Dalším bodem je získání potřebného souhlasu od vlastníku pozemků a potřebné předběžné vyjádření z hlediska plánování v oblasti vod a zájmů chráněných zákonem 254/2001 Sb. Dalším krokem by mělo být ekonomické zhodnocení dané lokality a případné uzavření smlouvy od příslušného distributora o připojení vodní elektrárny do distribuční sítě.

Pokud jsou všechna vyjádření, stanoviska a rozhodnutí kladná, je možné přejít k zahájení územního řízení

3.2.1. Územní řízení.

Pro tuto část se musí začít s projektovou dokumentací včetně rybího přechodu a požárně bezpečnostního řešení. Tuto projektovou dokumentaci musí poskytnou autorizovaný inženýr v oboru vodohospodářské stavby. Zároveň musí dojít k odbornému biologickému hodnocení od odborníka.

Dalším krokem je potřeba získání podkladů od příslušného úřadu pro rozhodnutí o výjimce z ochranných podmínek ze zákona §56 zákon o ochraně přírody a krajiny, pro sdělení k podlimitnímu záměru – budování MVE pod výkon 10MW, pro stanovisko s vyloučením významného vlivu na lokality soustavy Natura 2000 pro závazné stanovisko pro zásah do významného krajinného prvku.

Pokud je lokalita v ZPF (Zemědělský půdní fond), tak by se měli vypracovat podklady pro odnětí z ZPF a vyhodnocení důsledků odnětí na ZPF. To samé platí pro LPF (Lesní půdní fond), kde by se měl vypracovat znalecký posudek škody z trvalého odnětí nebo trvalého omezení plnění produkční funkce lesa.

Dalším krokem je zajištění posudku zahrnující vodní dílo do náležité kategorie a návrh podmínek provádění dohledu. Jako poslední povinnost v územním řízení se podá žádost o vydání rozhodnutí o umístění stavby. Pro vydání tohoto rozhodnutí postačí souhlas vlastníka pozemku viz. §86 odst.3.

3.2.2. Stavební řízení.

Nejdříve musí dojít k projektové DSP (dokumentaci pro stavební povolení) a následně k zajištění manipulačního řádu, který musí být schválený od příslušného povodí a místního svazu rybářů.

Poté k podání žádosti o stavební povolení a stavební povolení k vodním dílům. Zároveň musí být podána žádost o povolení k nakládání s povrchovými nebo podzemními vodami nebo o jejich změny.

3.2.3. Uvedení do zkušebního provozu.

V tomto bodě lze podat žádost o vydání kolaudačního souhlasu ke stavebním objektům pro zkušební provoz a o souhlas k užívání vodního díla a poté je dalším krokem uvedení do provozu. Konkrétně získání licence na výrobu elektřiny a provedení připojení k distribuční

nebo přenosové soustavě. V tomto kroku se určuje doba životnosti a cenový tarif výkupu. Tyto licence se získávají od ERÚ (Energetický regulační úřad).

3.2.4. Ostatní povinnosti

Vlastnictví MVE je spojené i dalšími povinnostmi, které musí provozovatel dodržovat. Provozovatel elektrárny musí hlásit předpokládané množství vyrobené elektrické energie nejpozději čtyři měsíce před uvedením elektrárny do provozu a toto hlášení se zasílá provozovateli distribuční sítě. Každý rok musí podávat hlášení o předpokládaném množství vyrobené elektřiny a to do 31.8. Musí se oznamovat výběr formy podpory pro elektrárnu získávající energii z obnovitelných zdrojů. Tento výběr se musí zasílat provozovateli distribuční sítě, a to nejdéle měsíc před uvedením do provozu. Pro změnu formy podpory se musí žádost podat nejpozději do 30.11.

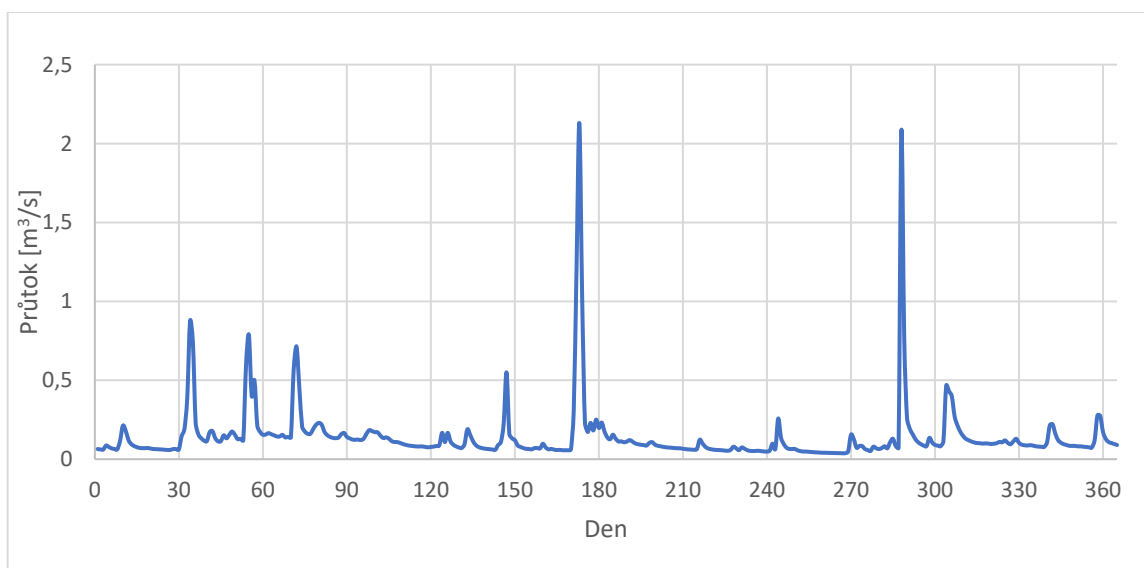
4. Praktická část

V této části jsme se zaměřili na navrhnutí nízko spádových malých vodní elektráren, která částečně zvládnou uspokojit energetické požadavky a zjistíme, jak je ekonomicky výhodná. Popíšeme zde postupný proces navrhnutí malých vodních elektráren a na konci provedeme ekonomicky-technické zhodnocení.

4.1. Výběr lokality

Výběr lokality je velmi důležitou částí, od které se následně odvíjí celý proces navržení vodní elektrárny. Je velmi důležité vybrat lokalitu s vhodnými podmínkami pro vodní elektrárnu, a to konkrétně na dostupnost, průtok, změnu nadmořské výšky atd. Jako vhodnou lokalitou pro náš projekt byl zvolen Blatný potok.

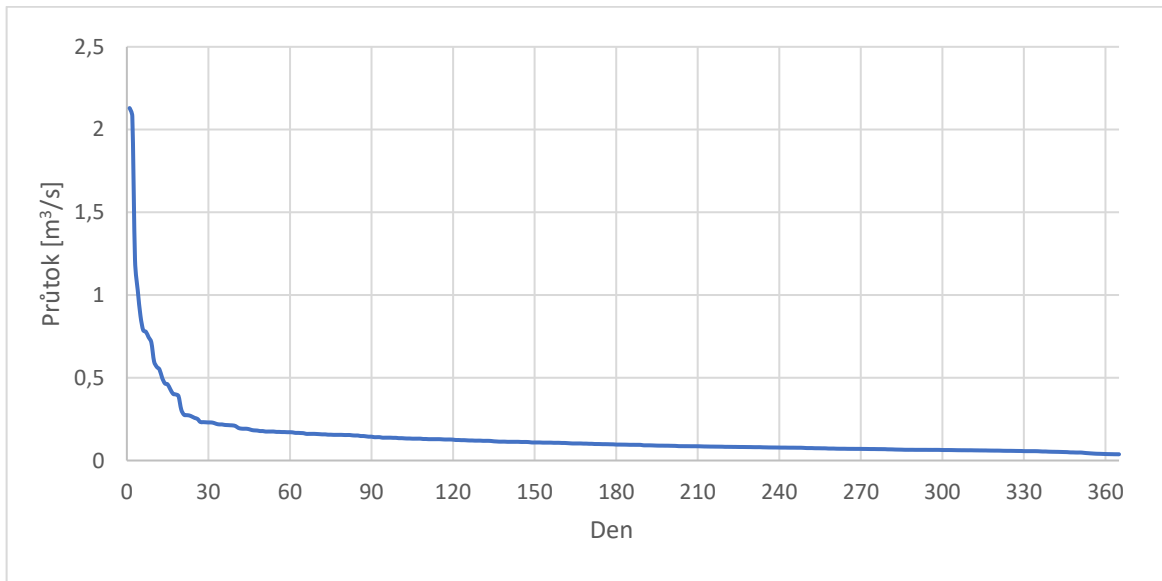
Blatný potok se nachází v Libereckém kraji a pramení na vrcholu Holubník. Délka toku je kolem 6,12 km a končí ve vodní nádrži Josefův Důl [34]. Podle databáze z hydrometeorologického ústavu lze zjistit jeho průměrný denní průtok za rok 2022 [35]:



Graf 1. Průměrná hodnota denního průtoku za rok 2022

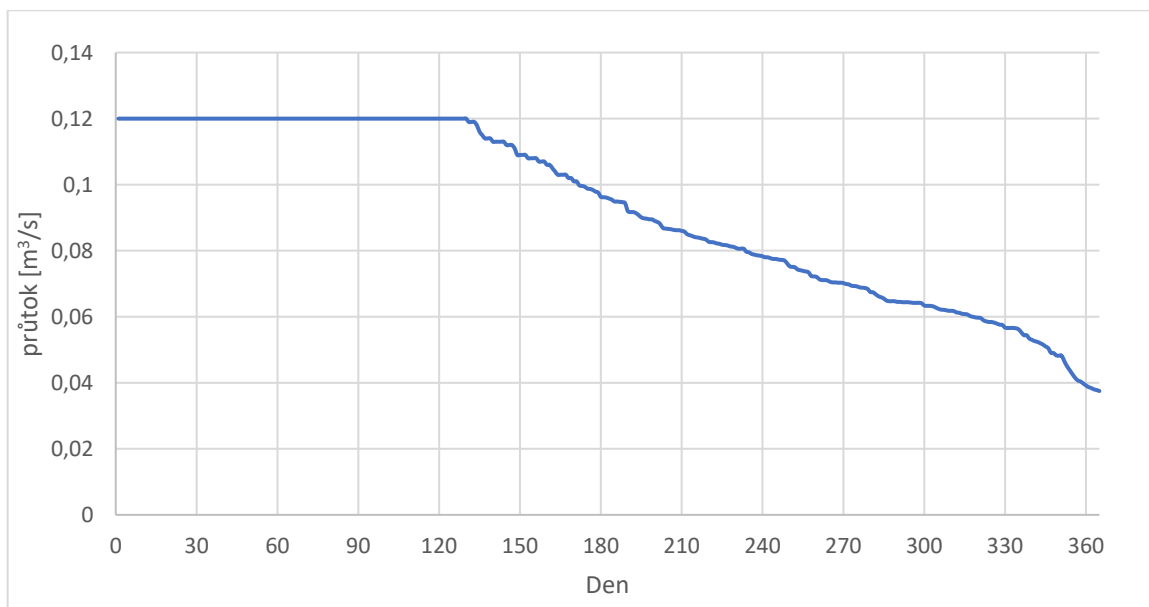
Pokud tento graf seřadíme dle průtoku od nejvyššího po nejnižší, tak dostaneme tzv. odtokovou křivku, která je důležitá při výběru lokality pro vodní elektrárnu. Čím vyšší

a plošší průběh grafu je, tím je vodní tok způsobilejší pro vodní elektrárnu. Znamená to, že vodní tok bude mít stabilnější a silnější průtok, s čímž úzce souvisí účinnost turbín, protože s klesajícím průtokem účinnost turbín klesá. Toto tvrzení lze potvrdit ze vzorců (2.6) a (2.7).



Graf 2. Odtoková křivka za rok 2022

Zde lze vidět, že v průtoku jsou velké rozdíly a v případě využití celého průtoku není tok vhodný pro stabilní výrobu energie, protože se při tak velké změně průtoku bude velmi snižovat účinnost turbín. Je potřeba zajistit průtok vodní elektrárnou tak, aby odtoková křivka byla plošší, čehož docílíme díky úpravě koryta. V tomto případě vytvoříme odbočku, která zajistí jen částečné využití průtoku a nevyužitou část tekoucí vody odvede mimo elektrárnu. V našem případě odbočka zajistí průtok nepřesahující hodnoty 0,12 m³/s. Po této úpravě dojde ke změně odtokové křivky na tvar:



Graf 3. Upravená odtoková křivka za rok 2022

Dalším krokem rozdělíme data na M-denní průtoky, což jsou měsíční průměrné hodnoty průtoku vycházející z odtokové křivky a vytvoříme tabulku s těmito hodnotami.

Měsíce	Průměrná hodnota časového intervalu průtoku [m ³ /s]
30	0,120
60	0,120
90	0,120
120	0,120
150	0,116
180	0,103
210	0,091
240	0,082
270	0,074
300	0,066
330	0,061
365	0,048

Tabulka 1. Průměrné hodnoty časového intervalu zkonstruované na základně odtokové křivky

V tabulce lze vidět, že přes 120 dnů musela být hodnota průtoku regulovaná pomocí odbočky a až po postupném poklesu jsme mohli využít průtok celý.

Dalším důležitým parametrem, souvisejícím s vhodnou volbou lokality, je spád. V námi vybraném místě je hrubý spád roven 0,6 m. Pro správné navržení vodní elektrárny je však potřeba čistý spád, ve kterém se projeví i další hodnoty, a to: šířka vstupu a výstupu vody z elektrárny, výška prostoru pod turbínou, výška horní a dolní hladiny víru.

V této pasáži si navrhne část vodní elektrárny spojenou právě s čistým spádem. Spád ovlivňuje celkový výkon elektrárny, tudíž se musí zvolit vhodná konfigurace. V následující tabulce vidíme námi zvolené hodnoty parametrů, kterých se poté dosáhne dodatečnou úpravou koryta. Tyto hodnoty využijeme ve všech navržených variantách.

