

## **Bakalářská práce**

# **Výroba modelu malé vodní turbíny**

*Studijní program:*

B0715A270008 Strojírenství

*Autor práce:*

**Štěpán Bystřinec**

*Vedoucí práce:*

Ing. Petr Novotný, CSc.

Katedra energetických zařízení

Liberec 2023



## Zadání bakalářské práce

### Výroba modelu malé vodní turbíny

*Jméno a příjmení:*

**Štěpán Bystřinec**

*Osobní číslo:*

S19000017

*Studijní program:*

B0715A270008 Strojírenství

*Zadávající katedra:*

Katedra energetických zařízení

*Akademický rok:*

2021/2022

#### **Zásady pro vypracování:**

- 1) Všeobecný přehled využití vodní energie v regionu
- 2) Konstrukční návrh malé vodní turbíny podle zvolených parametrů
- 3) Realizace tiskem na tiskárně 3D.
- 4) Změření základních parametrů vodní turbíny v laboratoři.

*Rozsah grafických prací:* dle potřeby  
*Rozsah pracovní zprávy:* 30 stran  
*Forma zpracování práce:* tištěná/elektronická  
*Jazyk práce:* Čeština

### **Seznam odborné literatury:**

- [1] Fleischner, P., Nechleba, M.: Hydromechanika lopatkových stroj. Skripta VUT v Brně, 1976.
- [2] Nechleba, M.: Vodní turbíny, jejich konstrukce a příslušenství. SNTL Praha, 1962.
- [3] Nechleba, M., Druckmüller, M.: Vodní turbíny I. Skripta VUT Brno, 1990.
- [4] Holata, M.: Malé vodní elektrárny. Academia Praha, 2002.
- [5] CENK, Miroslav, et al. OBNOVITELNÉ ZDROJE ENERGIE. 2. upr. vyd. Praha: FCC PUBLIC, 2001. 208 s. ISBN 80-901985-8-9.
- [6] GABRIEL, Pavel, ČIHÁK, František, KALANDRA, Petr.: MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. 321 s. ISBN 80-01-01812-1.
- [7] MELICHAR, Jan, VOJTEK, Jan, BLÁHA, Jaroslav. MALÉ VODNÍ TURBÍNY: Konstrukce a provoz. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. 299 s. ISBN 80-01-01808-0.
- [8] MOTLÍK, Jan, et al. OBNOVITELNÉ ZDROJE ENERGIE A MOŽNOSTI JEJICH UPLATNĚNÍ V ČESKÉ REPUBLICE. Praha: ČEZ, a. s., 2003. 145 s.
- [9] Jan Kuchař: ANALÝZA NESROVNALOSTÍ MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY BENEŠ. Dostupné 28.6.2022 na: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/6508/final-thesis.pdf?sequence=8&isAllowed=y>

*Vedoucí práce:* Ing. Petr Novotný, CSc.  
Katedra energetických zařízení

*Datum zadání práce:* 1. listopadu 2021  
*Předpokládaný termín odevzdání:* 30. dubna 2023

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
děkan

doc. Ing. Petra Dančová, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2021

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá tvorbou modelu malé vodní turbíny pomocí 3D tisku dle zvolených parametrů, následným zprovozněním v laboratoři katedry energetických zařízení Technické univerzity v Liberci a měřením některých parametrů modelu. Dále shrnuje využití vodní energie v oblasti Liberecka a Jizerských hor.

**Klíčová slova:** turbína, malá vodní turbína, malá vodní elektrárna, hydroenergetika, vodní motor, 3D tisk

## **Annotation**

This bachelor thesis deals with the creation of a model of a small water turbine using 3D printing according to selected parameters, subsequent commissioning in the laboratory of the Department of Power Engineering Equipment of the Technical University of Liberec and measurement of some parameters of the model. It also summarizes the use of hydropower in the area of Liberec and the Jizera Mountains.

**Keywords:** turbine, small water powerplant, hydropower, water engine, 3D printing

## **Poděkování**

Touto cestou bych rád upřímně poděkoval Ing. Petru Novotnému, CSc. za odborné vedení mé bakalářské práce, cenné rady připomínky a také za vstřícný a přátelský přístup. Dále bych rád poděkoval zaměstnancům katedry energetických zařízení za pomoc s realizací modelu malé vodní turbíny a za jejich vstřícné jednání. Také bych rád poděkoval kolegům a nadřízeným ze společnosti Ško-energo za neustálou možnost profesního zdokonalování a rady při výrobě modelu malé vodní turbíny. Dále bych rád poděkoval rodině a přátelům za podporu a pomoc při studiu.

# Obsah

Seznam symbolů a zkratk	8
Úvod	9
1. Využití vodní energie	10
1.1. Vodní motory	10
1.2. Nejvyužívanější typy turbín	11
1.2.1. Peltonova turbína	13
1.2.2. Francisova turbína	14
1.2.3. Dériazova turbína	15
1.2.4. Kaplanova turbína	15
1.3. Turbíny a vodní motory s významem pro MVE	16
1.3.1. Bánkiho turbína	16
1.3.2. Šroubový vodní motor (Archimédův šroub)	16
1.4. Důležité komponenty soustrojí vodních turbín	18
1.4.1. Potrubí	18
1.4.2. Sací trouba	20
1.4.3. Generátor	20
1.5. Vodní elektrárny a malé vodní elektrárny	22
1.5.1. Význam MVE pro Českou republiku	23
1.6. Hydroenergetika v regionu Liberecka a Jizerských hor	24
2. Návrh modelu malé vodní turbíny	26
2.1. Návrh rotoru a hřídele	27
2.2. Návrh skříně	28
2.3. Výpočet základních parametrů modelu	29
3. Postup výroby modelu malé vodní turbíny	33
3.1. 3D tisk základních komponentů	33
4. Měření výkonu modelu malé vodní turbíny	36
Postup měření	37
4.1. Výsledky měření	38
4.1.1. Výsledky měření pro šesti lopatkový rotor	38
4.1.2. Výsledky měření pro osmi lopatkový motor	39
Závěr	40

## Seznam symbolů a zkratk

### Seznam symbolů

A	[m <sup>2</sup> ]	plocha průřezu
a, b, c	[m]	rozměry rozváděcího kanálu
d	[m]	průměr přívaděče
g	[m/s <sup>2</sup> ]	gravitační zrychlení
h	[m]	spád
I	[A]	indukovaný proud
L	[m]	charakteristický rozměr
P <sub>t</sub>	[W]	teoretický výkon
P <sub>s</sub>	[W]	skutečný výkon
p	[Pa]	tlak
Q	[m <sup>3</sup> /s]	objemový průtok
t	[°C]	teplota
v	[m/s]	rychlost proudění
U	[V]	indukované napětí
Re	[1]	reynoldsovo číslo

### Řecká abeceda

ρ	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota
η	[%]	účinnost
ν	[m <sup>2</sup> /s]	kinematická viskozita

### Seznam zkratk

MVE	malá vodní elektrárna
BR	bernoulliho rovnice
RK	rovnice kontinuity



## Úvod

S ohledem na stále větší potřebu snížení dopadu na životní prostředí stojí energetika před nelehkou výzvou, jak vyrobit co nejvíce energie s co nejmenším zatížením životního prostředí. V současné době je kladen důraz na dekarbonizaci výroby nejen energie, ale i veškerého průmyslu. Na jedné straně je kladen důraz na dostavbu dalších bloků jaderných elektráren a případné budování malých modulárních reaktorů, jako náhrady za odstavované uhelné provozy, na straně druhé z hlediska vyváženého energetického mixu je stále větší poptávka po obnovitelných zdrojích, jakou jsou například větrné a solární elektrárny, ale také elektrárny vodní, o kterých tato práce z velké části pojednává.

Jedna z možností co největšího využití vodní energie je stavba malých vodních elektráren (MVE). Je tedy kladen důraz na využívání stále menších vodních zdrojů pro výrobu elektrické energie. Tento důraz otevírá dveře implementaci nových technologií pro realizaci malých vodních turbín, jakožto doplňkových zdrojů výroby elektrické energie. Jednou z technologií pro výrobu malých vodních turbín je 3D tisk.

Druhá část práce se zabývá návrhem, výrobou, zprovozněním a měřením některých parametrů malé vodní turbíny. Snahou tvorby modelu není vytvořit převratný vodní motor, ale ukázat možnost výroby malého zdroje využívajícího vodní energii například k dobíjení baterie, pomocí 3D tisku.

# 1. Využití vodní energie

## 1.1. Vodní motory

Vodními motory můžeme nazvat stroje, u kterých je využito energie vodních toků, zde se dostává voda z poloh s vyšší energií do poloh s nižší energií. Při tomto procesu se potenciální energie mění na energii kinetickou, kterou lze využívat na hřídeli vodního motoru. Pomocí tzv. koloběhu vody, kdy se voda z moře, tedy z místa s nejnižší potenciální energií, dostává působením slunečního tepla zpět do míst s vyšší potenciální energií. [1] Díky tomuto procesu lze využití vodních motorů a v dnešní době zejména vodních turbín zařadit mezi obnovitelné zdroje energie.