Název	Značka	Jednotky	Hodnota
Výška horní hladiny	h_3	[m]	1,0
Výška dolní hladiny	h_4	[m]	0,6
Výška prostoru pod turbínou	h_1	[m]	0,2
Šířka vstupu vody	b_3	[m]	1,0
Šířka výstupu vody	b_4	[m]	0,5

Tabulka 2. Zvolené parametry vodní elektrárny

Díky těmto hodnotám můžeme vypočítat čistý spád pro M-denní průtoky ze vztahu [36]:

$$H = h_1 + h_3 + \frac{v_3^2}{2g} - h_4 - \frac{v_4^2}{2g} \quad (4.1)$$

kde:

H ... čistý spád [m]

h_1 ... výška prostoru pod turbínou [m]

h_3 ... výška horní hladiny [m]

h_4 ... výška dolní hladiny [m]

v_3 ... průřezová rychlost horní hladiny [m.s⁻¹]

v_4 ... průřezová rychlost dolní hladiny [m.s⁻¹]

Pro výpočet je potřeba dopočítat průřezovou rychlost proudu v horní a dolní části vodní elektrárny. Toho lze docílit pomocí vztahů [36]:

$$v_3 = \frac{Q}{b_3 h_3} \quad (4.2)$$

$$v_4 = \frac{Q}{b_4 h_4} \quad (4.3)$$

Ukázkový příklad výpočtu pro průtok 0,12 m³/s:

$$v_3 = \frac{0,12}{1 \cdot 1} = 0,12 \text{ m/s}$$

$$v_4 = \frac{0,12}{0,5 \cdot 0,6} = 0,4 \text{ m/s}$$

$$H = 0,2 + 1 + \frac{0,12^2}{2 \cdot 9,81} - 0,6 - \frac{0,4^2}{2 \cdot 9,81} = 0,592 \text{ m}$$

Měsíce	Průměrná hodnota časového intervalu průtoku [m ³ /s]	Čistý spád [m]
30	0,120	0,593
60	0,120	0,593
90	0,120	0,593
120	0,120	0,593
150	0,116	0,593
180	0,103	0,594
210	0,091	0,596
240	0,082	0,597
270	0,074	0,597
300	0,066	0,598
330	0,061	0,598
365	0,048	0,599

Tabulka 3. Vypočtené hodnoty čistého spádu

Z tabulky lze vidět, že u malých vodních elektráren nedochází k tak velké změně čistého spádu. Kdybychom navrhovali velkou elektrárnu, čistý spád by se měnil mnohem razantněji.

4.2. Parametry turbíny

V následujících částech si ukážeme další potřebné vztahy pro navržení vodní elektrárny. Neukážeme si zde konkrétní výpočty, protože hodnoty se budou pro každou variantu lišit. Výpočty uvidíme až u jednotlivých variant.

Nejdříve využijeme parametry, které vychází z měrných hodnot již vyrobených turbín. Pro porovnávání se využívají jednotkové hodnoty, konkrétně jednotkový průtok a jednotkové otáčky. Jednotkové hodnoty jsou kritéria, která vystihují podobnostní vazbu geometricky podobných turbín [38] a jsou důležitá pro navrhování podobných turbín s odlišnými parametry.

Mezi první důležitou část turbíny při návrhu patří průměr oběžného kola, který vypočítáme pomocí již zmíněných jednotkových hodnot. Průměr oběžného kola lze vypočítat ze vztahu:

$$D_{ok} = \sqrt{\frac{Q}{Q_{11} \cdot \sqrt{H}}} \quad (4.4)$$

kde:

Q ... průtok [m^3/s]

Q_{11} ... jednotkový průtok [m^3/s]

D_{ok} ... průměr oběžného kola [m]

H ... čistý spád [m]

Dalším krokem je potřeba vypočítat rychlost otáčení oběžného kola. Tento krok je velmi důležitý při návrhu, protože pokud by tato hodnota vyšla značně vysoká, tak by turbína nemohla být ani vyrobena. Rychlost otáčení lze vypočítat ze vztahu:

$$n = \frac{n_{11} \cdot \sqrt{H}}{D_{ok}} \quad (4.5)$$

kde:

n ... otáčky oběžného kola [ot/min]

n_{11} ... jednotkové otáčky oběžného kola [ot/min]

D_{ok} ... průměr oběžného kola [m]

H ... čistý spád [m]

Po využití jednotkových hodnot je zapotřebí přepočítat účinnost použitého modelu pro naši navrženou turbínu. Pro přepočet se často využívá tzv. Huttonův vzorec [47]:

$$\eta_D = 1 - (1 - \eta_M) \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \left(\frac{D_M}{D_D} \right)^{\frac{1}{5}} \cdot \left(\frac{H_M}{H_D} \right)^{\frac{1}{10}} \right] \quad (4.6)$$

kde:

η_D ... účinnost navržené turbíny [-]

η_M ... účinnost turbíny modelu [-]

D_M ... průměr oběžného kola modelu [m]

D_D ... vypočtený průměr oběžného kola [m]

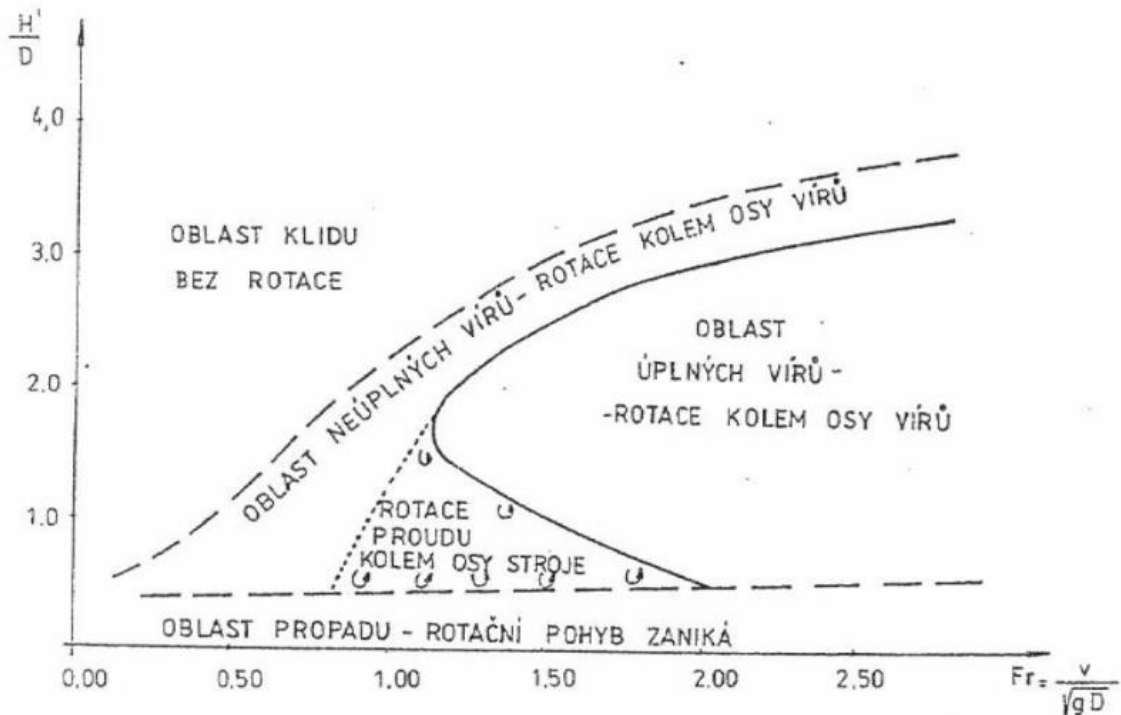
H_M ... čistý spád modelu [m]

H_D ... čistý spád [m]

4.3. Vznik víru

V dalším kroku je potřeba zjistit, zda se v nádrži vytvoří potřebný vír pro pohánění turbíny. Tímto problémem se zabýval prof. Ing. Jan Šulc CSc., který v roce 1987 vydal zprávu

o Experimentálním výzkumu tvorby vírů před vybranými vtoky hydraulických děl. V této práci experimentálně zjistil stádia vírů a jejich rotaci a dané oblasti vyznačil do grafu [39].



Graf 4. Proudění na hladině v kašně vertikálních turbín [39]

Pro zjištění, zda se vytvoří vír, je zapotřebí dopočítat potřebné parametry. Prvním parametrem je průřezová rychlost, která vyjadřuje rychlost vody proudící daným profilem. V našich případech budeme počítat s kruhem. Průřezovou rychlost můžeme vypočítat ze vztahu [40]:

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_{ok}^2} \quad (4.7)$$

kde:

v ... průřezová rychlost [m/s]

Q ... průtok [m³/s]

D_{ok} ... vypočtený průměr oběžného kola [m]

Pomocí průřezové rychlosti lze dopočítat Froudeho číslo, což je podobnostní kritérium využívané pro modelování hydrodynamických procesů a lze ho vypočítat ze vztahu [40]:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot D_d}} \quad (4.8)$$

kde:

Fr ... Froudeho číslo [-]

v ... průřezová rychlost [m/s]

g ... tíhové zrychlení [m/s²]

D_d ... vypočtený průměr oběžného kola [m]

Posledním kritériem vzniku víru je kritická hloubka, která se využívá při popisu proudění kapaliny. Mnoho autorů se liší ve způsobu výpočtu této hodnoty, a tak jsou výsledné hodnoty často velmi rozdílné. V této práci se využije vztah podle Šulce, který vychází ze vztahu [41]:

$$H' = (0,33 \cdot Fr^2 + 1,1) \cdot D_d \quad (4.9)$$

kde:

H' ... kritická hloubka [m]

Fr ... Froudeho číslo [-]

D_d ... vypočtený průměr oběžného kola [m]

4.4. Generátor

Pokud turbína nedosahuje takových otáček, aby generátor mohl efektivně vytvářet elektrickou energii, tak se musí zajistit převod pro zrychlení či zpomalení otáček. Pro převod se využijí řemenové převody, které představují nejrozšířenější a nejlevnější řešení s účinností až 98 % [42]. Pro správný převod jsou zapotřebí řemenice a řemen, které převádí mechanickou energii z hřídele na generátor. Pro zrychlení se využívá přenos mechanické energie z větší řemenice na menší, a pro zpomalení je to naopak.

Pro správné zvolení řemenového převodu je nejdříve zapotřebí vypočítat převodový poměr i mezi turbínou a generátorem, který zjistíme ze vztahu [42]:

$$i = \frac{n_G}{n_T} \quad (4.10)$$

kde:

i ... převodový poměr [-]

n_G ... otáčky generátoru [ot/min]

n_T ... otáčky turbíny [ot/min]

V dalším kroku se zvolí průměr menší řemenice a pomocí vztahu [42] se dopočítá průměr větší řemenice:

$$D_2 = D_1 \cdot i \quad (4.11)$$

kde:

D_2 ... průměr větší řemenice [m]

D_1 ... průměr menší řemenice [m]

i ... převodový poměr [-]

Nyní lze dopočítat délku klínového řemenu, který přenesení kroučící moment z jedné řemenice na druhou [42]. Nejdříve se vypočítá vzdálenost os řemenic:

$$A = \frac{0,7}{2} \cdot (D_1 + D_2) \quad (4.12)$$

kde:

A ... vzdálenost os řemenic [m]

D_1 ... průměr menší řemenice [m]

D_2 ... průměr větší řemenice [m]

Poté velikost úhlu β (viz. Příloha 6):

$$\sin\beta = \frac{D_2 - D_1}{2A} \quad (4.13)$$

kde:

β ... velikost úhlu (viz. Příloha 6) [°]

A ... vzdálenost os řemenic [m]

D_1 ... průměr menší řemenice [m]

D_2 ... průměr větší řemenice [m]

A následně celková délka klínového řemenu:

$$L = 2A \cdot \cos\beta + \frac{\pi \cdot D_2}{2} + \frac{\pi \cdot D_1}{2} + 2\pi \cdot D_2 \cdot \frac{\beta}{360} - 2\pi \cdot D_1 \cdot \frac{\beta}{360} \quad (4.14)$$

kde:

A ... vzdálenost os řemenic [m]

D_1 ... průměr menší řemenice [m]

D_2 ... průměr větší řemenice [m]

β ... velikost úhlu (viz. Příloha 6) [°]

Grafické znázornění celkového výpočtu lze vidět v přiloženém obrázku (viz. Příloha 6).

4.5. Ekonomické zhodnocení

Předtím, než se vůbec začne s realizací MVE, by se mělo zjistit, zda se daná investice do výroby z ekonomického hlediska vyplatí. Tato informace je velmi důležitá pro investory či soukromé uživatele.

Pro výpočet je potřeba nejdříve využít vzorce (2.7),(2.8),(2.9) a dopočítat celkovou vyrobenou energii za rok, tedy sumu energií vyprodukovaných v jednotlivých měsících:

$$E_c = \sum_{n=1}^{12} E_i \quad (4.15)$$

kde:

E_c ... celková vyrobená energie [kWh]

E_i ... energie vyrobená v jednotlivých měsících [kWh]

V dalším kroku stačí vzít celkovou vyrobenou energii a vynásobit ji cenou za 1 kWh. Tuto hodnotu vezmeme ze stránek Českých energetických závodů (ČEZ) a využijeme pro výpočet jí ve všech variantách [45].

Celkovou vyrobenou energii vypočteme ze vztahu:

$$U_c = E_c \cdot \text{cena} \quad (4.16)$$

kde:

U_c ... celková ušetřená cena za energie [kč/rok]

E_c ... celková vyrobená energie [kWh]

Dalším přínosným ukazatelem je prostá doba návratnosti investice, což je doba, za kterou bude investice splacena z peněžních příjmů výroby. Čím je tato doba menší než doba životnosti, tím je investice do výroby výhodnější [48]. Problém s tímto ukazatelem je absence diskontu, tedy prostá doba návratnosti nepočítá se změnou budoucí hodnoty peněz. Doba prosté návratnosti lze vypočítat pomocí vztahu:

$$T_n = \frac{K_i}{P_j} [\text{rok}] \quad (4.17)$$

kde:

T_n ... prostá doba návratnosti [rok]

P_j ... roční ekvivalentní příjem [kč/rok]

K_i ... investiční výdaje [Kč]

Dalším ukazatelem, který nám pomůže ekonomicky zhodnotit navrženou vodní elektrárnu, je čistá součtová hodnota neboli NPV. Pomocí NPV můžeme odhadnout peněžní ohodnocení vodní elektrárny v celkové době její životnosti. Výhodou NPV je taková, že počítá s časovou změnou hodnoty peněz a převádí budoucí peněžní toky na dnešní. Pokud je hodnota NPV větší nebo rovna 0, tak je podle našeho odhadu investice do elektrárny výhodná [51]. Pro výpočet využijeme dle zákona § 9a odst. 1 písm. e) hodnotu diskontu ve výši 0,04 [46]. Hodnotu NPV lze vypočítat pomocí funkce v excelu „čistá.součhodnota“, nebo ze vztahu:

$$NPV = \sum_{j=1}^n \frac{CF_j}{(1+i)^j} - K_i \quad (4.18)$$

kde:

NPV ... čistá součtová hodnota [kč]

CF_j ... peněžní toky v j -tém roce životnosti (Kč/rok)

K_i ... investiční výdaje [Kč]

i ... zvolená diskontní úroková míra [%]

n ... doba životnosti [rok]

Pro porovnání investic se dále využívá ukazatel IRR neboli vnitřní výnosové procento. Využívá se pro zjištění relativního výnosu projektu. Číselně je rovno takovému diskontu, při kterém je NPV rovno nule. Tedy hodnotě, při které se budoucí hodnota investovaných peněz vyrovná nebo převýší hodnotu peněz získaných z investice. Dá se říct, že čím je hodnota IRR

vyšší, tím je investice do projektu výhodnější. IRR lze vypočítat pomocí funkce „MÍRA.VÝNOSNOSTI“ v Excelu anebo ze vztahu:

$$0 = \sum_{j=1}^n \frac{CF_j}{(1 + IRR)^j} \quad (4.19)$$

kde:

IRR ... míra výnosnosti [%]

CF_j ... peněžní toky v jednotlivých letech [kč/rok]

n... doba životnosti [rok]

Pomocí kombinace výše zmíněných vztahů lze odhadnout, zda se daná investice do malé vodní elektrárny z dlouhodobého horizontu vyplatí, nebo bude prodělečná.

4.6. Návrh – Varianta I.

Jako první variantu navrhne vírovou turbínu, která bude vycházet z jednotkových hodnot modelu turbíny 3VT- 200. Turbínu budeme projektovat na již upravenou lokalitu (viz. 4.1) a budeme ji navrhovat tak, aby vyrobená energie pokryla průměrnou denní spotřebu domu.

4.6.1. Turbína

Nejdříve se zvolí měsíc pro referenční hodnoty průtoku a čistého spádu z Tabulka 1, abychom mohli provést přepočty. V tomto případě se často vybírá místo s nejvyšším průtokem. My jsme si zvolili den $t_z = 120$, kdy je průtok $Q_z = 0,12 \text{ m}^3/\text{s}$ a čistý spád $H_z = 0,593 \text{ m}$.

Poté jsme z charakteristiky závislosti účinnosti turbíny na jednotkových otáčkách 3VT - 200 (viz. Příloha 2) pro spád modelu $H_m = 1,5\text{m}$ zvolili bod, při kterém model turbíny pracuje s co nejvyšší účinností. Z charakteristiky tomuto bodu odpovídá hodnota účinnosti turbíny $\eta_m = 0,76$ a jednotkové otáčky $n_{11m} = 162 \text{ ot}/\text{min}$.

Po zjištění jednotkových otáček lze vyčíst z charakteristiky závislosti jednotkového průtoku na jednotkových otáčkách 3VT – 200 (viz. Příloha 3) jednotkový průtok $Q_{11m} = 2,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Poslední potřebný parametr pro výpočty je průměr modelu turbíny 3VT -200 $D_{okm} = 0,2\text{m}$.

Pomocí těchto hodnot již lze vypočítat průměr oběžného kola navržené turbíny ze vztahu (4.4):

$$D_{ok} = \sqrt{\frac{0,12}{2,2 \cdot \sqrt{0,593}}} = 0,27 \text{ m}$$

A následně lze dopočítat otáčky ze vztahu (4.5):

$$n = \frac{162 \cdot \sqrt{0,593}}{0,27} = 468 \text{ ot}/\text{min}$$

Pro přepočty účinnosti turbíny je potřeba vypočítat jednotkové otáčky pro jednotlivé čisté spády. Tyto hodnoty se využijí k dohledání změny účinnosti ze závislosti účinnosti

na jednotkových otáčkách 3VT - 200 (viz. Příloha 2) a vypočítají se z upraveného vztahu (4.4):

$$n_{11} = \frac{n \cdot D_{ok}}{\sqrt{H}}$$

Ukázkový příklad výpočtu jednotkových otáček pro spád 0,6 m:

$$n_{11} = \frac{468 \cdot 0,27}{\sqrt{0,6}} = 161 \text{ ot/min}$$

Této hodnotě ze závislosti účinnosti na jednotkových otáčkách 3VT - 200 (viz. Příloha 2) odpovídá účinnost 0,7. Nyní tuto účinnost stačí přepočítat podle vztahu (4.6):

Ukázkový příklad přepočtu účinnosti turbíny pro spád 0,6 m:

$$\eta_D = 1 - (1 - 0,76) \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \left(\frac{0,2}{0,27} \right)^{\frac{1}{5}} \cdot \left(\frac{1,5}{0,6} \right)^{\frac{1}{10}} \right] = 0,75$$

Spád H [m]	Vypočtené jednotkové otáčky n_{11} [ot/min]	Účinnost modelu vyčtená z grafu η [-]	Přepočtená účinnost η_D [-]
0,600	161,00	0,76	0,75
0,599	161,13	0,76	0,75
0,598	161,26	0,76	0,75
0,597	161,40	0,76	0,75
0,596	161,53	0,76	0,76
0,595	161,67	0,76	0,75
0,594	161,81	0,76	0,76
0,593	161,94	0,76	0,76
0,592	162,08	0,76	0,76

Tabulka 4. Výpočet účinnosti turbíny varianty I.

Nyní jsou dopočítány potřebné parametry, na které bude turbína dimenzována. Dalším krokem je potřeba zjistit, zda vznikne v našem návrhu požadovaný vír.

4.6.2. Vznik víru

Nejdříve je potřeba dopočítat Froudeho číslo a následně kritická hloubka. Tyto hodnoty lze zjistit ze vztahů (4.7), (4.8) a (4.9):

Ukázkový výpočet pro průtok $Q = 0,12 \text{ m}^3/\text{s}$:

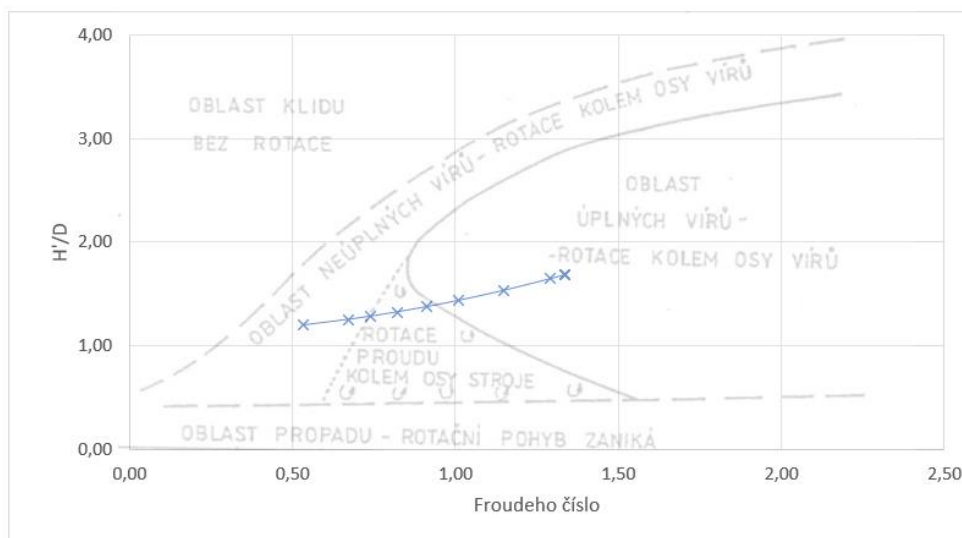
$$v = \frac{4 \cdot 0,12}{\pi \cdot 0,27^2} = 2,16 \text{ m/s}$$

$$Fr = \frac{2,16}{\sqrt{9,81 \cdot 0,27}} = 1,33$$

$$H' = (0,33 \cdot 1,33^2 + 1,1) \cdot 0,27 = 0,45 \text{ m}$$

Průtok Q [m ³ /s]	Průřezová rychlost v [m/s]	Froudeho číslo Fr [-]	Kritická hloubka ponoru H' [m]	Poměr H'/D _{ok}
0,120	2,16	1,33	0,45	1,69
0,120	2,16	1,33	0,45	1,69
0,120	2,16	1,33	0,45	1,69
0,120	2,16	1,33	0,45	1,69
0,116	2,09	1,29	0,44	1,65
0,103	1,86	1,15	0,41	1,54
0,091	1,63	1,01	0,38	1,44
0,082	1,47	0,91	0,37	1,37
0,074	1,33	0,82	0,35	1,32
0,066	1,19	0,74	0,34	1,28
0,061	1,09	0,67	0,33	1,25
0,048	0,86	0,54	0,32	1,19

Tabulka 5. Hodnoty pro kontrolu vzniku vírů u varianty I.



Graf 5. Vznik vírů u varianty I.

Z grafu lze vidět, že při změně průtoku nebude docházet k zániku vírů a vodní elektrárna bude ve stálém provozuschopném stavu.

4.6.3. Generátor

Pro výrobu elektrické energie se použije elektromotor 1AL90L-8, který dosahuje 690 ot/min. Protože turbína dosahuje pouze 468 ot/min, musí se tato hodnota převést. V tomto případě se musí se zajistit převod pro zrychlení otáček.

Pro zjištění převodu použijeme vzorec (4.10) a vyjde:

$$i = \frac{680}{468} = 1,45$$

Znamená to, že převodový poměr mezi turbínou a generátorem vyjde 1:1,45. V dalším kroku zvolíme průměr řemenice generátoru $D_1 = 0,4$ m a průměr řemenice turbíny D_2 dopočítáme ze vztahu (4.11):

$$D_2 = 0,4 \cdot 1,45 = 0,59 \text{ m}$$

Nyní stačí dopočítat požadovanou délku řemenu ze vztahů (4.12),(4.13) a (4.14):

$$A = \frac{0,7}{2} \cdot (0,4 + 0,59) = 0,34 \text{ m}$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{0,59 - 0,4}{2 \cdot 0,34}\right) = 0,27$$

$$L = 2 \cdot 0,34 \cdot \cos(0,27) + \frac{\pi \cdot 0,59}{2} + \frac{\pi \cdot 0,4}{2} + 2\pi \cdot 0,59 \cdot \frac{0,27}{360} - 2\pi \cdot 0,4 \cdot \frac{0,27}{360} = 2,22 \text{ m}$$

Potřebná délka klínového řemenu je 2,22m. Použijeme klínový řemen 10x2180 Li – Z 2200 Lw Rubena Profi, který této délce vyhovuje a jako řemenice využijeme PAT 1 SPZ 400 ALU a PBT 4 SPZ 580.

4.6.4. Ekonomické zhodnocení

Pokud vezmeme průměrnou roční hodnotu spotřeby domu, která vychází přibližně na 2600 kWh [43], a přepočítáme jí na výkon, tak zjistíme potřebný výkon vodní elektrárny pro pokrytí spotřeby domu.

$$P = \frac{2600 \cdot 1000}{365 \cdot 24} = 296,8 \text{ W}$$

Tento výkon se porovná s výkonem vypočteným ze vztahu (2.7), tedy s výkonem navrhnuté turbíny a poté se podle vztahu (2.9) oba výkony přepočítají na energii. Tímto zjistíme, jestli jsme vodní elektrárnou zajistili dostatečnou výrobu energie.

Ukázkový výpočet výkonu pro první měsíc:

$$P = 0,593 \cdot 0,12 \cdot 0,756 \cdot 0,98 \cdot 1000 \cdot 9,81 = 516,78 \text{ W}$$

$$E = \frac{516,78 \cdot 24 \cdot 30}{1000} = 372,1 \text{ kWh}$$

Měsíce	Průtok Q [m ³ /s]	Spád H [m]	Přepočtená účinnost turbíny η_D [-]	Účinnost převodu η_p [-]	Výkon P [W]	Vyrobená energie E [kWh]	Přebytečný výkon [W]	Přebytečná energie [kWh]
30	0,12	0,593	0,756	0,98	516,78	372,1	219,97	158,38
60	0,12	0,593	0,756	0,98	516,78	372,1	219,97	158,38
90	0,12	0,593	0,756	0,98	516,78	372,1	219,97	158,38
120	0,12	0,593	0,756	0,98	516,78	372,1	219,97	158,38
150	0,12	0,593	0,756	0,98	500,25	360,2	203,45	146,48
180	0,10	0,594	0,756	0,98	446,77	321,7	149,97	107,98
210	0,09	0,596	0,755	0,98	392,94	282,9	96,13	69,22
240	0,08	0,597	0,755	0,98	354,73	255,4	57,93	41,71
270	0,07	0,597	0,754	0,98	320,25	230,6	23,44	16,88
300	0,07	0,598	0,754	0,98	287,58	207,1	-9,22	-6,64
330	0,06	0,598	0,754	0,98	262,48	189,0	-34,33	-24,72
365	0,05	0,599	0,754	0,98	208,91	175,5	-87,90	-73,83

Tabulka 6. Výpočet výkonu a energie varianty I.

Barevné označení – nedostatečná výroba energie

Jak lze z tabulky vidět, tak v rozmezí 300-365 dne vodní elektrárna nepokryje požadovaný výkon a nevytvoří potřebnou energii. Nedostatek se tedy bude muset nakoupit od dodavatele energie. S energetickou společností ČEZ bude vyjednána sazba D02d pro případné pokrytí nedostatku energie.

Pokud se energie přepočítá dle ceny uvedené na stránkách ČEZu [45] podle vztahu (4.16), tak získáme tabulku ceny energie v navrhované elektrárně.

Měsíc	Vyrobená Energie	Využitá energie	Cena využité energie	Cena dokoupené energie
30	372,08	213,7	1393	0,00
60	372,08	213,7	1393	0,00
90	372,08	213,7	1393	0,00
120	372,08	213,7	1393	0,00
150	360,18	213,7	1393	0,00
180	321,68	213,7	1393	0,00
210	282,91	213,7	1393	0,00
240	255,41	213,7	1393	0,00
270	230,58	213,7	1393	0,00
300	207,06	207,1	1350	43
330	188,98	189,0	1232	161
365	175,48	175,5	1144	481

Tabulka 7. Cena energi varianty I.

Barevné označení – nedostatečná výroba energie

Po předchozích výpočtech lze dopočítat cenu jednotlivých částí a prací na vodní elektrárně. Cenu jsme odhadli pomocí procentuálních hodnot pro gravitační vodní elektrárnu (viz. Příloha 5). Mezi nejdražší části patří turbína, zatímco mezi nejlevnější části patří komponenty pro převod mechanické energie.

Položka	Kč
Generátor	4 000
Řemenice turbíny	5 000
Řemenice generátoru	3 500
Řemen	250
Turbína	12 500
Chytač nečistot	2 000
Buňka + Rozvaděč + Kabeláž	11 000
Nádrž	14 000
Úprava koryta	4 000
Plánování + ověření	7 000
Investiční výdaje	63 250
Cena roční údržby	900
Cena roční dodané energie	686
Roční poplatek za jistič	3 500
Roční náklady	5 086
Ušetřená cena za energii	16 266

Tabulka 8. Ceník vodní elektrárny varianty I.

Nyní vypočteme NPV pomocí excelovské funkce, přičemž využijeme diskont 0,04. Zároveň budeme počítat s tím, že cena roční údržby každý rok vzroste o 1 % a ceny energií vzrostou každý pátý rok o 10 %.

Rok	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Investiční výdaje	-63250															
Údržba		-900	-909	-918	-927	-937	-946	-955	-965	-975	-984	-994	-1004	-1014	-1024	-1035
Dodaná energie		-686	-686	-686	-686	-755	-755	-755	-755	-755	-830	-830	-830	-830	-830	-913
Poplatek za jistič		-3500	-3500	-3500	-3500	-3500	-3500	-3500	-3500	-3500	-3500	-3500	-3500	-3500	-3500	-3500
Ušetřená cena za energii		16266	16266	16266	16266	17893	17893	17893	17893	17893	19682	19682	19682	19682	19682	21650
CF	-63250	11180	11171	11162	11153	12702	12692	12683	12673	12664	14368	14358	14348	14338	14328	16203
NPV		79 428 Kč														

Tabulka 9. Výpočet NPV pro 15 let

Z tabulky lze vyčíst, že již po sedmi letech začne být investice do výroby, podle našeho předpokladu, výnosná. Po výpočtu NPV pro 15 let nám vyšla hodnota 79 428 Kč.

Nyní můžeme experimentovat a zjistit, jak se bude měnit NPV při odlišné hodnotě diskontu a při odlišné roční ceně údržby. Pomocí excelu provedeme citlivostní analýzu, kde využijeme hodnoty z předchozí tabulky.