Za jedny z prvních vodních motorů lze historicky považovat vodní kola, jež jsou převážně poháněna vahou vody. Dále bylo využíváno pístových vodních motorů, u kterých byl pomocí klikové mechanismu převáděn přímočarý vratný pohyb, způsobený hydrostatickým tlakem, na pohyb rotační, tento typ vodních motorů dnes není využíván. [1]

V dnešní době byli oba druhy vodních motorů nahrazeny vodními turbínami. Vodní turbína je stroj, který využívá pohybovou energii vody. Voda je nejdříve přiváděna pevnými rozváděcími kanály, kde se mění buď z části nebo celá tlaková energie na energii kinetickou. Dále voda proudí do kanálů oběžných, které jsou zakřiveny opačně oproti kanálům rozváděcím. [1] Vodní turbíny patří mezi takzvaně hydrodynamické stroje, jež využívají setrvačný účinek, kterým kapalina působí na stěny průtokových kanálů. Již zmíněný setrvačný účinek se dostaví při změně pohybového stavu (změně hybnosti) kapaliny. Změna pohybového stavu kapaliny je způsobena vnějšími silovými účinky průtokových kanálů, na něž reaguje kapalina setrvačným účinkem závislým na hmotnosti a zrychlení. Náhlé změny hybnosti nemají příznivý vliv na účinnost a kavitační vlastnosti turbíny, proto jsou průtokové kanály turbín navrhovány s ohledem na plynulou změnu hybnosti kapaliny. [2]

Dochází-li v rozváděcích kanálech ke změně celé tlakové energie na energii pohybovou a vytéká-li voda z kanálu s nulovým přetlakem, nemění se ani tlak vody při průtoku oběžnými kanály. Je tedy tlak před a za oběžným kolem stejný. Tento typ turbín je nazýván jako turbíny rovnotlaké. [1]

Pokud v rozváděcích kanálech dochází pouze ke změně části tlakové energie na energii kinetickou, má voda ještě hydrostatický tlak. Zbývající část tlakové energie se mění v oběžných kanálech na energii kinetickou, směrem k výtoku z kanálu hydrostatický tlak ubývá. Voda tedy oběžnými kanály proudí pod přetlakem, z tohoto důvodu je tento typ turbín nazýván jako turbíny přetlakové [1]



*Obr. 1 Oběžné kolo Francisovi turbíny v areálu vodní elektrárny Štěchovice [vlastní]*

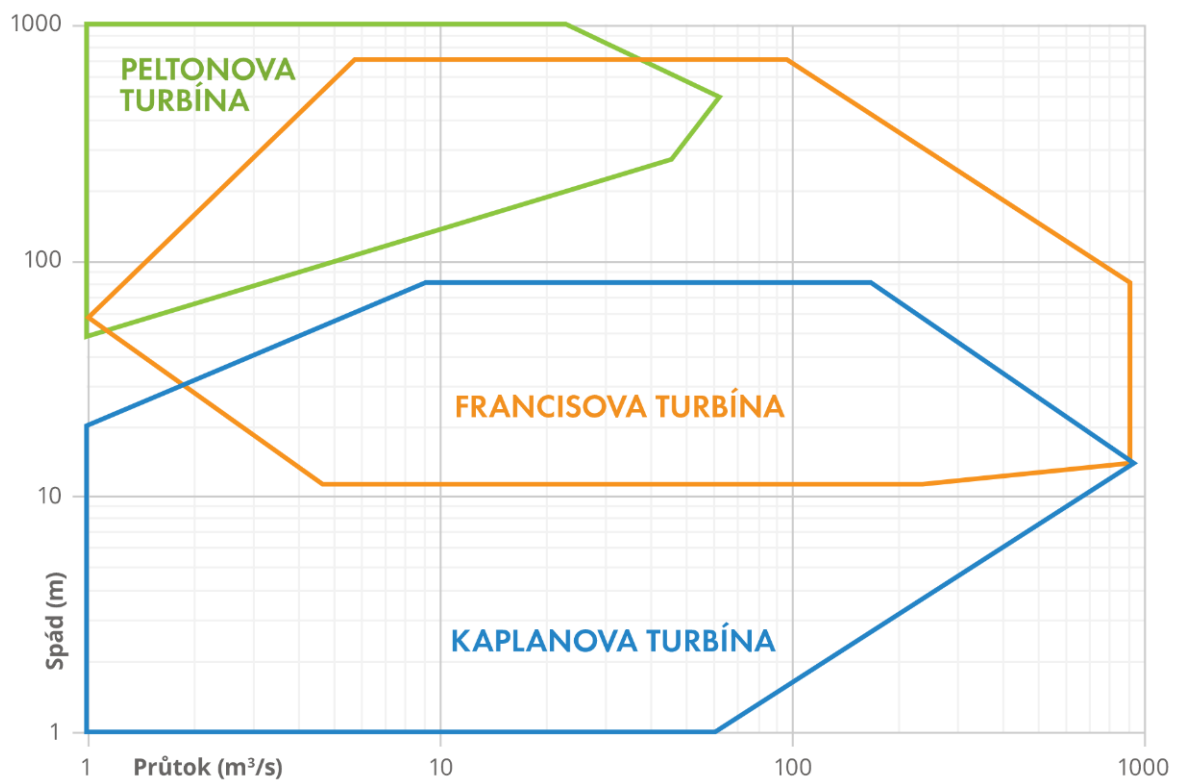
## **1.2. Nejvyužívanější typy turbín**

Mezi nejpoužívanější typy vodních turbín lze zařadit turbínu Peltonovu, Kaplanovu a Francisovu. Tyto tři turbíny nejčastěji naleznou použití nejen ve velkých vodních elektrárnách, ale i v MVE.

Pro volbu určitého typu turbíny jsou důležité dva základní parametry, a to spád a průtok, jež jsou dány přírodními podmínkami. V přírodě se nachází málo lokalit, v nichž by byl spád soustředěn přirozeně, z tohoto důvodu je v mnoha případech nutné spád soustředit uměle stavbou vhodného vzdouvacího zařízení jako je přehrada, nebo jez. [2]

Spád je rozdíl hladiny v horní nádrži, nebo zdrži a hladiny v odpadu nacházející se pod elektrárnou, udávaný v metrech. Provozovatel vodního díla smí využít tzv. hrubý spád, nebo také spád celkový, který je dán výškovým rozdílem hladin pod a nad vodním dílem. [2]

Průtokem je množství vody protékající profilem vodního toku za jednotku času. Průtok vodním tokem není shodný s průtokem turbínou, z důvodu zajištění asanačního průtoku korytem a podobně, je vždy průtok turbínou menší. Údaje o množství vody protékajícím daným vodním tokem poskytuje hydrometeorologický ústav. [2]



**Obr. 2** Graf použitelnosti nejpoužívanějších vodních turbín dle spádu a průtoku [3]

### 1.2.1. Peltonova turbína

Pro oblast nejvyšších spádů je využívána Peltonova turbína. [4] Jedná se o turbínu rovnotlakou s tangenciálním neboli tečným ostřikem lopatek. Voda je k oběžnému kolu přiváděna jednou až šesti dýzami, které tvoří rozváděcí ústrojí a ze kterých voda vystupuje ve formě paprsku kruhového průřezu. Oběžné kolo je tvořeno dvojitými lopatkami korečkového tvaru, které nelze regulovat z důvodu uložení na pevno. Regulace výkonu je prováděna změnou průtoku dýzou, za pomoci přímočarého pohybu regulační jehly, která otevírá a zavírá dýzu. K rychlému odstavení v případě poruchy, nebo v případě odpojení celého soustrojí ze sítě, slouží deflektor, jenž odkloní proud vody vycházející z přiváděcího kanálu. Uložení celého soustrojí bývá horizontální v případě použití jedné až dvou dýz, jeli použito dvou a více dýz je soustrojí uloženo ve vertikální poloze osy rotace oběžného kola. [2] Výkon lze také stupňovat uložením oběžných kol paralelně na oba konce hřídele generátoru v tomto případě je vhodnější horizontální uložení soustrojí. [4]

Lopatky Peltonovy turbíny lze na disk rotoru uložit jednotlivě, případně lze za použití současné slévárenské technologie odlít oběžné lopatky v celku. [4]



**Obr. 3** Oběžné kolo Peltonovy turbíny [3]

### 1.2.2. Francisova turbína

Pro středotlaké soustrojí velkých výkonů je využívána turbína Francisova. Maximální spády využívané tímto typem turbín jsou přibližně 750 m, pro vyšší spády je využito turbín Peltonových. [4]

Francisovu turbínu lze zařadit mezi přetlakové turbíny. Celé soustrojí je opatřeno radiálně axiálním oběžným kolem s pevnými lopatkami, rozvaděčem s natáčivými rozváděcími lopatkami ovládanými ovládacím mechanismem. Nejčastěji je turbína opatřena sací troubou a spirálou, která slouží k urychlení proudu vody. Méně časté je uložení kašnové, případně kotlové, které bylo používáno pro menší spády. Francisovu turbínu lze také použít jako čerpadlovou turbínu pro přečerpávací vodní elektrárny. [2]

#### Čerpadlové turbíny

Čerpadlové turbíny jsou využívány jako doplněk pro vyrovnání špičkové spotřeby elektrické energie. Během odběrové špičky je hydrocentrála v provozu turbínovém, kde dochází k odběru vody z horní nádrže. Během menšího odběru z elektrické sítě se hydrocentrála dostává do čerpadlového provozu, kde akumuluje vodu zpět v horní nádrž pro další použití při vyrovnání odběrové špičky. Přečerpávací hydrocentrály používají čtyřstrojové, třístrojové, nebo dvoustrojové jednotky. Čtyřstrojové jednotky, jež jsou složené z motoru, čerpadla a turbíny, generátoru, jsou z důvodu zvýšených strojních a stavebních investic méně používané. Třístrojové a dvoustrojové provedení vzájemně kombinuje funkce čerpadla a turbíny, proto je častěji použito pro většinu přečerpávacích hydrocentrál. [4]



*Obr. 3 Oběžné kolo Francisovy turbíny [3]*



### 1.2.3. Dériazova turbína

Jedná o přechod mezi turbínou Francisovou a Kaplanovou. Diagonální, radiálně axiální turbína, tvořená oběžným kolem s natáčivými lopatkami bez vnějšího věnce umístěnými na kuželovém náboji kola. Úhel os čepů lopatek a osy oběžného kola se pohybuje v rozmezí 30° až 60°. Rozváděcí lopatky jsou ovládány vlastním regulačním mechanismem, změna natočení lopatek rozváděče probíhá současně se změnou natočení oběžných lopatek. Běžně je turbína uložena vertikálně s použitím spirály a sací trouby. Dériazovu turbínu lze také použít jako čerpadlovou turbínu. [2]

### 1.2.4. Kaplanova turbína

Pro nízkotlaké turbíny malých i velkých výkonu je často používána Kaplanova turbína. [4] Jedná se o axiální přetlakovou turbínu jejíž oběžné kolo je tvořeno lopatkami upevněnými v natáčivých nábojích, jež jsou ovládané regulačním mechanismem, nacházejícím se uvnitř náboje oběžného kola. Lopatky rozváděče mohou být řešeny radiálně, diagonálně, nebo axiálně a jsou také natáčivé a ovládané vlastním regulačním mechanismem. Nastavení natočení jak rozváděčích, tak oběžných lopatek probíhá současně tzv. synchronní regulace. Ve většině případů je Kaplanova turbína uložena vertikálně a soustrojí využívá spirály a sací trouby, pro soustrojí o menších výkonech je použito uložení horizontální případně mírně šikmou osou oběžného kola. Horizontální uložení nevyužívá spirály, avšak sací trouba použita je. [2]

„Varianty řešení kaplanovy jsou turbíny:

- axiální neregulovatelná; oběžné i rozváděcí lopatky jsou pevné
- propelerová; oběžné lopatky jsou pevné, případně představitelné po demontáži za klidu, rozváděcí lopatky jsou natáčivé
- Thomannova; oběžné lopatky jsou natáčivé, rozváděcí pevné.“ [2]

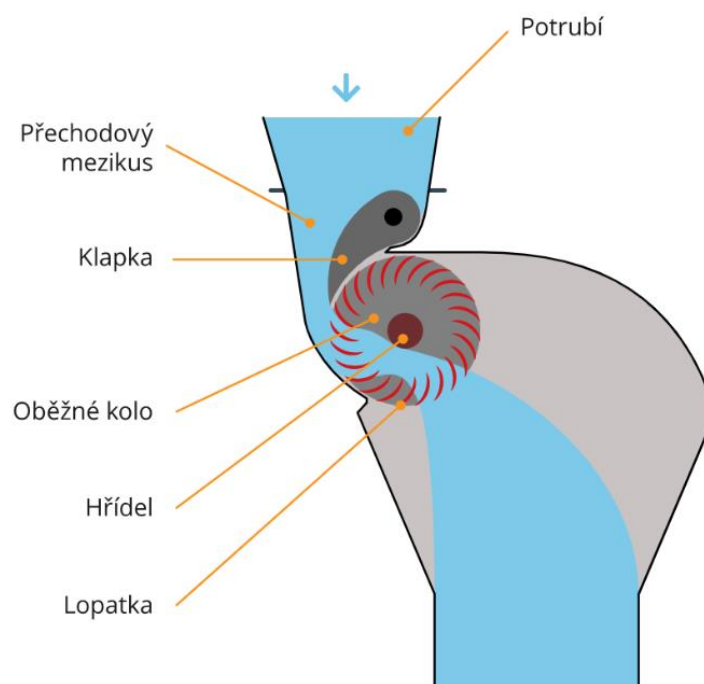


*Obr. 4 Oběžné kolo Kaplanovy turbíny [3]*

## 1.3. Turbíny a vodní motory s významem pro MVE

### 1.3.1. Bánkiho turbína

Pro nízkotlaké aplikace malých výkonů je často využíváno Bánkiho turbíny. [4] Jedná se o rovnotlakou turbínu s dvojnásobným průtokem vody oběžným kolem. Oběžné kolo stoje je tvořeno dvěma paralelně usazenými kotouči a kruhově prohnutými lopatkami, jež jsou nejčastěji navařeny mezi kotouče. Voda do oběžného kola vstupuje dostředivě, zatímco při výstupu opouští oběžné kolo odstředivě. Turbína je z pravidla uspořádána horizontálně a její regulace se provádí pomocí klapky umístěné na vtoku. Turbínu lze opatřit odpadní šachtou případně sací troubou, avšak v sací troubě proudí dvoufázová směs vody a vzduchu na rozdíl od turbín přetlakových. [2]



**Obr. 5** Schéma Bánkiho turbíny [3]

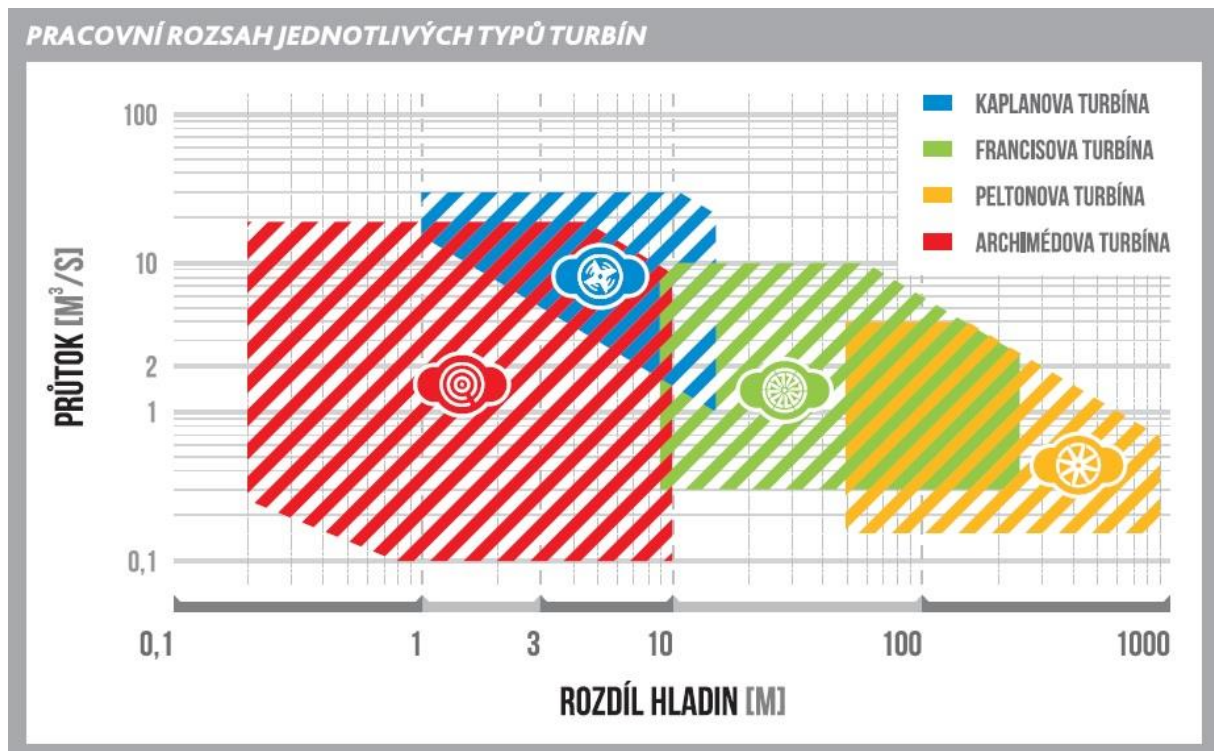
### 1.3.2. Šroubový vodní motor (Archimédův šroub)