		Diskont															
		0,5 %	1,0 %	1,5 %	2,0 %	2,5 %	3,0 %	3,5 %	4,0 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	6,0 %	6,5 %	7,0 %	7,5 %	8,0 %
Údržba	0,5 %	125190	117557	110349	103536	97094	90998	85228	79761	74580	69667	65005	60578	56374	52377	48576	44960
	1,0 %	124712	117104	109918	103127	96705	90629	84877	79428	74263	69364	64716	60303	56111	52127	48337	44732
	1,5 %	124213	116631	109469	102701	96301	90245	84511	79080	73932	69049	64416	60017	55838	51866	48089	44494
	2,0 %	123692	116137	109001	102256	95879	89844	84130	78717	73587	68721	64103	59719	55554	51595	47830	44247
	2,5 %	123147	115621	108512	101792	95438	89425	83733	78340	73227	68379	63778	59409	55259	51313	47561	43991
	3,0 %	122579	115082	108001	101308	94979	88989	83318	77946	72853	68023	63439	59086	54951	51020	47281	43724
	3,5 %	121985	114520	107468	100803	94500	88534	82886	77535	72463	67652	63086	58750	54631	50715	46990	43446
	4,0 %	121365	113933	106912	100276	94000	88060	82436	77107	72056	67265	62718	58400	54297	50397	46688	43157
	4,5 %	120718	113320	106332	99726	93478	87565	81966	76661	71632	66862	62335	58035	53950	50067	46372	42857
	5,0 %	120041	112680	105725	99151	92934	87049	81476	76196	71191	66442	61935	57655	53589	49722	46045	42544
	5,5 %	119335	112012	105093	98552	92365	86510	80965	75711	70730	66005	61519	57260	53212	49364	45703	42219
	6,0 %	118597	111313	104432	97926	91773	85948	80432	75206	70250	65549	61086	56848	52820	48991	45348	41880
	6,5 %	117826	110584	103742	97273	91154	85362	79877	74678	69749	65073	60635	56419	52412	48602	44978	41528
	7,0 %	117021	109823	103022	96592	90509	84750	79297	74128	69228	64578	60164	55971	51987	48198	44593	41162
	7,5 %	116180	109028	102270	95880	89835	84112	78692	73555	68684	64062	59674	55505	51544	47777	44193	40780
	8,0 %	115301	108197	101485	95137	89132	83446	78061	72957	68116	63523	59163	55020	51083	47338	43775	40383

Tabulka 10. Citlivostní analýza NPV varianty I.

Jako poslední ukazatel vypočítáme IRR pro 15 let pomocí funkce MÍRA.VÝNOSNOSTI v Excelu a vyjde nám, že pro nulové NPV je IRR rovno 17,6 %.

4.7. Návrh – Varianta II.

Jako druhou variantu navrhne vřovou turbínu, která bude vycházet z jednotkových hodnot modelu turbíny VT-194. Budeme postupovat obdobně jako u Varianty I.

4.7.1. Turbína

Nejdříve se zvolí měsíc pro referenční hodnoty průtoku a čistého spádu z Tabulka 1, abychom mohli provést přepočty. V tomto případě se často vybírá místo s nejvyšším průtokem. My jsme si zvolili den $t_z = 120$, kdy je průtok $Q_z = 0,12 \text{ m}^3/\text{s}$ a čistý spád $H_z = 0,593 \text{ m}$.

Poté jsme z charakteristiky turbíny VT-194 (viz. Příloha 4) pro spád modelu $H_m = 2,53 \text{ m}$ zvolili bod, při kterém model turbíny pracuje s co nejvyšší účinností. Z charakteristiky tomuto bodu odpovídá hodnota účinnosti turbíny $\eta_m = 0,85$, jednotkové otáčky $n_{11m} = 209 \text{ ot}/\text{min}$ a jednotkový průtok

$Q_{11m} = 1,88 \text{ m}^3/\text{s}$. Poslední potřebný parametr pro výpočty je průměr modelu turbíny VT-194, který je roven $D_{okm} = 0,194 \text{ m}$.

Pomocí těchto hodnot již lze vypočítat průměr oběžného kola navržené turbíny ze vztahu (4.4):

$$D_{ok} = \sqrt{\frac{0,12}{1,88 \cdot \sqrt{0,593}}} = 0,29 \text{ m}$$

A následně lze dopočítat otáčky ze vztahu (4.5):

$$n = \frac{209,03 \cdot \sqrt{0,593}}{0,29} = 558 \text{ ot/min}$$

Pro přepočet účinnosti turbíny je potřeba vypočítat jednotkové otáčky pro jednotlivé čisté spády. Tyto hodnoty se využijí k dohledání změny účinnosti z Příloha 4 a vypočítají se z upraveného vztahu (4.4):

$$n_{11} = \frac{n \cdot D_{ok}}{\sqrt{H}}$$

Ukázkový příklad výpočtu jednotkových otáček pro spád 0,6 m:

$$n_{11} = \frac{558 \cdot 0,29}{\sqrt{0,6}} = 207 \text{ ot/min}$$

Této hodnotě (viz. Příloha 4) odpovídá účinnost 0,85. Nyní tuto účinnost stačí přepočítat podle vztahu (4.6):

Ukázkový příklad přepočtu účinnosti pro spád 0,6 m:

$$\eta_D = 1 - (1 - 0,85) \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \left(\frac{0,194}{0,29} \right)^{\frac{1}{5}} \cdot \left(\frac{2,53}{0,6} \right)^{\frac{1}{10}} \right] = 0,84$$

Spád H [m]	Vypočtené Jednotkové otáčky n_{11} [ot/min]	Účinnost modelu vyčtená z grafu η [-]	Přepočtená účinnost η_D [-]
0,600	207,73	0,85	0,84
0,599	207,91	0,85	0,84
0,598	208,08	0,85	0,84
0,597	208,25	0,85	0,84
0,596	208,43	0,85	0,84
0,595	208,60	0,85	0,84
0,594	208,78	0,86	0,85
0,593	208,96	0,86	0,85
0,592	209,13	0,86	0,85

Tabulka 11. Výpočet účinnosti turbíny varianty II.

Nyní jsou dopočítány potřebné parametry, na které bude navrhnutá turbína dimenzována. Dalším krokem je potřeba zjistit, zda vznikne požadovaný vír.

4.7.2. Vznik víru

Nejdříve je potřeba dopočítat Froudeho číslo a následně kritická hloubka. Tyto hodnoty lze zjistit ze vztahů (4.7), (4.8) a (4.9):

Ukázkový výpočet pro průtok $Q = 0,12 \text{ m}^3/\text{s}$:

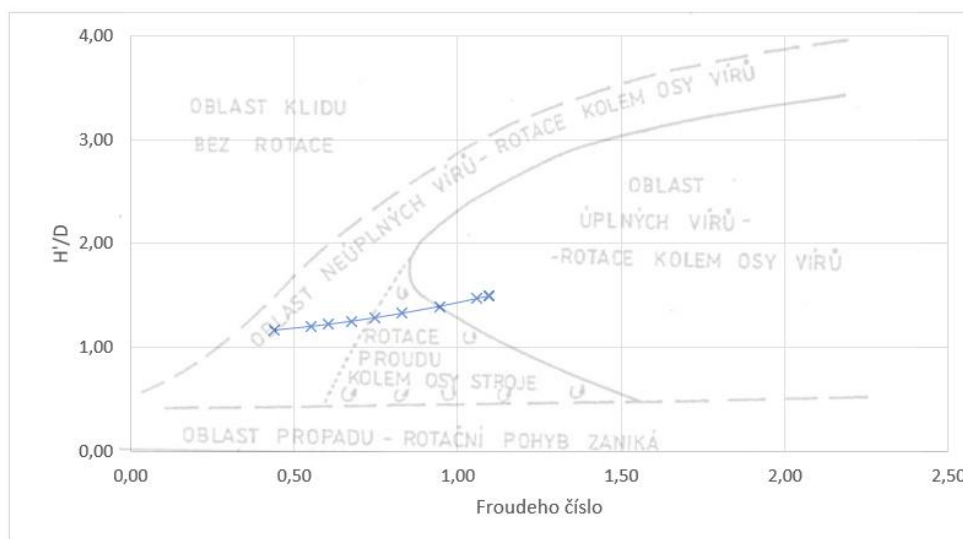
$$v = \frac{4 \cdot 0,12}{\pi \cdot 0,29^2} = 1,84 \text{ m/s}$$

$$Fr = \frac{1,84}{\sqrt{9,81 \cdot 0,29}} = 1,1$$

$$H' = (0,33 \cdot 1,1^2 + 1,1) \cdot 0,29 = 0,43 \text{ m}$$

Průtok Q [m ³ /s]	Průřezová rychlost v [m/s]	Froudeho číslo Fr [-]	Kritická hloubka ponoru H' [m]	Poměr H'/D _{ok}
0,120	1,84	1,10	0,43	1,50
0,120	1,84	1,10	0,43	1,50
0,120	1,84	1,10	0,43	1,50
0,120	1,84	1,10	0,43	1,50
0,116	1,78	1,06	0,42	1,47
0,103	1,59	0,94	0,40	1,39
0,091	1,40	0,83	0,38	1,33
0,082	1,26	0,75	0,37	1,28
0,074	1,14	0,68	0,36	1,25
0,066	1,02	0,61	0,35	1,22
0,061	0,93	0,55	0,35	1,20
0,048	0,74	0,44	0,34	1,16

Tabulka 12. Hodnoty pro kontrolu vzniku vírů u varianty II.



Graf 6. Vznik vírů turbíny u varianty II.

Z grafu lze vidět, že při změně průtoku nebude docházet k zániku vírů a vodní elektrárna bude ve stálém provozu.

4.7.3. Generátor

Pro výrobu elektrické energie se použije elektromotor 1AL90L-8, který dosahuje 690 ot/min. Protože turbína dosahuje pouze 558 ot/min, musí se tato hodnota převést. V tomto případě se musí zajistit převod pro zrychlení otáček.

Pro zjištění převodu se použije vzorec (4.10) a vyjde:

$$i = \frac{690}{558} = 1,23$$

Znamená to, že převodový poměr mezi turbínou a generátorem vyjde 1:1,23. V dalším kroku zvolíme průměr řemenice generátoru $D_1 = 0,4$ m a průměr řemenice turbíny D_2 dopočítáme ze vztahu (4.11):

$$D_2 = 0,4 \cdot 1,23 = 0,49 \text{ m}$$

Nyní stačí dopočítat požadovanou délku řemenu ze vztahů (4.12),(4.13) a (4.14):

$$A = \frac{0,7}{2} \cdot (0,4 + 0,49) = 0,31 \text{ m}$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{0,49 - 0,4}{2 \cdot 0,31}\right) = 0,15$$

$$L = 2 \cdot 0,31 \cdot \cos(0,14) + \frac{\pi \cdot 0,49}{2} + \frac{\pi \cdot 0,4}{2} + 2\pi \cdot 0,49 \cdot \frac{0,14}{360} - 2\pi \cdot 0,4 \cdot \frac{0,14}{360} = 2 \text{ m}$$

Potřebná délka klínového řemenu jsou 2 m. Použijeme klínový řemen 10x2000 Li – Z 2020 Lw Rubena Profi, který této délce vyhovuje a jako řemenice využijeme PAT 1 SPZ 400 ALU a PBT 3 SPZ 500.

4.7.4. Ekonomické zhodnocení

Pokud vezmeme průměrnou roční hodnotu spotřeby domu, která vychází přibližně na 2600 kWh [43], a přepočítáme jí na výkon, tak zjistíme potřebný výkon vodní elektrárny pro pokrytí spotřeby domu.

$$P = \frac{2600 \cdot 1000}{365 \cdot 24} = 296,8 \text{ W}$$

Tento výkon se porovná s výkonem vypočteným ze vztahu (2.7), tedy s výkonem navrhnuté turbíny a poté se podle vztahu (2.9) oba výkony přepočítají na energii. Tímto zjistíme, jestli jsme vodní elektrárnou zajistili dostatečnou výrobu energie.

Ukázkový výpočet výkonu pro první měsíc:

$$P = 0,593 \cdot 0,12 \cdot 0,848 \cdot 0,98 \cdot 1000 \cdot 9,81 = 580 \text{ W}$$

$$E = \frac{580,04 \cdot 24 \cdot 30}{1000} = 417,6 \text{ kWh}$$

Měsíce	Průtok Q [m³/s]	Spád H [m]	Přepočtená účinnost turbíny η_D [-]	Účinnost převodu η_p [-]	Výkon P [W]	Vyrobená energie E [kWh]	Přebytečný výkon [W]	Přebytečná energie [kWh]
30	0,12	0,593	0,848	0,98	580,04	417,6	283,24	203,93
60	0,12	0,593	0,848	0,98	580,04	417,6	283,24	203,93
90	0,12	0,593	0,848	0,98	580,04	417,6	283,24	203,93
120	0,12	0,593	0,848	0,98	580,04	417,6	283,24	203,93
150	0,12	0,593	0,849	0,98	561,55	404,3	264,75	190,62
180	0,10	0,594	0,848	0,98	501,39	361,0	204,58	147,30
210	0,09	0,596	0,845	0,98	439,76	316,6	142,96	102,93
240	0,08	0,597	0,844	0,98	396,50	285,5	99,70	71,78
270	0,07	0,597	0,843	0,98	357,99	257,8	61,19	44,06
300	0,07	0,598	0,843	0,98	321,48	231,5	24,68	17,77
330	0,06	0,598	0,842	0,98	293,04	211,0	-3,76	-2,71
365	0,05	0,599	0,842	0,98	233,24	195,9	-63,57	-53,40

Tabulka 13. Výpočet výkonu a energie varianty II.

Barevné označení – nedostatečná výroba energie

Jak lze z tabulky vidět, tak v rozmezí 330-365 dne vodní elektrárna nepokryje požadovaný výkon a nevytvoří potřebnou energii. Nedostatek se tedy bude muset nakoupit od dodavatele energie. S energetickou společností ČEZ bude vyjednána sazba D02d pro případné pokrytí nedostatku energie.

Pokud se energie přepočítá dle ceny uvedené na stránkách ČEZu [45] podle vztahu (4.16), tak získáme tabulku ceny energie v navrhované elektrárně.

Měsíc	Vyrobená energie	Využitá energie	Cena využité energie	Cena dokoupené energie
30	417,63	213,70	1393,32	0,00
60	417,63	213,70	1393,32	0,00
90	417,63	213,70	1393,32	0,00
120	417,63	213,70	1393,32	0,00
150	404,32	213,70	1393,32	0,00
180	361,00	213,70	1393,32	0,00
210	316,63	213,70	1393,32	0,00
240	285,48	213,70	1393,32	0,00
270	257,76	213,70	1393,32	0,00
300	231,47	213,70	1393,32	0,00
330	210,99	210,99	1375,67	17,65
365	195,92	195,92	1277,40	115,92

Tabulka 14. Cena energií varianty II.

Barevné označení – nedostatečná výroba energie

Po předchozích výpočtech lze dopočítat cenu jednotlivých částí a prací na vodní elektrárně. V této variantě jsme u některých položek využili stejné ceny, jako u předchozí varianty. U položek, které se velikostně liší od předchozí varianty jsme poměrově přepočítali cenu z varianty I. Mezi nejdražší částí patří turbína, zatímco mezi nejlevnější částí patří komponenty pro převod mechanické energie.