Šroubový vodní motor, nebo také Archimédův šroub, lze uplatnit pro oblast nejnižších spádů, lze je považovat za efektivní náhradu vodních kol. Z ekologického i technického hlediska je Archimédův šroub ideálním řešením pro MVE, například nepoškozuje ryby při průchodu celým soustrojím, z hlediska technického je jeho výhodou nízká náročnost na údržbu, velká životnost a také dobrá účinnost přibližně 80 %, dále je málo náchylná na změnu průtoku. Archimédův šroub jako motor lze vyrábět do vnějšího průmětu čtyř metrů a průtoku až 5,5 m<sup>3</sup>/s. [4]





*Obr. 6 Archimédův vodní motor [5]*



*Obr. 7 Pracovní rozsah běžně používaných typů turbín [5]*

## 1.4. Důležité komponenty soustrojí vodních turbín

### 1.4.1. Potrubí

Potrubí, jež přivádí vodu k turbíně, může být vyrobeno dle tlaku, jemuž je vystaveno, nejčastěji z litiny, ocelového plechu, případně z betonu. Velikost potrubí je dána průtočnou plochou, jež je podílem průtoku a rychlosti proudění, dále tloušťkou stěny a délkou. Potrubí je jednou z výrazných investičních položek při stavbě vodní elektrárny a má vliv na rentabilitu celého díla. Potrubí lze ukládat mnoha způsoby, lze vést potrubí nezasypané volně na betonových základech, v otevřeném výkopu, případně zasypané v zemi. Zakotvení je provedeno pevně do základu, na jedné straně v nátokové části na straně druhé u samotné elektrárny. Zakotvené jsou také ohyby a při větších vzdálenostech se kotví i rovné části do tzv. bloků, jež zachytávají axiální síly působící na potrubí, mezi jednotlivé bloky potrubí je nutné vložit dilatační kus, který umožňuje změnu délky potrubí vlivem teploty, tato změna je u nezasypaného potrubí značná, u zcela zasypaného potrubí není třeba dilatací. Mezi jednotlivými bloky je potrubí podepíráno jednotlivými betonovými stoličkami, jež zachytávají zatížení kolmé k ose potrubí. Stoličky mohou být opatřeny oplechování, případně válečky, které se používají pro velké průměry. Potrubí je složeno z jednotlivých trub různých délek v závislosti na použitém materiálu. Spojení jednotlivých trub je provedeno několika způsoby, například pro ocelové potrubí je často použito svařování, případně přírubový spoj, historicky bylo využito i spojů nýtovaných. Potrubí jen nutné chránit proti korozi ochranným nátěrem. [1]



*Obr. 8 Ocelové tlakové potrubí přečerpávací vodní elektrárny Štěchovice [3]*

### **Vodní ráz**

Vodní ráz je děj, který vzniká při zavírání průtoku. Dochází ke zvýšení tlaku v potrubí, čímž proudí kapalina určitou rychlostí. Rychlost částic vody před uzavěrem klesá a kinetická energie je měněna na energii tlakovou. Snížení rychlosti a průtoku a zvýšení tlaku nenastává v celém potrubí najednou, ale postupně se šíří jako tlaková vlna od uzavírací armatury po vtok. Zvýšení tlaku nemůže nastat u vtoku, tlak u vtoku je dán pouze výškou hladiny nádrže, také se za potrubím nenacházejí částice, které by měly kinetickou energii. Vlivem úbytku vznikajícího zvýšení tlaku směrem k nádrži dochází k zpětnému pohybu částic směrem do potrubí. Směr pohybu částic u uzavěru je ale stále původní, takže tlak roste stále dokud není dostižen podtlakovou vlnou šířící se od vtoku. Dále začíná voda postupně od vtoku proudit opačným směrem, dokud podtlaková vlna nedosáhne uzavěru, poté částice dostávají rychlost, nýbrž opačným směrem. Díky změně tlaku v energii kinetickou dochází v oblasti uzavěru ke snížení tlaku, jenž postupuje směrem k nádrži, tedy stejným směrem, kterým postupovalo dříve zvýšení tlaku. Celý děj se opakuje. Po ukončení uzavírání dochází ke vzniku kmitavého pohybu kapaliny v potrubí, k útlumu kmitání dochází postupně pomocí tření. [1]

### **Česlice**

Na vstupu vody do potrubí jsou umístěny česlice, nejdříve hrubé česlice, které mají zabránit vniknutí velkých objektů například klád ledových ker a podobně, vzdálenost hrubých česlic je poměrně velká v rozmezí 100 až 300 mm. Jemné česlice jsou umístěny těsně před vstupem vody do potrubí případně před vstupem do spirálové kašny, zabraňují vniknutí nečistot, jež by mohli ucpat průtočné kanály turbíny. Vzdálenost jemných česlic musí být menší než nejmenší mezera průtočných kanálů turbíny. Například u malých Francisových turbín je mezera přibližně 25 mm, pro velké Kaplanovy turbíny může být mezera jemných česlic až 100 mm. Česlice by neměli sahát nad hladinu vody, ale končit pod vodnou na stěně, z důvodu ochrany před zamrznutím. Čistění jemných česlic je prováděno automatickými čistícími stroji. [1]



**Obr. 9** Hrubé česle vodní elektrárny Štěchovice [3]



### 1.4.2. Sací trouba

Sací trouba je významnou součástí vodních turbín, nejčastěji je používána u turbín přetlakových, avšak i u turbín rovnotlakých, například u Bánkiho turbíny, má své opodstatnění. [2] Díky sací troubě lze uložit přetlakovou turbínu nezávisle na spodní hladině vody, tedy jen po mez ohrožení vzniku kavitace. Uložení sací trouby může být provedeno jak horizontálně, tak vertikálně. Při některých provozních stavech turbíny vzniká v prostoru za oběžným kolem víření, jenž může mít za následek pulzaci tlaku a způsobit nebezpečné vibrace celého soustrojí. [4] Sací trouby je využíváno za prvé z důvodu zvětšení hrubého spádu a za druhé částečné využití kinetické měrné energie vody opouštějící oběžné kolo turbíny. Nejvýhodnějším tvarem sací trouby je postupně rozšiřující se tvar ve směru proudění vody, který využívá právě části kinetické měrné energie kapaliny tím, že převedeme rychlost vody postupně na nižší, zvýšením průřezu klesá rychlost, průtok zůstává stejný. [2]

### 1.4.3. Generátor

K výrobě elektrické energie slouží, buď asynchronní nebo synchronní generátor, případně jako v případě modelu mále vodní turbíny stejnosměrné dynamo.



*Obr. 10 Generátor vodní elektrárny Štěchovice [vlastní]*

### **Asynchronní generátor**

Asynchronní stroj, je trojfázový indukční stroj s prostorově rozloženým vynutím jednotných fází statoru tak, že pokud je připojen na třífázovou síť dojde ke vzniku magnetického pole s točivým účinkem. Budící proud je indukován ve vinutí rotoru, magnetické pole vzniklé ve vinutí rotoru se snaží sledovat točivé pole statoru a tím je stroj roztáčen. Dojde-li k synchronnímu otáčení rotoru vůči točivému poli statoru, nedojde v rotoru k indukci potřebného budícího proudu, toto je důvod potřeby asynchronního otáčení rotoru vůči poli statoru, právě potřeba asynchronního otáčení dala jméno tomuto typu strojů. Pokud je rotor poháněn hnacím zařízením (turbínou) nazýváme tento druh stroje asynchronním generátorem, v opačném případě, tedy pokud je rotor mechanicky zatížen mluvíme o asynchronním motoru. V praxi jen nejčastěji využívám asynchronní generátor s kotvou na krátko, někdy s kotvou kroužkovou. Dalšími rozdíly v provedení jsou: provedení statorového vynutí, uchycení stroje, počet jmenovitých otáček a podobně. [6]

### **Synchronní generátor**

Jako synchronní stroj můžeme označit stroj, který má třífázové statorové vynutí rozložené tak, aby při napájení třífázovým napětím docházelo k tvorbě točivého magnetického pole. Rotor stroje je tvořen stejnosměrným elektromagnetem, který synchronně sleduje točivé pole statoru a točí se synchronně s ním. Stejnosměrný elektromagnet je napájen z budících obvodů, jež jsou obvody stejnosměrného napětí. Synchronní stroj jako generátor je nejčastěji využíván ve velkých elektrárnách. Pro menší elektrárny je používán méně, z důvodu vyšší ceny stroje a také zdánlivě větší složitosti automatizace provozu. Pro MVE je využíván při rekonstrukcích například bývalých továrních MVE. Pro rychloběžné generátory parních elektráren je generátor řešen hladkým rotorem, naopak pomaloběžné soustrojí vodních elektráren jsou řešeny pomocí generátorů s vyniklými póly. [6]