Položka	Kč
Generátor	4000
Řemenice turbíny	3 300
Řemenice generátoru	3 500
Řemen	200
Turbína	13 700
Chytač nečistot	2 000
Buňka + Rozvaděč + Kabeláž	11 000
Nádrž	15 100
Úprava koryta	3 700
Plánování + ověření	7 000
Investiční výdaje	63 500
Cena roční údržby	900
Cena roční dodané energie	134
Roční poplatek za jistič	3 500
Roční náklady	4 534
Ušetřená cena za energii	16 586

Tabulka 15. Ceník vodní elektrárny varianty II.

Nyní vypočteme NPV pomocí excelovské funkce, přičemž využijeme diskont 0,04. Zároveň budeme počítat s tím, že cena roční údržby každý rok vzroste o 1 % a ceny energií vzrostou každý pátý rok o 10 %.

Rok	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Investiční výdaje	-63500															
Údržba		-900	-909	-918	-927	-937	-946	-955	-965	-975	-984	-994	-1004	-1014	-1024	-1035
Dodaná energie		-134	-134	-134	-134	-147	-147	-147	-147	-147	-162	-162	-162	-162	-162	-178
Poplatek za jistič		-3500	-3500	-3500	-3500	-3500	-3500	-3500	-3500	-3500	-3500	-3500	-3500	-3500	-3500	-3500
Ušetřená cena za energii		16586	16586	16586	16586	18245	18245	18245	18245	18245	20069	20069	20069	20069	20069	22076
CF	-63500	12053	12044	12035	12025	13661	13652	13643	13633	13623	15423	15414	15404	15394	15383	17364
NPV		89 943 Kč														

Tabulka 16. Výpočet NPV pro 15 let

Z tabulky lze vyčíst, že již po šesti letech začne být investice do výroby, podle našeho předpokladu, výnosná. Po výpočtu NPV pro 15 let nám vyšla hodnota 89 943 Kč.

Nyní můžeme experimentovat a zjistit, jak se bude měnit NPV při odlišné hodnotě diskontu a při odlišné roční ceně údržby. Pomocí excelu provedeme citlivostní analýzu, kde využijeme hodnoty z předchozí tabulky.

		Diskont															
		0,5 %	1,0 %	1,5 %	2,0 %	2,5 %	3,0 %	3,5 %	4,0 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	6,0 %	6,5 %	7,0 %	7,5 %	8,0 %
Údržba	0,5 %	139070	130873	123131	115814	108894	102347	96149	90277	84712	79434	74426	69671	65153	60860	56776	52891
	1,0 %	138592	130420	122700	115405	108506	101978	95798	89943	84394	79131	74137	69396	64891	60609	56537	52663
	1,5 %	138093	129946	122251	114979	108101	101594	95432	89596	84063	78816	73837	69109	64618	60349	56289	52425
	2,0 %	137572	129452	121783	114534	107679	101193	95051	89233	83718	78488	73524	68811	64334	60078	56030	52178
	2,5 %	137028	128937	121294	114070	107239	100774	94654	88855	83359	78146	73199	68501	64038	59796	55761	51922
	3,0 %	136459	128398	120783	113586	106779	100338	94240	88462	82985	77790	72860	68178	63731	59503	55481	51655
	3,5 %	135866	127836	120251	113081	106300	99883	93808	88051	82594	77419	72507	67842	63410	59198	55190	51377
	4,0 %	135246	127249	119694	112554	105800	99409	93357	87623	82188	77032	72139	67492	63077	58880	54888	51088
	4,5 %	134598	126636	119114	112004	105278	98914	92887	87177	81764	76629	71755	67127	62730	58549	54572	50788
	5,0 %	133922	125996	118508	111429	104734	98398	92398	86712	81322	76209	71356	66748	62368	58205	54245	50475
	5,5 %	133215	125327	117875	110830	104166	97859	91887	86227	80862	75772	70940	66352	61992	57847	53903	50150
	6,0 %	132477	124629	117214	110204	103573	97297	91354	85722	80382	75316	70507	65940	61600	57474	53548	49811
	6,5 %	131706	123900	116524	109551	102955	96711	90798	85194	79881	74840	70055	65511	61192	57085	53178	49459
	7,0 %	130901	123139	115804	108869	102309	96099	90218	84644	79359	74345	69585	65064	60767	56681	52793	49093
	7,5 %	130060	122343	115052	108158	101636	95461	89613	84071	78815	73829	69094	64598	60324	56259	52393	48711
	8,0 %	129181	121513	114267	107415	100932	94795	88982	83473	78248	73290	68583	64112	59862	55821	51975	48314

Tabulka 17. Citlivostní analýza NPV varianty II.

Jako poslední ukazatel vypočítáme IRR pro 15 let pomocí funkce MÍRA.VÝNOSNOSTI v Excelu a vyjde nám, že pro nulové NPV je IRR rovno 19,1 %.

4.8. Návrh – Varianta III.

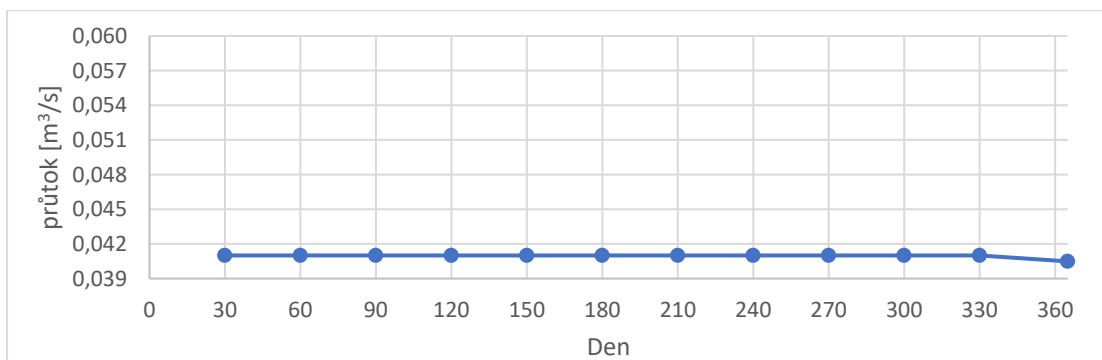
V této variantě se zaměříme na vodní elektrárnu, která bude pohánět víkendovou chatu. Na rozdíl od předchozích variant se soustředíme převážně na to, aby byla dostatečně stabilní dodávka elektrické energie. K tomu si dopomůžeme zvolením průtoku a dodatečným přidáním baterie. Správnou konfigurací zajistíme téměř konstantní výkon a v případě nežádoucí výchylky dojde k dostatečné kompenzaci z uložené energie v baterii.

Navrhujeme si dva typy a otestujeme, zda se vyplatí investovat do větších baterií na úkor výkonu anebo investovat do většího výkonu při použití menší baterie. V obou těchto testech využijeme model turbíny VT-194 z varianty II., protože oproti variantě I. dosahuje lepších výsledků. Jako první si označíme varianty jako:

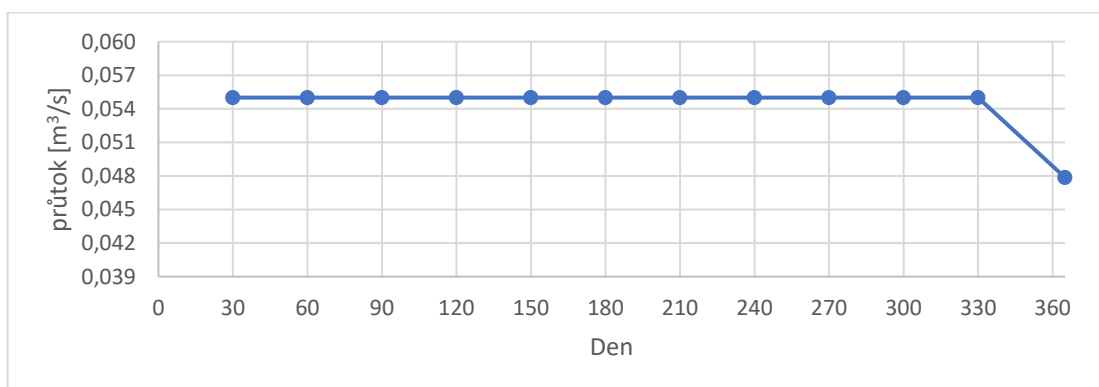
Typ A – vodní elektrárna s menším výkonem, ale s větší baterií.

Typ B – vodní elektrárna s větším výkonem, ale s menší baterií

Ani v jednom typu nebudeme potřebovat tak velký výkon jako v předchozích variantách, tudíž zregulujeme ještě více průtoky vody (viz. 4.1) na výsledné průtoky: **Typ A** - 0,041 m³/s a **Typ B** - 0,055 m³/s. Tímto dosáhneme v obou typech téměř konstantních průtoků.



Graf 7. M – denní průtoky Typu A.



Graf 8. M – denní průtoky Typu B.

Jak lze vidět z grafů, tak je v obou případech průtok téměř konstantní a bude se měnit až v rozmezí 330-365 dne. Ve výpočtech tedy budeme počítat s dvěma průtoky Q_{30-330} a $Q_{330-365}$.

Postup výpočtů bude podobný jako u předchozích variant, a proto přeskočíme ukázky výpočtů a vytvoříme pouze tabulky vypočtených hodnot.

4.8.3. Turbína

Jednotkové hodnoty pro přepočítání vycházejí ze stejného modelu VT-194, a proto budou úplně stejné.

Název	Zkratka	Hodnota	Jednotky
Jednotkový průtok	Q_{11m}	1,88	[m ³ /s]
Jednotkové otáčky	n_{11m}	209	[ot/min]
Průměr oběžného kola modelu	D_{okm}	0,19	[m]
Spád modelu	H_m	2,53	[m]
Účinnost modelu	η_m	0,86	[-]

Tabulka 18. Parametry turbíny VT-194

Pro následující výpočty budou použity referenční hodnoty ze dne $t_z = 120$.

Název	Zkratka	Hodnoty		Jednotky
		Typ A.	Typ B.	
Průtok	Q_z	0,041	0,055	[m ³ /s]
Čistý spád	H_z	0,599	0,598	[m]
Průměr oběžného kola	D_{ok}	0,17	0,19	[m]
Otáčky	n	963,91	832	[ot/min]
Jednotkové otáčky	n_{11}	209,05	209	[ot/min]
Přepočtená účinnost	η_D	0,83	0,83	[-]

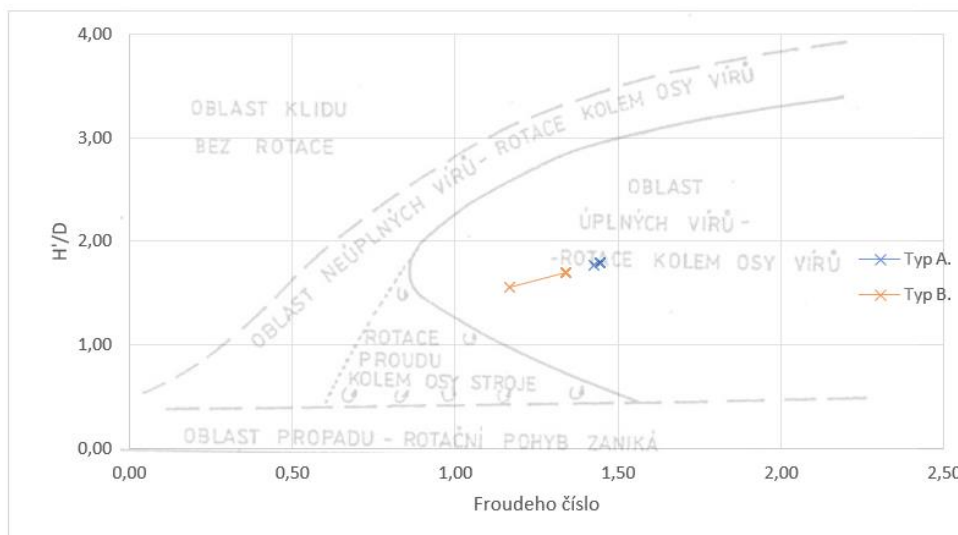
Tabulka 19. Vypočtené hodnoty parametrů turbín

4.8.4. Vznik víru

Nyní si potvrdíme, zda v navržené vodní elektrárně vznikne požadovaný vír.

Název	Zkratka	Hodnoty		Jednotky
		Typ A.	Typ B.	
Průřezová rychlost	$V_{(30-330)}$	1,85	1,85	[m/s]
	$V_{(330-365)}$	1,83	1,61	
Froudovo číslo	$Fr_{(30-330)}$	1,44	1,34	[-]
	$Fr_{(330-365)}$	1,43	1,17	
Kritická hloubka ponoru	$H'_{(30-330)}$	0,30	0,33	[m]
	$H'_{(330-365)}$	0,30	0,30	
Poměr H'/D_{ok}	$H'/D_{ok(30-330)}$	1,79	1,69	[-]
	$H'/D_{ok(330-365)}$	1,77	1,55	

Tabulka 20. Parametry potřebné pro kontrolu vzniku víru



Graf 9. Vznik vírů u varianty III.

Z grafu lze vidět, že v obou typech vznikne požadovaný vír, který dokáže pohánět turbínu.

4.8.5. Generátor

Pro výrobu elektrické energie se použije Elektromotor 0.37kW, který dosahuje 1380 ot/min. Jelikož oba typy nedosahují kýžených otáček, tak se musí zajistit zrychlení otáček. To se provede pomocí klínového převodu.

Název	Zkratka	Hodnoty		Jednotky
		Typ A.	Typ B.	
Otáčky turbíny	i_T	964	832	[-]
Otáčky generátoru	i_G	1380	1380	[m]
Převod	i	1,43	1,66	[-]
Průměr řemenice generátoru	D_1	0,40	0,40	[m]
Průměr řemenice turbíny	D_2	0,57	0,66	[m]
Vzdálenost os	A	0,34	0,37	[m]
Velikost úhlu	β	0,26	0,36	[°]
Celková délka řemenu	L	2,19	2,37	[m]

Tabulka 21. Parametry potřebné chod generátoru

4.8.6. Ekonomické zhodnocení

Pokud vezmeme průměrnou hodnotu roční spotřeby domu 2600 kWh [43] a vydělíme počtem dní v roce, tak zjistíme průměrnou denní spotřebu energie:

$$E = \frac{2600}{365} = 7,12 \text{ kWh}$$

Tato hodnota je pouze orientační. Jelikož počítáme s víkendovou chatou, a ne s rodinným domem, tak bude tato hodnota menší. Po konzultaci s vedoucím jsme se shodli na hodnotě denní spotřeby 6 kWh.

Zvolením parametru vodní elektrárny nedosáhneme denní požadované energie. Proto zde přidáme baterie, které se přes týden nabíjí a v sobotu souběžně s denní výrobou energie pokryjí požadovanou spotřebu. V neděli baterie budou jen z části nabitě, ale přesto znovu souběžně s denní výrobou energie pokryjí spotřebu.

Tímto principem zajistíme snížení požadovaného výkonu vodní elektrárny a odstraníme vchytky vzniklé náhlou změnou výkonu. Ve výpočtech budeme počítat s nejmenším výkonem vodní elektrárny, který v průběhu roku má. Tímhle ještě více zlepšíme stabilitu výroby elektrické energie.