### **Stejnosměrné dynamo**

Stejnosměrné dynamo je obdobné jako střídavý synchronní generátor s rozdílem mechanického usměrňovače, komutátoru. Uspořádání stejnosměrného dynama je vždy takové, že statorem stroje jsou budící magenty a na rotoru je kotva. K usměrnění proudu indukovaného v kotvě dochází v komutátoru. V závislosti na způsobu připojení, jak mechanického, tak elektrického, může stejnosměrný stroj pracovat buď jako dynamo, nebo jako motor. Pokud pracuje jako dynamo, je mechanicky připojen na hnací zařízení, v našem případě na turbínu. Pokud pracuje jako motor, je připojen elektricky na zdroj stejnosměrného napětí. Dynamo velmi často slouží jako zdroj pro dobíjení baterií. V tomto případě může dojít k možnosti, že dynamo začne vybíjet baterii, pokud dojde k uzavření přítoku vody do turbíny, přejde dynamo nepozorovaně do motorického stavu. Tuto vlastnost je nutné brát v potaz při použití dynama pro MVE. [6]

## 1.5. Vodní elektrárny a malé vodní elektrárny

V dnešní době je vodní energie využívána ve většině případů pro výrobu elektrické energie. Nebylo tomu tak vždy, přibližně do roku 1950 byla v našich podmínkách vodní energie využívána jako mechanický pohon, až později byla tato energie využita pro výrobu elektrické energie, převážně ve velkých vodních dílech, jako například Slapy, Orlik, Lipno, Štěchovice a další vodní díla vltavské kaskády. Stavba těchto údolích přehrad nese vícero významů, akumulace vody pro provoz turbín, soustředění spádu, ochrana před povodněmi a regulace průtoku řeky pod přehradou. Stavbu přehradní hráze a vznik vodní plochy lze vnímat jako citelný zásah do původního prostředí dané lokality. [2]



*Obr. 11 Betonová hráz vodní elektrárna Štěchovice [vlastní]*

Na způsob dělení vodních elektráren lze nahlížet z vícero způsoby, zde budou zmíněny jen některé z nich. Pro tuto práci je důležité specifikovat pojem malé vodní elektrárny, proto prvním dělením je dělení podle instalovaného výkonu, dále dle velikosti využitého spádu, dle získaného spádu a dle charakteru pracovního režimu. [2]

„dle velikosti instalovaného výkonu

- velké s instalovaným výkonem na 200 MW
- střední s instalovaným výkonem od 10 MW do 200 MW
- malé (MVE) s instalovaným výkonem do 10 MW

dle velikosti využitého spádu

- nízkotlaké využívající spád do 20 m
- střednětlaké využívající spád nad 20 m do 100 m
- vysokotlaké využívající spád nad 100 m

dle získaného spádu (podle způsobu soustředění vodní energie)

- přehradové, spád vytvořen přehradou
- zdržové (jezové), spád vytvořen jezem
- derivační, využívají umělé vedení vody mimo vodní tok pomocí beztlakového, nebo tlakového derivačního přivaděče (kanál, štola, potrubí)
- přehradně derivační, kombinace dvou výše uvedených
- bez vzdouvací stavby

dle charakteru pracovního režimu

- průtočné, neovlivňují výrazně přirozený průtok toku a nemají akumulční nádrž
- akumulční, řízený odběr vody z akumulční nádrže vytvářející spád (k nim patří i elektrárny přečerpávací)“ [2]

### **1.5.1. Význam MVE pro Českou republiku**

Českou republiku lze označit jako ideální místo pro výstavbu případně obnovu MVE. V první polovině 20. století bylo na území bývalého Československa přibližně 15000 lokalit, kde byla využívána vodní energie, ať už jako pohon mlýnu či pil, tak jako MVE místního významu. Postupem času počet lokalit klesal. V dnešní době je v České republice v provozu asi 1300 malých vodních děl. [2]

MVE lze považovat doplňkový, avšak cenný zdroj energie, který může využít potenciál menších vodních toků nacházejících se v naší republice. Doposud není v České republice využito přibližně 75% využitelné vodní energie v MVE. [2]



## 1.6. Hydroenergetika v regionu Liberecka a Jizerských hor

Oblast Liberecka a Jizerských hor se jeví z hlediska stavby a obnovy MVE jako ideální. Za hlavní dva toky oblasti lze považovat řeku Jizeru spadající do povodí Labe a Lužickou Nisu spadající do povodí Odry. Obě řeky i s přítoky lze považovat za energeticky významné s ohledem na četnost MVE na nich umístěných.



*Obr. 12 MVE Spálov [7]*

Na řece Jizeře je na bezmála 165 km délky provozováno 39 MVE převážně využívajících spádu jezů. Za nejnovější MVE na řece Jizeře lze považovat MVE Železný Brod zprovozněnou v roce 2010. [8] Dále lze zmínit MVE Spálov používající dvě vertikálně usazené Kaplanovi turbíny instalované v roce 1998 v rámci generální opravy, jako náhrada za dvě Francisovi turbíny z roku 1926. [7] Za energeticky významné je možné považovat také přítoky řeky Jizery, nejvýznamnějším přítokem z hlediska energetického je řeka Kamenice, jejíž energii využívá 16 MVE. Celkem je na řece Jizeře a jejích přítocích dle dostupného zdroje nainstalováno 75 MVE o výkonu 23,8 MW. [8] Lužická Nisa je výkonově méně významná proti řece Jizeře, tento fakt je dán velikostí a délkou řeky Nisy.

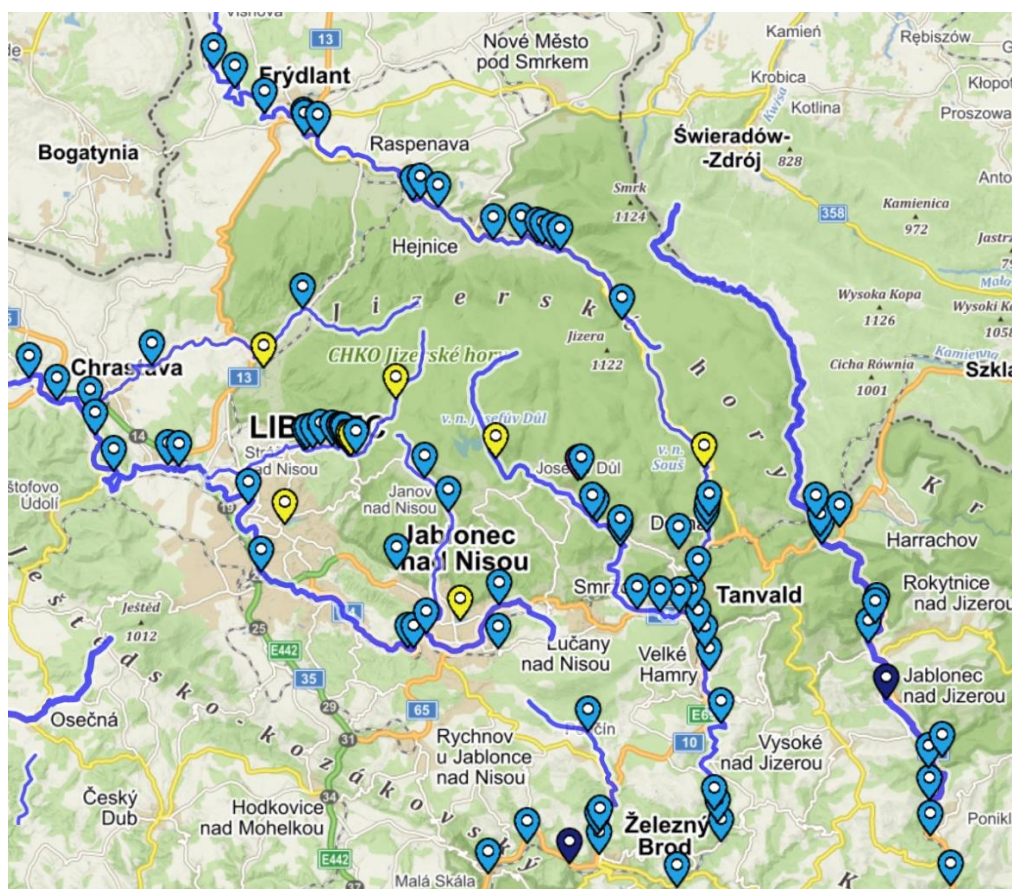


Povodí Labe		Počet MVE	Výkon MVE [kW]
Jizera		39	18672
Přítoky	Jizerka	4	675
	Oleška	3	118
	Kamenice	16	4090
	Desná	6	195
	Žehrovník	4	87
	Zábrdka	3	23
celkem		75	23860

**Tab. 1** Přehled MVE na řece Jizeře a jejích přítocích [8]

Povodí Odry		Počet MVE	Výkon MVE [kW]
Lužická Nisa		15	2368
Přítoky	Smědá	11	1845
	Jeřice	2	124
	Bíla Nisa	2	40
	Černá Nisa	12	1507
celkem		42	5884

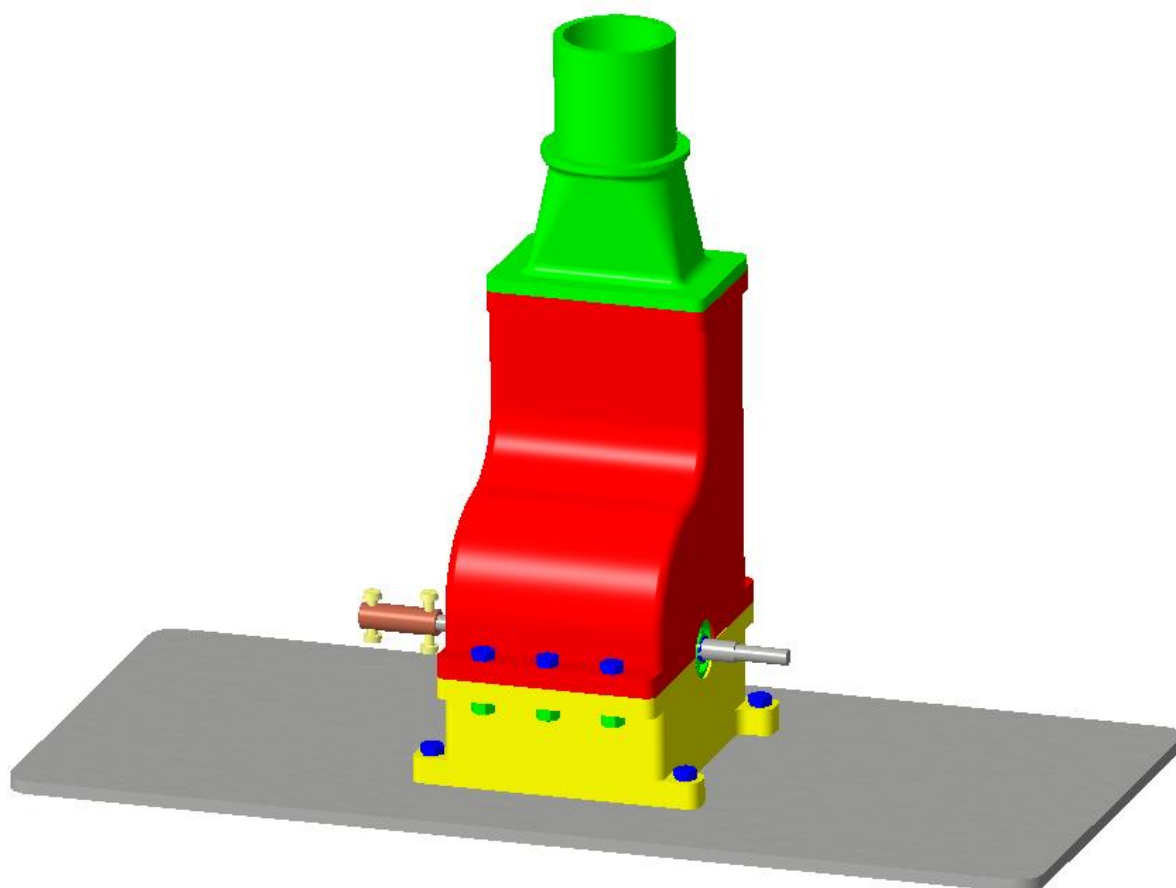
**Tab. 2** Přehled MVE na Lužické Nise a jejích přítocích [8]



**Obr. 12** Situační mapka MVE v oblasti Jizerských hor a Liberecka [8]

## 2. Návrh modelu malé vodní turbíny

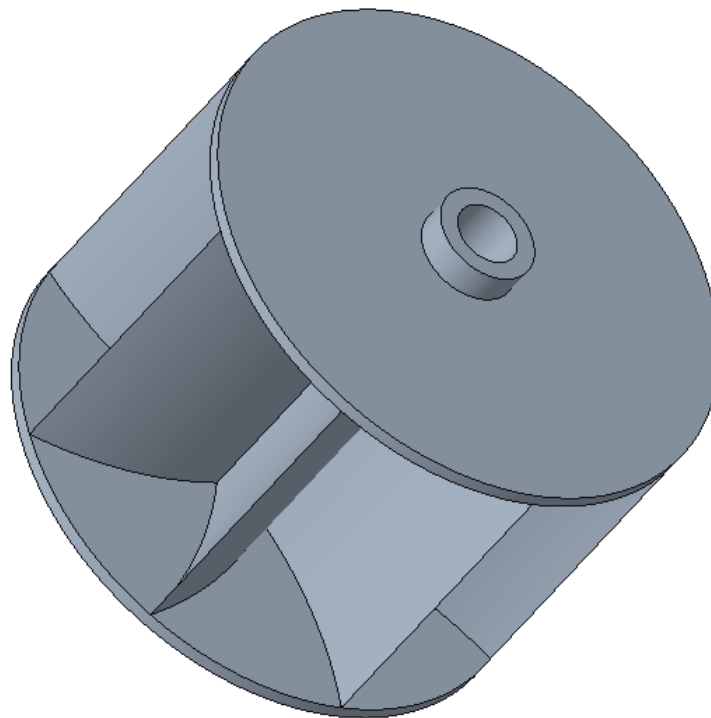
Návrh modelu malé vodní turbíny vychází z jednoduchého lopatkového kola, k němuž je voda přiváděna pomocí jednoduchého potrubí, nebo hadice. Tvar a rozměry součástí byl volen s ohledem na 3D tisk a také s ohledem na co nejmenší množství strojů a nástrojů nutných pro zhotovení. Pro tvorbu 3D modelů a výkresové dokumentace byl použit software Creo Parametric 7.0.1.0.



*Obr. 13 Sestava modelu malé vodní turbíny [vlastní]*

## 2.1.Návrh rotoru a hřídele

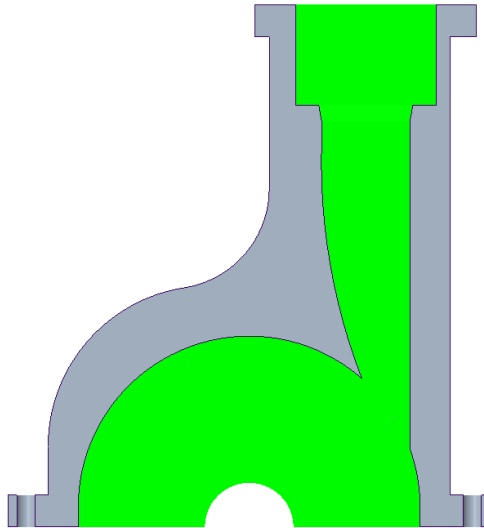
Tvar lopatek rotoru byl inspirován tvarem lopatek historicky používaných vodních kol, celkový tvar rotoru vychází z konstrukce Bánkiho turbíny. Lopatky se postupně rozšiřují směrem ke středu rotoru, a to jak v případě šesti lopatkového, tak osmi lopatkového rotoru. Volba většího počtu lopatek na tento průměr rotoru s největší pravděpodobností pozbývá významu, a to s ohledem na zmenšení prostoru mezi lopatkami, který může být zaplněn přitékající vodou. Rotor o vnějším průměru 50 mm je opatřen dvěma bočnicemi, které slouží k zvýšení tuhosti celého dílu a také ke zamezení úniku vody z prostoru mezi lopatkami do stran. Vnitřní díra o průměru 10 mm byla zvolena s ohledem na výrobu hřídele rotoru, přesněji s ohledem na upnutí a následné obrábění na soustruhu a také s ohledem na volbu ložisek. Samotná hřídel je konstrukčně velice jednoduchá viz. výrobní výkres v příloze. Uprostřed je hladký povrch průměru 10 mm na který je nalicován sumě rotor, který je k hřídeli přilepen standartním universálním lepidlem. Obě strany hřídele jsou dále opatřeny průměrem pro ložiska 608 2Z, který činí 8 mm, dále je hřídel rotoru na obou koncích navrhnutá na průměr 6 mm, na jednom konci pro hřídelovou spojku, na konci druhém pro nalepení reflexního štítku pro optické měření otáček. Ložiska jsou na hřídeli zajištěna pojistnými kroužky. Přenos krotícího momentu z turbíny na stejnosměrný generátor je zajištěn hřídelovou spojkou.



**Obr. 14** Model osmi lopatkového rotoru [vlastní]

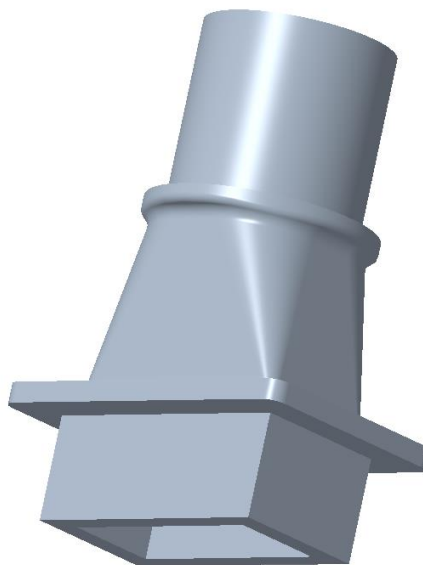
## 2.2.Návrh skříně

Skříň turbíny je tvořena třemi díly a to: spodní částí, vrchní částí a přechodovým dílem, který slouží ke změně průřezu přivaděče z kruhového na obdélníkový. Vrchní část skříně je uvnitř opatřena tryskou, respektive zúžením průřezu, které má funkci pro zvýšení kinetické energie vody těsně před vstupem do rotoru turbíny. Dále je na vrchní části skříně navrženo osazení, do kterého zapadá přechodový díl. Vrchní díl skříně také opatřen lemem s otvory pro šrouby.