Název	Zkratka	Hodnoty		Jednotky
		Typ A.	Typ B.	
Výkon	P ₍₃₀₋₃₃₀₎	195,5	263,5	[W]
	P ₍₃₃₀₋₃₆₅₎	193,1	229,4	
Denní vyrobená energie	E ₍₃₀₋₃₃₀₎	4,7	6,3	[kWh]
	E ₍₃₃₀₋₃₆₅₎	4,6	5,5	
Maximální velikost uložené energie v baterii	E _B	2,9	1,2	
Zbývající energie v baterii	E _{z (Pá)}	2,9	1,2	
	E _{z (So)}	1,5	0,7	
	E _{z (Ne)}	0,1	0,2	

Tabulka 22. Parametry potřebné chod generátoru

Jak lze z tabulky vidět, tak i při minimálním výkonu vždy zbude energie obsažená v bateriích.

Pokud se energie přepočítá dle ceny uvedené na stránkách ČEZu [45] podle vztahu (4.16), tak získáme tabulku ceny vyrobené energie v navrhované elektrárně.

Název	Zkratka	Hodnoty		Jednotky
		Typ A.	Typ B.	
Vyrobena energie	E ₍₃₀₋₃₃₀₎	1548	2087	[kWh]
	E ₍₃₃₀₋₃₆₅₎	162	193	
Využitá energie	E ₍₃₀₋₃₃₀₎	566		[kWh]
	E ₍₃₃₀₋₃₆₅₎	60		
Cena využitá energie	C ₍₃₀₋₃₃₀₎	3688		[Kč]
	C ₍₃₃₀₋₃₆₅₎	391		
Celková roční vyrobená energie	E_{celk}	1711	2279	[kWh]
Celková roční využitá energie	E_{celk}	626		
Celková cena roční využitá energie	C_{celk}	4080		[Kč]

Tabulka 23. Množství a cena energie

V této variantě jsme u některých položek využili stejné ceny, jako u předchozích variant. U položek, které se velikostně liší od předchozích variant jsme poměrově přepočítali cenu z varianty I. Mezi nejdražší části patří v obou typech betonová nádrž, turbína a baterie.

Název	Kč	
	Typ A.	Typ B.
Generátor	1350	1350
Řemenice turbíny	3300	3300
Řemenice generátoru	3400	3400
Řemen	200	200
Turbína	4600	6200
Chytač nečistot	1350	1350
Buňka + Rozvaděč + Kabeláž	8000	8000
Nádrž	8800	10200
Úprava koryta	2700	2700
Plánování + ověření	5000	5000
Baterie	7900	4200
Investiční výdaje	46600	45800
Roční údržba	700	690
Roční náklady	700	690
Ušetřená cena za energie	4080	4080

Tabulka 24. Ceník Typu A. a Typu B.

Nyní vypočteme NPV pomocí excelovské funkce, přičemž využijeme diskont 0,04. Zároveň budeme počítat s tím, že cena roční údržby každý rok vzroste o 1 % a ceny energií vzrostou každý pátý rok o 10 %.

Rok	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Investiční výdaje	-46600															
Údržba		-700	-707	-714	-721	-728	-736	-743	-750	-758	-766	-773	-781	-789	-797	-805
Ušetřená cena za energie		4080	4080	4080	4080	4488	4488	4488	4488	4488	4936	4936	4936	4936	4936	5430
CF	-46600	3380	3373	3366	3358	3759	3752	3745	3737	3730	4171	4163	4155	4148	4140	4625
NPV		-4 550 Kč														

Tabulka 25. Ukázka výpočtu NPV Typu A. pro 15 let

Rok	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Investiční výdaje	-45800															
Údržba		-690	-697	-704	-711	-718	-725	-732	-740	-747	-755	-762	-770	-778	-785	-793
Ušetřená cena za energie		4080	4080	4080	4080	4488	4488	4488	4488	4488	4936	4936	4936	4936	4936	5430
CF	-45800	3390	3383	3376	3369	3770	3762	3755	3748	3740	4182	4174	4167	4159	4151	4637
NPV		-3 632 Kč														

Tabulka 26. Ukázka výpočtu NPV Typu B. pro 15 let

Z tabulky lze vyčíst, že ani jedna investice do výroben nebude podle našeho předpokladu vhodná.

Stejně jako u předchozích variant můžeme experimentovat a zjistit, jak se bude měnit NPV při odlišné hodnotě diskontu a odlišné roční ceny údržby. Pomocí excelu provedeme citlivostní analýzu, kde využijeme hodnoty z předchozí tabulky.

		Diskont															
Údržba		0,5 %	1,0 %	1,5 %	2,0 %	2,5 %	3,0 %	3,5 %	4,0 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	6,0 %	6,5 %	7,0 %	7,5 %	8,0 %
	0,5 %	9025	6789	4677	2680	792	-995	-2687	-4291	-5811	-7253	-8621	-9921	-11155	-12329	-13446	-14509
	1,0 %	8653	6436	4342	2363	490	-1282	-2960	-4550	-6058	-7488	-8845	-10135	-11359	-12524	-13632	-14686
	1,5 %	8265	6068	3993	2031	175	-1581	-3245	-4821	-6315	-7733	-9079	-10357	-11572	-12727	-13825	-14871
	2,0 %	7860	5684	3629	1685	-153	-1893	-3541	-5103	-6584	-7989	-9322	-10589	-11793	-12937	-14026	-15063
	2,5 %	7436	5283	3248	1324	-496	-2218	-3850	-5397	-6863	-8255	-9575	-10830	-12023	-13157	-14235	-15263
	3,0 %	6994	4864	2851	948	-853	-2558	-4172	-5703	-7154	-8532	-9839	-11081	-12262	-13385	-14453	-15470
	3,5 %	6532	4427	2437	555	-1226	-2911	-4508	-6022	-7458	-8820	-10114	-11343	-12511	-13622	-14679	-15686
	4,0 %	6050	3970	2004	145	-1615	-3280	-4859	-6355	-7774	-9121	-10400	-11615	-12770	-13869	-14915	-15911
	4,5 %	5547	3493	1553	-283	-2020	-3665	-5224	-6702	-8104	-9434	-10698	-11899	-13040	-14126	-15160	-16144
	5,0 %	5020	2995	1081	-730	-2444	-4067	-5605	-7064	-8447	-9761	-11008	-12194	-13322	-14394	-15415	-16388
	5,5 %	4471	2476	589	-1196	-2885	-4486	-6003	-7441	-8806	-10101	-11332	-12502	-13614	-14673	-15681	-16641
	6,0 %	3897	1933	75	-1682	-3347	-4923	-6417	-7834	-9179	-10456	-11669	-12822	-13919	-14963	-15957	-16904
	6,5 %	3297	1366	-461	-2190	-3828	-5379	-6849	-8244	-9568	-10826	-12020	-13156	-14237	-15265	-16244	-17178
	7,0 %	2671	773	-1022	-2721	-4330	-5855	-7300	-8672	-9974	-11211	-12386	-13504	-14567	-15580	-16544	-17463
	7,5 %	2017	155	-1607	-3274	-4854	-6351	-7771	-9118	-10397	-11612	-12768	-13866	-14912	-15907	-16856	-17759
	8,0 %	1333	-491	-2217	-3852	-5401	-6869	-8261	-9583	-10838	-12031	-13165	-14244	-15271	-16248	-17180	-18068

Tabulka 27. Citlivostní analýza NPV Typu A.

		Diskont															
Údržba		0,5 %	1,0 %	1,5 %	2,0 %	2,5 %	3,0 %	3,5 %	4,0 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	6,0 %	6,5 %	7,0 %	7,5 %	8,0 %
	0,5 %	9974	7733	5615	3613	1720	-72	-1769	-3376	-4900	-6346	-7718	-9021	-10259	-11436	-12555	-13621
	1,0 %	9608	7385	5285	3300	1422	-355	-2037	-3632	-5144	-6578	-7939	-9231	-10460	-11627	-12738	-13796
	1,5 %	9225	7022	4941	2973	1112	-650	-2318	-3899	-5397	-6819	-8169	-9451	-10669	-11827	-12929	-13978
	2,0 %	8825	6643	4582	2632	788	-957	-2610	-4177	-5662	-7071	-8409	-9679	-10887	-12035	-13127	-14167
	2,5 %	8408	6248	4207	2277	451	-1278	-2915	-4466	-5937	-7333	-8658	-9917	-11113	-12251	-13333	-14364
	3,0 %	7972	5835	3815	1905	99	-1612	-3232	-4768	-6224	-7606	-8918	-10165	-11349	-12476	-13548	-14568
	3,5 %	7517	5404	3407	1518	-269	-1961	-3564	-5083	-6524	-7891	-9189	-10422	-11595	-12710	-13771	-14781
	4,0 %	7042	4954	2980	1114	-652	-2325	-3909	-5411	-6835	-8187	-9471	-10691	-11850	-12953	-14003	-15003
	4,5 %	6545	4484	2535	692	-1052	-2704	-4269	-5753	-7160	-8496	-9765	-10970	-12117	-13207	-14245	-15233
	5,0 %	6027	3993	2071	252	-1470	-3100	-4645	-6109	-7499	-8818	-10071	-11262	-12394	-13471	-14496	-15473
	5,5 %	5485	3481	1585	-208	-1905	-3513	-5036	-6481	-7852	-9154	-10390	-11565	-12682	-13746	-14758	-15722
	6,0 %	4919	2945	1079	-687	-2359	-3943	-5445	-6869	-8220	-9503	-10722	-11881	-12983	-14032	-15030	-15982
	6,5 %	4328	2387	550	-1188	-2834	-4393	-5871	-7273	-8604	-9867	-11068	-12210	-13296	-14329	-15314	-16252
	7,0 %	3711	1803	-2	-1711	-3329	-4862	-6315	-7695	-9004	-10247	-11429	-12553	-13622	-14639	-15609	-16533
	7,5 %	3066	1193	-579	-2256	-3845	-5351	-6779	-8134	-9421	-10643	-11805	-12910	-13961	-14962	-15916	-16825
	8,0 %	2392	556	-1181	-2826	-4384	-5862	-7263	-8593	-9856	-11056	-12197	-13282	-14315	-15299	-16236	-17129

Tabulka 28. Citlivostní analýza NPV Typu B.

Jako poslední ukazatel vypočítáme IRR pro 15 let pomocí funkce v excelu. Pro Typ A. nám vyšel 2,6 % a pro typ B. nám vyšel 2,9 %.

4.9. Souhrnné informace

Nyní si pro přehlednost sestavíme souhrnnou tabulku všech důležitých hodnot z navržených variant.

Název	Jednotky	Varianta I.	Varianta II.	Varianta III.	
				Typ A.	Typ B.
Nejvyšší hodnota průtoku	[m ³ /s]	0,12	0,12	0,04	0,06
Nejvyšší hodnota čistého spádu	[m]	0,60	0,60	0,60	0,60
Maximální účinnost turbíny	[%]	76 %	85 %	83 %	83 %
Průměr oběžného kola	[m]	0,27	0,29	0,17	0,19
Otáčky oběžného kola	[ot/min]	468	559	964	832
Vznik víru	[-]	ANO	ANO	ANO	ANO
Roční množství vyrobené energie	[kWh]	3511	3934	1711	2279
Průměrná hodnota výkonu	[W]	403	452	195	261
Roční využití množství energie	[kWh]	2495	2544	626	626
Celková roční ušetřená cena za energii	[Kč]	16266	16586	4080	4080
Celkové množství roční dokoupené energie	[kWh]	686	134	-	-
Velikost baterie	[kWh]	-	-	2,9	1,2
Zbývající energie v bateriích na konci víkendu	[kWh]	-	-	0,1	0,2
Investiční výdaje	[Kč]	63250	63500	46600	45800
Roční náklady	[Kč]	5086	4534	700	690
NPV	[Kč]	79428	89943	-4550	-3632
IRR	[%]	17,6 %	19,1 %	2,6 %	2,9 %

Tabulka 29. Souhrnné výsledky navržených variant

5. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnutí malých vodních elektráren ve vybrané lokalitě. Nejdříve došlo k postupnému obeznámení s teorií spojenou s vodními elektrárnami, při kterém bylo zjištěno, že přestože je v České republice již kompletně vypotřebován prostor pro velké elektrárny, nachází se zde stále obrovský potenciál pro malé vodní elektrárny. Problém těchto malých elektráren je však spojen s legislativou týkající se výstavby či rekonstrukce.

Po dostatečném obeznámení s problematikou se dalo přejít k navržení tří variant malých vodních elektráren schopných pracovat s malým průtokem a s malým spádem. K tomuto účelu posloužily vírové turbíny, které v těchto lokalitách dle dat dokázaly efektivně pracovat.

Prvně byly navrženy dvě varianty, vycházející z dvou odlišných typů vírových turbín. V důsledku této skutečnosti došlo k potřebným úpravám a postupnému dimenzování pro správný chod. Výsledně došlo ke vzniku dvou odlišných malých vodních elektráren.

První varianta vyšla levněji za použití méně účinné turbíny. V důsledku použití méně účinné turbíny bylo potřeba dokoupit větší množství energie než u varianty druhé. V rámci investičních výdajů by byla zvolena tato levnější varianta. Na základě financí ukazatelů by však byla zvolena varianta druhá, jenž dosahovala lepších hodnot a na základě našich odhadů by se investice do této varianty vyplatila více, což je převážně způsobeno menšími ročními náklady. Vzhledem k vyššímu výkonu turbíny v druhé variantě je v případě potřeby možností vyrobit větší množství energie pro pokrytí neočekávané spotřeby.

V poslední variantě došlo k zaměření se na stabilní dodávku elektrické energie za pomoci vodní elektrárny a baterií pro zajištění energetické spotřeby víkendové chaty. Tato varianta byla rozdělena na dva typy a testována, zda se vyplatí v rámci stability dodávky elektrické energie typ s méně výkonnou vodní elektrárnou a s většími bateriemi, anebo typ s více výkonnou vodní elektrárnou s menšími bateriemi.

Pro návrh byly použity jednotkové hodnoty z účinnější druhé varianty. Následnými postupnými úpravami a výpočty došlo k návrhu dvou odlišných typů malých vodních elektráren, které svým provozem připomínají off-grid elektrárny ukládající energii do baterií. Energie je následně s přetrvávající výrobou energie použita k pokrytí požadované víkendové spotřeby.

Na základě ekonomického zhodnocení by došlo k investování do typu s menšími bateriemi a s více výkonnou elektrárnou. Investiční výdaje by byly menší a odhady pomocí finančních ukazatelů vyšly lépe než u typu s většími bateriemi a méně výkonnou elektrárnou. To je způsobeno tím, že baterie jsou v současné době velmi drahé, technologicky nedostatečně pokročilé a mají špatný poměr cena/výkon.

Jak lze vidět, tak finanční ukazatele vyšly v obou případech záporně, tudíž by se investice do těchto elektráren nedoporučovala. Pokud by však někdo potřeboval zdroj elektrické energie pro chatu bez připojení k síti, tak by se mu v tomto případě vyplatil typ s menšími bateriemi.

Na základě dat bylo zjištěno, že při použití menší baterie zbude na konci víkendu více uložené energie než při použití baterií větších. Varianta s menšími bateriemi dosáhla lepšího potenciálu pokrýt náhlé změny spotřeby energie a působila stabilněji.