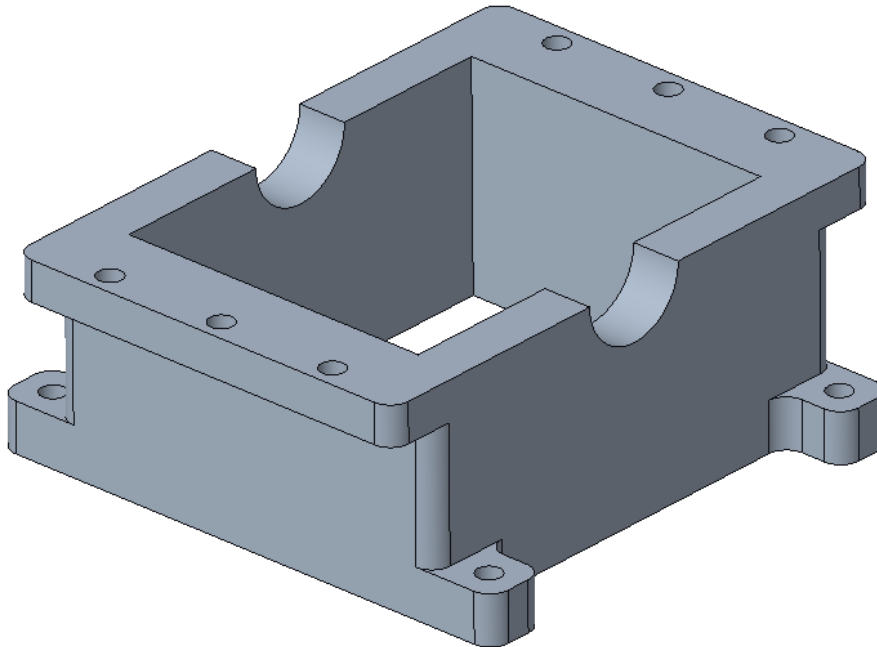
*Obr. 15 Řez vrchní částí skříně turbíny [vlastní]*

Tvar přechodového dílu byl navržen s ohledem na rozměry pro 3D tisk a také s ohledem na co nejpozvolnější změnu tvaru průřezu přivaděče z důvodu co největší eliminace ztrát. Vnitřní průměr vrchní kruhové části 38 mm je shodný s vnitřním průměrem hadice, která slouží jako přivaděč vody do turbíny. Spodní část přechodového dílu má obdélníkový tvar a zapadá do osazení ve vrchní části skříně. Na spodní části je také navrhnut lem, který slouží jako těsnící plocha mezi přechodovým dílem a vrchní částí skříně.



*Obr. 16 Model přechodového dílu [vlastní]*

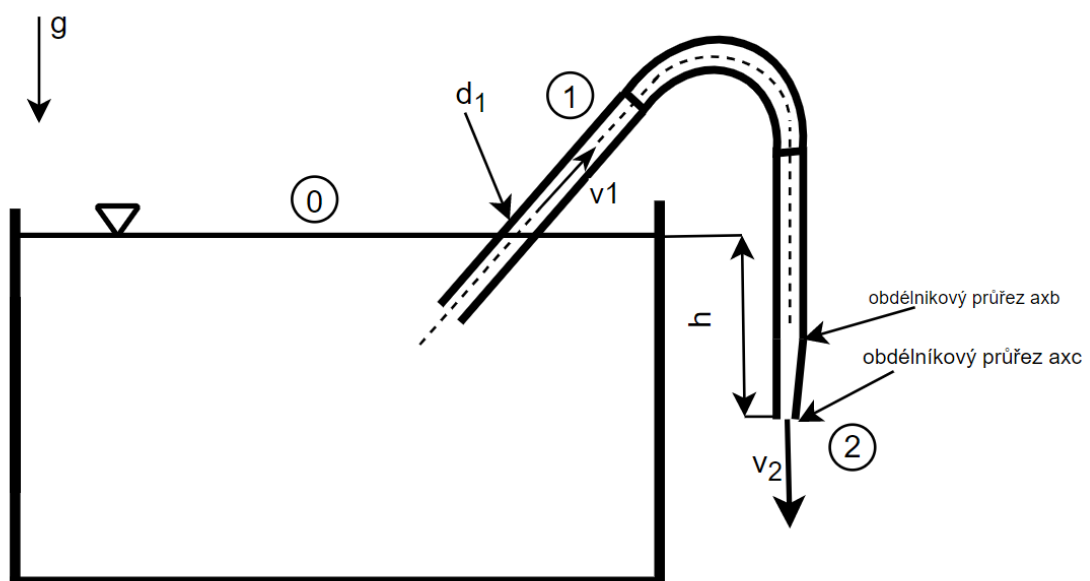
Spodní část skříně slouží jako základna pro ukotvení celé sestavy turbíny k plechu, jenž je navržen jako držák pro snadné přenášení celého modelu. Díl je opatřen lemem shodným s lemem vrchní části skříně. Dále je opatřen výstupky s dírami pro ukotvení celé turbíny k plechu.



*Obr. 17 Model spodní části skříně turbíny [vlastní]*

### 2.3. Výpočet základních parametrů modelu

Pro výpočet základních parametrů modelu turbíny byl použit zákon zachování energie, tedy Bernoulliho rovnice dále jen BR a také tzv. rovnice kontinuity dále jen RK. Základní výpočet byl proveden bez uvažování ztrát jako jsou ztráty třením v potrubí a místní ztráty.



*Obr. 18 Výpočtové schéma pro určení základních parametrů turbíny [vlastní]*

Pro určení rychlosti proudění  $v_2$  je použita BR mezi místem 0 hladinou nádrže a místem 2 výtokem z přivaděče ve tvaru: [9]

$$g \cdot h_0 + \frac{p_0}{\rho} + \frac{v_0^2}{2} = g \cdot h_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} \quad (1)$$

Po úpravě a dosazení známých hodnot dostáváme:

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (2)$$

Pro určení velikosti objemového průtoku využijeme RK ve tvaru: [9]

$$v_0 \cdot A_0 = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 = Q \quad (3)$$

Po úpravě a dostáváme:

$$Q = v_2 \cdot A_2 \quad (4)$$

Dále lze dopočítat rychlost proudění v místě 1 tedy v hadici přivádějící vodu k trysce:

$$v_1 = \frac{v_2 \cdot A_2}{A_1} \quad (5)$$

Výpočet průřezových ploch

$$A_1 = a \cdot b \quad (6)$$

$$A_2 = a \cdot c \quad (7)$$

$$A_h = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (8)$$

Podmínka pro výběr průměru hadice tak aby platilo RK je:

$$A_h = A_1 \quad (9)$$

Dále pro zjištění teoretického výkonu bylo využito vztahu [2]

$$P_t = Q \cdot g \cdot \rho \cdot h \quad (10)$$

gravitační zrychlení [m/s <sup>2</sup> ]	g	9,81
hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	ρ	1000
spád [m]	h	0,65
Ø hadice [m]	Ød	0,038
délka obdélníkové části přivaděče [m]	a	0,05
šířka obdélníkové části přivaděče [m]	b	0,02
šířka výstupu přivaděče [m]	c	0,012
průřez hadice [m <sup>2</sup> ]	A <sub>h</sub>	0,001
průřez obdélníkového přivaděče [m <sup>2</sup> ]	A <sub>1</sub>	0,001
průřez trysky [m <sup>2</sup> ]	A <sub>2</sub>	0,0006
rychlost v <sub>2</sub> bez ztrát [m/s]		3,571
rychlost v <sub>1</sub> bez ztrát [m/s]		2,143
objemový průtok [m <sup>3</sup> /s]		0,002143
Teoretický výkon [W]		13,7

**Tab. 3** Výpočet základních parametrů modelu mále vodní turbíny

### Určení Reynoldsova čísla

Pro výpočet Reynoldsova čísla bylo použito vztahu pro výpočet [9]

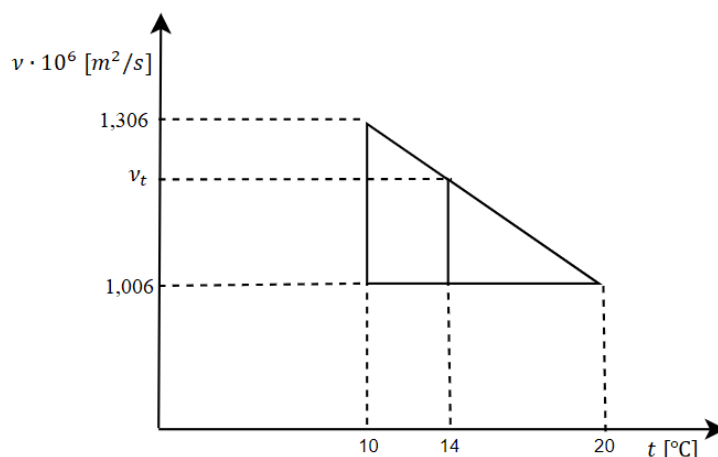
$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu} \quad (11)$$

Hodnota kinematické viskozity byla zjištěna z tabulek pomocí naměřené teploty. Jelikož se naměřená teplota neshoduje s hodnotou uvedenou v tabulkách, ale je v intervalu mezi dvěma teplotami bylo pro určení využito lineární interpolace.