V průběhu zpracování bakalářské práce jsme se setkali s nedostatečným množstvím informací týkající se relativně nové technologie vírových turbín, a tak musely být některé hodnoty převzaty z jiných podobných typů turbín.

6. Zdroje

- [1] Zákon o životním prostředí. In: . Česko: Parlament České republiky, 1992, ročník 92, 4/1992, číslo 17. Dostupné také z: <https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=17&r=1992>
- [2] Zákon o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů. In: Sbírka zákonů. Česko: Parlament České republiky, 2012, ročník 12, 59/2012, číslo 165, § 2, odrážka a):. Dostupné také z: <https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=165&r=2012>
- [3] Obnovitelné zdroje energie. Ministerstvo životního prostředí [online]. Česko: MZP, 2010 [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/obnovitelne_zdroje_energie
- [4] MÁSTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. Obnovitelné zdroje elektrické energie. In: Obnovitelné zdroje elektrické energie [online]. Česko: EUROPRINT, a.s, 2011, s. 16-20 [cit. 2021-12-28]. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/cvut-2-oze.pdf>
- [5] PVK. Hlavní evropské povodí. Vodní strážci [online]. Česko, 2020 [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: <https://vodnistrazci.cz/voda-v-prirode/hlavni-evropske-rozvodí>
- [6] Rozhovor. Naše voda [online]. ZAT, 2019 [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: https://www.nase-voda.cz/rozhovor-cr-pry-zacnou-vnikat-dalsi-male-vodni-elektrarny/?doing_wp_cron=1614716910.4220159053802490234375
- [7] BEDNÁŘ, Josef. Male vodní elektrárny 2 - Turbíny. Praha 1: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1989. Str.14.
- [8] MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze. ISBN 978-80-01-04937-2. Str. 131
- [9] MELICHAR, J., J. BLÁHA a J. VOJTEK. Hydroenergetický potenciál vodního toku. Malé vodní turbíny: konstrukce a provoz. Praha: České vysoké učení technické, 1998, s. 21. ISBN 80-01-01808-0.
- [10] BEDNÁŘ, Josef. Male vodní elektrárny 2 - Turbíny. Praha 1: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1989. Str.80.
- [11] BARTŮNĚK, Lukáš. Potenciál návratnosti malé vodní elektrárny na řece Dyji [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/17305278.pdf>. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce Karel Sokanský.
- [12] BEDNÁŘ, Josef. Male vodní elektrárny 2 - Turbíny. Praha 1: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1989. Str.23.
- [13] O vodní energetice. Skupina ČEZ [online]. [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/informace-o-vodni-energetice>
- [14] Vodní elektrárny: - princip, rozdělení, elektrárny v ČR [online]. David Vobořil, 2016 [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje-energie/vodni-elektrarny-princip-a-rozdeleni>
- [15] BEDNÁŘ, Josef. Male vodní elektrárny 2 - Turbíny. Praha 1: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1989. Str.58-59.
- [16] Vodní elektrárny: - princip, rozdělení, elektrárny v ČR [online]. David Vobořil, 2016 [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje-energie/vodni-elektrarny-princip-a-rozdeleni>
- [17] Malá voda. Malá voda [online]. 2014 [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: http://www.malavoda.cz/jak_zacit_spad.htm
- [18] MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze. ISBN 978-80-01-04937-2. Str. 131
- [19] BEDNÁŘ, Josef. Male vodní elektrárny 2 - Turbíny. Praha 1: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1989. Str.42-43.
- [20] Abeceda malých vodních pohonů [online]. [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/index.htm>
- [21] BEDNÁŘ, Josef. Male vodní elektrárny 2 - Turbíny. Praha 1: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1989. Str.40.
- [22] BEDNÁŘ, Josef. Male vodní elektrárny 2 - Turbíny. Praha 1: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1989. Str.52.
- [23] E-learningový portál SPŠ, SOŠ a SOU, Hradec Králové. [online]. 2013 [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://vyuka.hradebni.cz/mod/resource/view.php?id=12297>
- [24] Z O T L Ö T E R E R. [online]. [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <http://www.zotloeterer.com/welcome/gravitation-water-vortex-power-plants/zotloeterer-turbine/>

- [25] MÁSTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. In: *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online]. Česko: EUROPRINT, a.s, 2011, s. 146 [cit. 2021-12-28]. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/cvut-2-oze.pdf>
- [26] SVOBODA, Zbyněk. *Nevyužitý potenciál v ČR a energetické využití vodních zdymadel*. Praha, 2020. Diplomová práce. ČVUT. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Vít Klein.
- [27] MELICHAR, J., J. BLÁHA a J. VOJTEK. *Hydroenergetický potenciál vodního toku. Malé vodní turbíny: konstrukce a provoz*. Praha: České vysoké učení technické, 1998, s. 18-19. ISBN 80-01-01808-0.
- [28] *Vodní elektrárny v České republice: Kolik vyrobí elektřiny? Nazeleno.cz* [online]. 2010 [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/energie/vodni-energie/vodni-elektrarny-v-ceske-republice-kolik-vyrobi-elekriny.aspx>
- [29] NOVÁČEK, Zdeněk. *Asociace hydroenergetiků ČR: Postup při výstavbě MVE* [online]. 2012 [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: <https://www.ahecr.cz/legislativa/postup-pri-vystavbe-mve>
- [30] TRÁVNÍČEK, Stanislav. *Energetický regulační VĚSTNÍK* [online]. 2021, , 1 [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/7274234/ERV08_2021.pdf/321b0dcb-3183-46c6-b75c-1ac16c536c26
- [31] *Zákon o dani z přidané hodnoty*. In: . *Parlament České republiky, 2004, ročník 04, 78/2004, číslo 235*. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2004-235>
- [32] *Zákon o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů*. In: . *Parlament České republiky, 2012, ročník 12, 59/2012, číslo 165*. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-165>
- [33] *Vyhláška o Pravidlech trhu s elektřinou*. In: . 2015, ročník 15, 169/2015, číslo 408. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2015-408>
- [34] *HYDROKOLOGICKÝ INFORMAČNÍ SYSTÉM VÚV TGM* [online]. [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: https://heis.vuv.cz/data/webmap/isapi.dll?map=mp_heis_voda&TMPL=HVMAP_MAIN&IFRAME=0&lon=15.4871695&lat=49.7692482&scale=1935360
- [35] *Český hydrometeorologický ústav* [online]. [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/>
- [36] NISHI, Yasuyuki a Terumi INAGAKI. *Performance and Flow Field of a Gravitation Vortex Type Water Turbine* [online]. 2016 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/ijrm/2017/2610508/>
- [37] BEDNÁŘ, Josef. *Malé vodní elektrárny 2 - Turbíny*. Praha 1: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1989. Str.124.
- [38] MELICHAR, J., J. BLÁHA a J. VOJTEK. *Hydroenergetický potenciál vodního toku. Malé vodní turbíny: konstrukce a provoz*. Praha: České vysoké učení technické, 1998, s. 86. ISBN 80-01-01808-0.
- [39] J., ŠULC. *Experimentální výzkum tvorby vírů před vybranými vtoky hydraulických děl. Výzkumná zpráva. VVÚ VSH – VUT v Brně, 1987*.
- [40] M., JAJDLÍK. *Podmienky vzniku vírov vo vtokových objektoch*. 1981 Vydání:Bratislava.1981. 256 s.
- [41] *Vliv vzájemného provozu vtoků na jejich energetickou účinnost a tvorbu hladinových vírů*. Brno, 2018. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
- [42] PALÁT, Hynek. *Řemenové převody* [online]. [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablon/SPS_III/VY_32_INOVACE_C-08-02.pdf
- [43] *Lama Energy* [online]. [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://www.lamaenergy.cz/podpora/zajimavosti/jaka-je-prumerna-spotreba-elekriny-u-rodinneho-domu-2/>
- [44] *Justfreetools* [online]. [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://www.justfreetools.com/cs/prevest-watt-na-kwh>
- [45] *ČEZ* [online]. [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/elektrina/cez-prodej-sro>
- [46] *Ekonomické hodnocení: Energetický audit budov* [online]. In: KABRHEL, Michal. [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: http://tzb.fsv.cvut.cz/vyucujici/16/ea/ekonomie-a-ekologie_17_tisk.pdf
- [47] BEDNÁŘ, Josef. *Malé vodní elektrárny 2 - Turbíny*. Praha 1: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1989. Str.105.
- [48] STROUHAL, Jiří. *DU.cz: Doba návratnosti investice* [online]. 2016 [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/loziska/cvekonomika/5_teorie.html
- [49] *Český statistický úřad* [online]. [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/mira_inflace
- [50] *Peníze.cz: Největší web o financích* [online]. [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: <https://www.penize.cz/dan-z-prijmu>
- [51] *Hodnocení investic pomocí čisté současné hodnoty (Net Present Value)*. Cashbot [online]. 2022, 24.2.2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://cashbot.cz/blog/hodnoceni-investic-pomoci-ciste-soucasne-hodnoty-net-present-value/>

Seznam grafů

<i>Graf 1. Průměrná hodnota denního průtoku za rok 2022</i>	13
<i>Graf 2. Odtoková křivka za rok 2022</i>	14
<i>Graf 3. Upravená odtoková křivka za rok 2022</i>	14
<i>Graf 4. Proudění na hladině v kašně vertikálních turbín [39]</i>	18
<i>Graf 5. Vznik vírů u varianty I.</i>	24
<i>Graf 6. Vznik vírů turbíny u varianty II.</i>	29
<i>Graf 7. M – denní průtoky Typu A.</i>	33
<i>Graf 8. M – denní průtoky Typu B.</i>	33
<i>Graf 9. Vznik vírů u varianty III.</i>	34

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1. Průměrné hodnoty čas. intervalu zkonstruované na základně odtokové křivky</i>	15
<i>Tabulka 2. Zvolené parametry vodní elektrárny</i>	15
<i>Tabulka 3. Vypočtené hodnoty čistého spádu</i>	16
<i>Tabulka 4. Výpočet účinnosti turbíny varianty I.</i>	23
<i>Tabulka 5. Hodnoty pro kontrolu vzniku vírů u varianty I.</i>	24
<i>Tabulka 6. Výpočet výkonu a energie varianty I.</i>	25
<i>Tabulka 7. Cena energie varianty I.</i>	26
<i>Tabulka 8. Ceník vodní elektrárny varianty I.</i>	26
<i>Tabulka 9. Výpočet NPV pro 15 let</i>	26
<i>Tabulka 10. Citlivostní analýza NPV varianty I.</i>	27
<i>Tabulka 11. Výpočet účinnosti turbíny varianty II.</i>	28
<i>Tabulka 12. Hodnoty pro kontrolu vzniku vírů u varianty II.</i>	29
<i>Tabulka 13. Výpočet výkonu a energie varianty II.</i>	30
<i>Tabulka 14. Cena energie varianty II.</i>	31
<i>Tabulka 15. Ceník vodní elektrárny varianty II.</i>	31
<i>Tabulka 16. Výpočet NPV pro 15 let</i>	31
<i>Tabulka 17. Citlivostní analýza NPV varianty II.</i>	32
<i>Tabulka 18. Parametry turbíny VT-194</i>	33
<i>Tabulka 19. Vypočtené hodnoty parametrů turbín</i>	33
<i>Tabulka 20. Parametry potřebné pro kontrolu vzniku víru</i>	34
<i>Tabulka 21. Parametry potřebné chodu generátoru</i>	34
<i>Tabulka 22. Parametry potřebné chodu generátoru</i>	35
<i>Tabulka 23. Množství a cena energie</i>	35
<i>Tabulka 24. Ceník Typu A. a Typu B.</i>	36
<i>Tabulka 25. Ukázka výpočtu NPV Typu A. pro 15 let</i>	36
<i>Tabulka 26. Ukázka výpočtu NPV Typu B. pro 15 let</i>	36
<i>Tabulka 27. Citlivostní analýza NPV Typu A.</i>	37
<i>Tabulka 28. Citlivostní analýza NPV Typu B.</i>	37
<i>Tabulka 29. Souhrnné výsledky navržených variant</i>	38

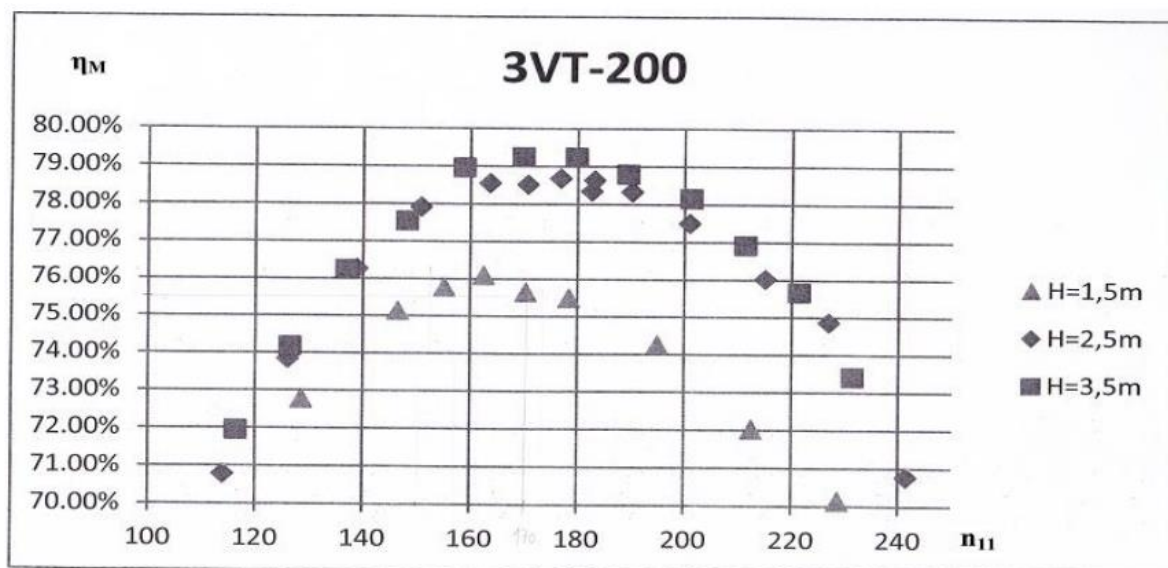
Seznam příloh

Příloha 1. Zvolená lokalita blatného potoku	44
Příloha 2. Závislost účinnosti na jednotkových otáčkách 3VT - 200	44
Příloha 3. Závislost jednotkového průtoku na jednotkových otáčkách 3VT - 200	45
Příloha 4. Charakteristika turbíny VT-194	45
Příloha 5. Procentuální cena jednotlivých částí vodní elektrárny	46
Příloha 6. Grafické znázornění výpočtu délky řemene	46
Příloha 7. Tabulka cen jednotlivých elektráren.....	47
Příloha 8. Tabulka cen jednotlivých elektráren.....	48

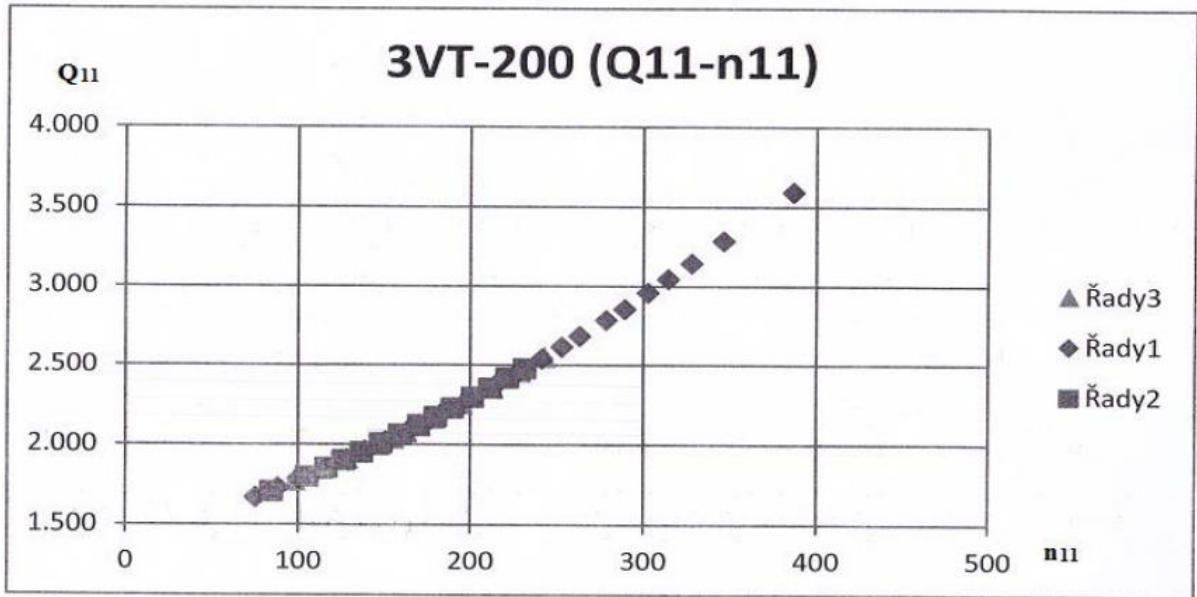
Přílohy



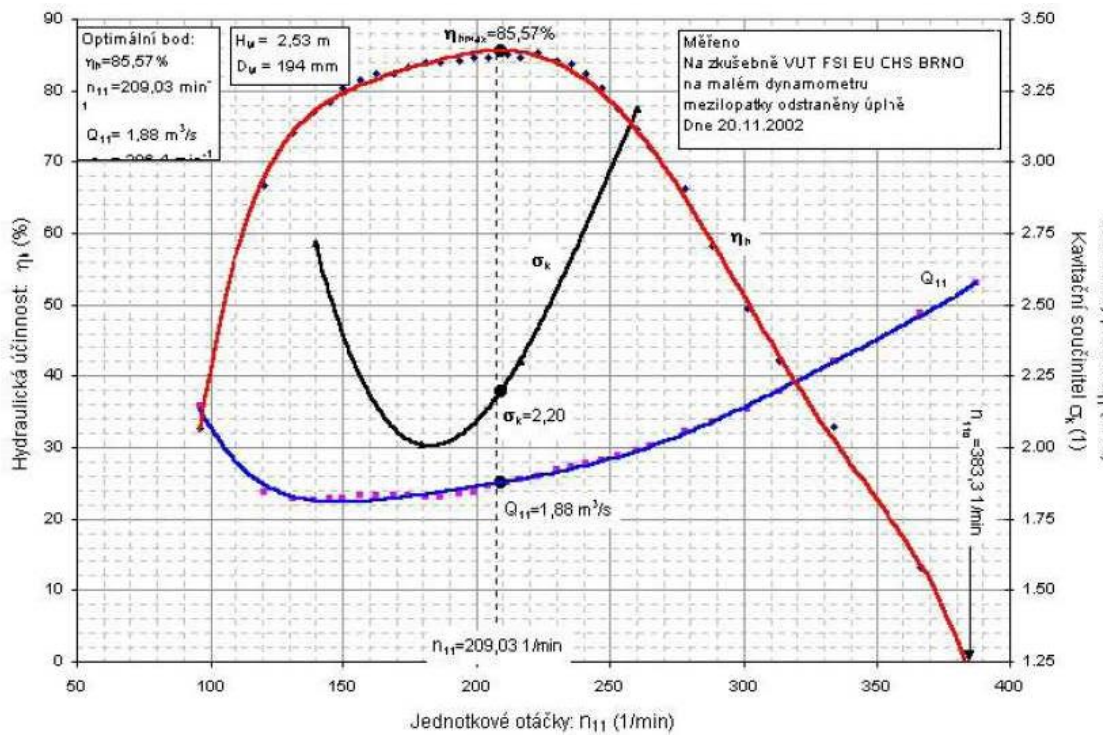
Příloha 1. Zvolená lokalita blatného potoku



Příloha 2. Závislost účinnosti na jednotkových otáčkách 3VT - 200



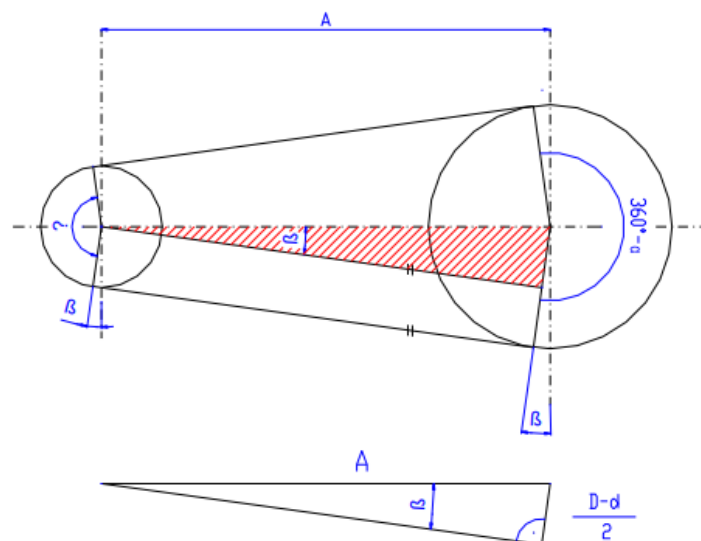
Příloha 3. Závislost jednotkového průtoku na jednotkových otáčkách 3VT - 200



Příloha 4. Charakteristika turbíny VT-194

10kW - Gravitation Water Vortex Power Plant	
planning and authorization	15%
turbine house	
generator house	
rotation tank	30%
turbine	10%
supporting structure	10%
gear	5%
generator	4%
inflow gate	4%
weir gate	4%
coarse screen	4%
fine screen	
screen cleaning system	
control box	9%
feeder (100m cable)	5%
fish ladder	
total investment	100%
annual service	1,5% of total investment

Příloha 5. Procentuální cena jednotlivých částí vodní elektrárny



Příloha 6. Grafické znázornění výpočtu délky řemene

Technology	First available year ^a	Size (MW)	Lead time (years)	Base overnight cost ^b (2021\$/kW)	Technological optimism factor ^c	Total overnight cost ^{d,e} (2021\$/kW)	Variable O&M ^f (2021 \$/MWh)	Fixed O&M (2021\$/kW-y)	Heat rate (Btu)
Ultra-supercritical coal (USC)	2025	650	4	\$4,074	1.00	\$4,074	\$4.71	\$42.49	
USC with 30% carbon capture and sequestration (CCS)	2025	650	4	\$5,045	1.01	\$5,096	\$7.41	\$56.84	
USC with 90% CCS	2025	650	4	\$6,495	1.02	\$6,625	\$11.49	\$62.34	1
Combined-cycle—single-shaft	2024	418	3	\$1,201	1.00	\$1,201	\$2.67	\$14.76	
Combined-cycle—multi-shaft	2024	1,083	3	\$1,062	1.00	\$1,062	\$1.96	\$12.77	
Combined-cycle with 90% CCS	2024	377	3	\$2,736	1.04	\$2,845	\$6.11	\$28.89	
Internal combustion engine	2023	21	2	\$2,018	1.00	\$2,018	\$5.96	\$36.81	
Combustion turbine— aeroderivative ^h	2023	105	2	\$1,294	1.00	\$1,294	\$4.92	\$17.06	
Combustion turbine—industrial frame	2023	237	2	\$785	1.00	\$785	\$4.71	\$7.33	
Fuel cells	2024	10	3	\$6,639	1.09	\$7,224	\$0.62	\$32.23	
Nuclear—light water reactor	2027	2,156	6	\$6,695	1.05	\$7,030	\$2.48	\$127.35	1
Nuclear—small modular reactor	2028	600	6	\$6,861	1.10	\$7,547	\$3.14	\$99.46	1
Distributed generation—base	2024	2	3	\$1,731	1.00	\$1,731	\$9.01	\$20.27	
Distributed generation—peak	2023	1	2	\$2,079	1.00	\$2,079	\$9.01	\$20.27	
Battery storage	2022	50	1	\$1,316	1.00	\$1,316	\$0.00	\$25.96	
Biomass	2025	50	4	\$4,524	1.00	\$4,525	\$5.06	\$131.62	1
Geothermal ^{l,j}	2025	50	4	\$3,076	1.00	\$3,076	\$1.21	\$143.22	
Conventional hydropower ^l	2025	100	4	\$3,083	1.00	\$3,083	\$1.46	\$43.78	
Wind ^e	2024	200	3	\$1,718	1.00	\$1,718	\$0.00	\$27.57	
Wind offshore ^l	2025	400	4	\$4,833	1.25	\$6,041	\$0.00	\$115.16	
Solar thermal ^l	2024	115	3	\$7,895	1.00	\$7,895	\$0.00	\$89.39	
Solar photovoltaic (PV) with tracking ^{e, i, k}	2023	150	2	\$1,327	1.00	\$1,327	\$0.00	\$15.97	
Solar PV with storage ^{i, k}	2023	150	2	\$1,748	1.00	\$1,748	\$0.00	\$33.67	

Source: We primarily base input costs on a report provided by external consultants: Sargent & Lundy, December 2019. We most recently updated hydropower site cost for non-powered dams for AEO2018 using data from Oak Ridge National Lab

Note: MW=megawatt, kW=kilowatt, MWh=megawatthour, kW-y=kilowatt-year, kWh=kilowatthour; Btu=British thermal unit

^a The first year that a new unit could become operational.

^b Base cost includes project contingency costs.

^c We apply the technological optimism factor to the first four units of a new, unproven design; it reflects the demonstrated tendency to underestimate actual costs of a-kind unit.

^d Overnight capital cost includes contingency factors and excludes regional multipliers (except as noted for wind and solar PV) and learning effects. Interest charges are excluded. The capital costs represent current costs for plants that would come online in 2022.

^e Total overnight cost for wind and solar PV technologies in the table are the average input value across all 25 electricity market regions, as weighted by the respective capacity of that type installed during 2020 in each region to account for the substantial regional variation in wind and solar costs (Table 4). The input value used for wind in AEO2022 was \$1,411 per kilowatt (kW), and for solar PV with tracking, it was \$1,323/kW, which represents the cost of building a plant excluding regional factors. Region-specific factors contributing to the substantial regional variation in cost include differences in typical project size across regions, accessibility of resources, an variation in labor and other construction costs throughout the country.

^f O&M = Operations and maintenance.

^g The nuclear average heat rate is the weighted average tested heat rate for nuclear units as reported on the Form EIA-860, *Annual Electric Generator Report*. No heat rate is reported for battery storage because it is not a primary conversion technology; conversion losses are accounted for when the electricity is first generated; electricity storage losses are accounted for through the additional demand for electricity required to meet load. For hydropower, wind, solar, and geothermal technologies, no heat rate is reported because the power is generated without fuel combustion, and no set British thermal unit conversion factors exist. The module calculates the [average rate for fossil-fuel generation](#) in each year to report primary energy consumption displaced for these resources.

^h Combustion turbine aeroderivative units can be built by the module before 2023, if necessary, to meet a region's reserve margin.

ⁱ Capital costs are shown before investment tax credits are applied.

^j Because geothermal and hydropower cost and performance characteristics are specific for each site, the table entries show the cost of the least expensive plant that can be built in the Northwest region for hydro and the Great Basin region for geothermal, where most of the proposed sites are located.

^k Costs and capacities are expressed in terms of net AC (alternating current) power available to the grid for the installed capacity.

Příloha 7. Tabulka cen jednotlivých elektráren

ř./sl.	Podporovaný druh energie	Datum uvedení výroby do provozu		Jednotarifní pásmo provozování		Dvoutarifní pásmo provozování	
		od	do	Výkupní ceny [Kč/MWh]	Zelené bonusy [Kč/MWh]	Zelené bonusy [Kč/MWh]	
						VT*	NT**
a	b	c	j	k	n	o	
100	Malá vodní elektrárna ve stávajících lokalitách	-	31.12.2004	2 330	1 135	1 305	1 041
101		1.1.2005	31.12.2013	2 986	1 791	2 059	1 642
102		1.1.2014	31.12.2014	2 927	1 732	-	-
103		1.1.2015	31.12.2015	2 870	1 675	-	-
104		1.1.2016	31.12.2016	2 814	1 619	-	-
105		1.1.2017	31.12.2017	2 444	1 249	-	-
106		1.1.2018	31.12.2018	2 396	1 201	-	-
107		1.1.2019	31.12.2019	2 349	1 154	-	-
108		1.1.2020	31.12.2020	2 303	1 108	-	-
109		1.1.2021	31.12.2021	2 258	1 063	-	-
110	Rekonstruovaná malá vodní elektrárna	-	31.12.2013	2 986	1 791	2 059	1 642
111		1.1.2014	31.12.2014	2 927	1 732	-	-
112		1.1.2015	31.12.2015	2 870	1 675	-	-
113		1.1.2016	31.12.2016	2 814	1 619	-	-
114		1.1.2017	31.12.2017	2 444	1 249	-	-
115		1.1.2018	31.12.2018	2 396	1 201	-	-
116		1.1.2019	31.12.2019	2 349	1 154	-	-
117		1.1.2020	31.12.2020	2 303	1 108	-	-
118		1.1.2021	31.12.2021	2 258	1 063	-	-
120	Malá vodní elektrárna v nových lokalitách	1.1.2006	31.12.2007	3 318	2 123	2 442	1 947
121		1.1.2008	31.12.2009	3 512	2 317	-	-
122		1.1.2010	31.12.2010	3 816	2 621	-	-
123		1.1.2011	31.12.2011	3 731	2 536	-	-
124		1.1.2012	31.12.2012	3 888	2 693	-	-
125		1.1.2013	31.12.2013	3 861	2 666	-	-
126		1.1.2014	31.12.2014	3 785	2 590	-	-
127		1.1.2015	31.12.2015	3 711	2 516	-	-
128		1.1.2016	31.12.2016	3 456	2 261	-	-
129		1.1.2017	31.12.2017	3 026	1 831	-	-
130		1.1.2018	31.12.2018	2 967	1 772	-	-
131		1.1.2019	31.12.2019	2 909	1 714	-	-
132		1.1.2020	31.12.2020	2 852	1 657	-	-
133		1.1.2021	31.12.2021	2 796	1 601	-	-

*VT je pásmo platnosti vysokého tarifu stanovené provozovatelem distribuční soustavy.

**NT je pásmo platnosti nízkého tarifu platné v době mimo pásmo platnosti VT.

Příloha 8. Tabulka cen podpor jednotlivých vodních elektráren