### Vlastnosti syté vody

<i>t</i> [°C]	$\rho$ [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	$c_p$ [ $\frac{J}{kg \cdot K}$ ]	$\lambda$ [ $\frac{W}{m \cdot K}$ ]	$10^6 \cdot \nu$ [ $\frac{m^2}{s}$ ]	$10^3 \cdot \eta$ [Pa·s]	$10^4 \cdot \beta$ [ $\frac{1}{K}$ ]	Pr [-]
0	999,8	4 513,7	0,550	1,788	1,787 8	-0,63	13,70
10	999,6	4 191,0	0,573	1,306	1,305 3	0,70	9,52
20	998,2	4 182,6	0,597	1,006	1,004 2	1,82	7,00
30	995,6	4 174,2	0,616	0,805	0,801 2	3,21	5,41
40	992,2	4 174,2	0,632	0,658	0,653 1	3,87	4,30
50	988,0	4 174,2	0,646	0,556	0,549 2	4,49	3,54
60	983,2	4 178,4	0,658	0,478	0,469 7	5,11	2,98

**Obr. 19** Výstřižek z tabulky vlastností syté vody [10]



**Obr. 20** Schéma pro výpočet lineární interpolace [vlastní]

Z podobnosti trojúhelníků a po následné úpravě dostáváme:

$$v_t = \left( \frac{1,306 \cdot 10^{-6} - 1,006 \cdot 10^{-6}}{20 - 10} \cdot (20 - 14) \right) + 1,006 \cdot 10^{-6} = 1,186 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad (12)$$

Pro zjištění  $Re$  je dále nutné znát charakteristický rozměr kanálu  $L$ , pro hadici kruhového průřezu uvažujeme za charakteristický rozměr průměr hadice  $d_1$ , pro oba obdélníkové průřezy je nutné dopočítat charakteristický rozměr. [9]

$$L_{Ah} = d_1 \quad (13)$$

$$L_{A1} = \frac{4 \cdot a \cdot b}{2 \cdot (a + b)} \quad (14)$$

$$L_{A2} = \frac{4 \cdot a \cdot c}{2 \cdot (a + c)} \quad (15)$$

průměrná teplota vody v nádrži [°C]	14
kinematická viskozita vody [m <sup>2</sup> /s]	0,000001186
charakteristický rozměr pro A1 [m <sup>2</sup> ]	0,0286
charakteristický rozměr pro A2 [m <sup>2</sup> ]	0,0194
Reynoldsovo číslo pro Ah	68833
Reynoldsovo číslo pro A1	51618
Reynoldsovo číslo pro A2	58279
Kritické Reynoldsovo číslo	2300

**Tab. 4** Určení Reynoldsova čísla

$$Re_{\text{daného průřezu}} > Re_{\text{kritický}}$$

Z výsledků pro všechny průřezy je patrné že ve všech místech vedení můžeme očekávat turbulentní proudění. [9]

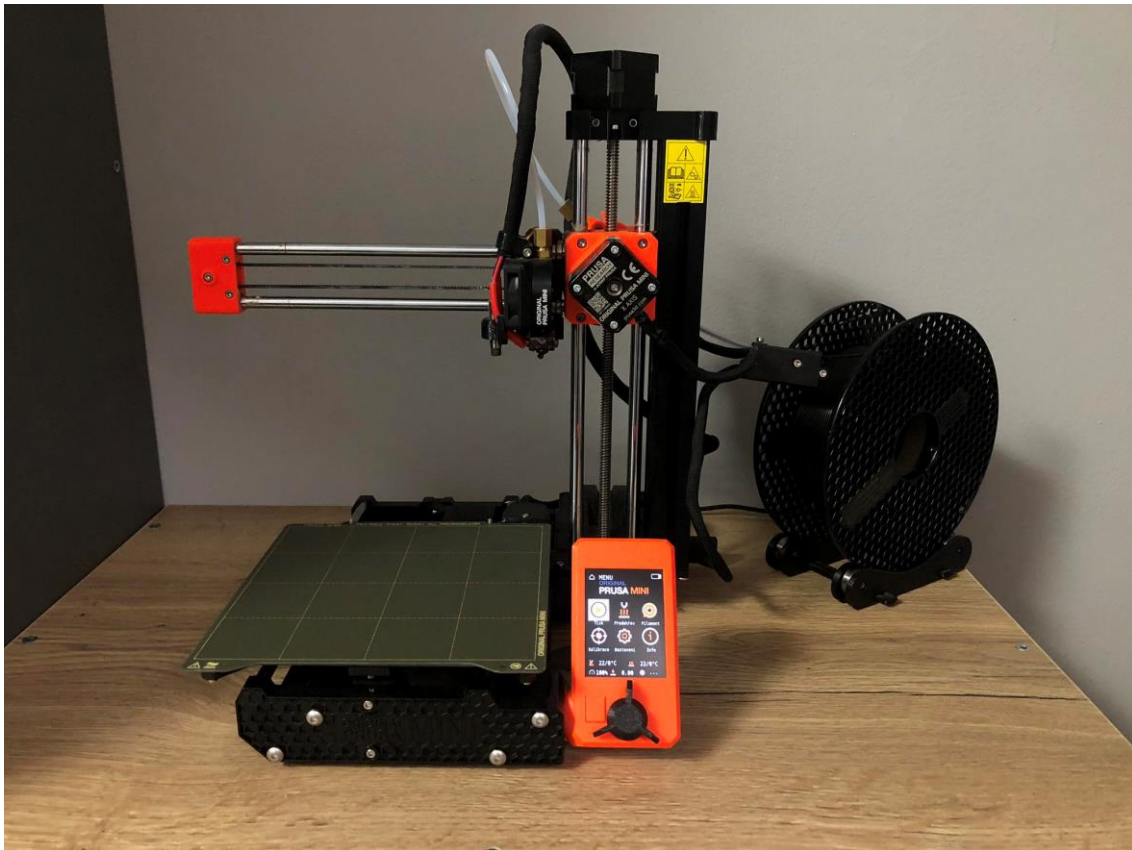


### 3. Postup výroby modelu malé vodní turbíny

Celá sestava turbíny byla vyráběna za pomoci 3D tisku a základního dílenského vybavení (soustruh, vrtačka, závitníky, úhlová bruska apod.). Lopatková kola, obě části horizontálně dělené skříně a přechodový díl, byly vyrobeny pomocí 3D tisku. Hřídele pro oba rotory byly vysoustruženy na konvenčním soustruhu z konstrukční oceli jakosti ČSN 11 375, stejný materiál byl použit pro zhotovení plechu, jenž slouží jako držák celé sestavy. Soustružením a pomocí vrtání na soustruhu byla také vyrobena spojka, přenášející točivý moment turbíny na hřídel stejnosměrného dynama. Oba díly skříně bylo nutné svrtat proti sobě, vrtáním bylo také docíleno požadovaného rozměru díry pro šrouby, jelikož díra vytvořená 3D tiskem bylo tvarově i rozměrově nepřesná, svrtaná je také spodní část skříně turbíny společně s plechem, V plechu bylo nutné vyříznout otvor pro odtok vody z turbíny pomocí úhlové brusky. Dále bylo nutné slícovat přechodový díl společně s vrchní částí skříně turbíny, došlo tedy k mírnému obroušení některých ploch přechodového dílu, k zatěsnění spojení došlo pomocí těsnícího tmelu. Tmelem byla také zatěsněna dělicí rovina skříně turbíny. Ložiska turbíny byla podmazána jak na hřídeli, tak i na vnějším kroužku těsnícím tmelem, z důvodu absence hřídelového těsnění (gufera). Část hadice sloužící jako přivaděč byla nejdříve připevněna k přechodovému dílu pomocí plastové trubky, těsnícího tmelu a instalátérských pásků. Poté bylo k této hadici připevněno šoupátko pomocí plastového hadičníku, hadičník byl použit i na druhé straně šoupátka, na druhé straně byla na hadičník nasazena hadice a připevněna do objímky ukotvené na tažné nádrži.

#### 3.1. 3D tisk základních komponentů

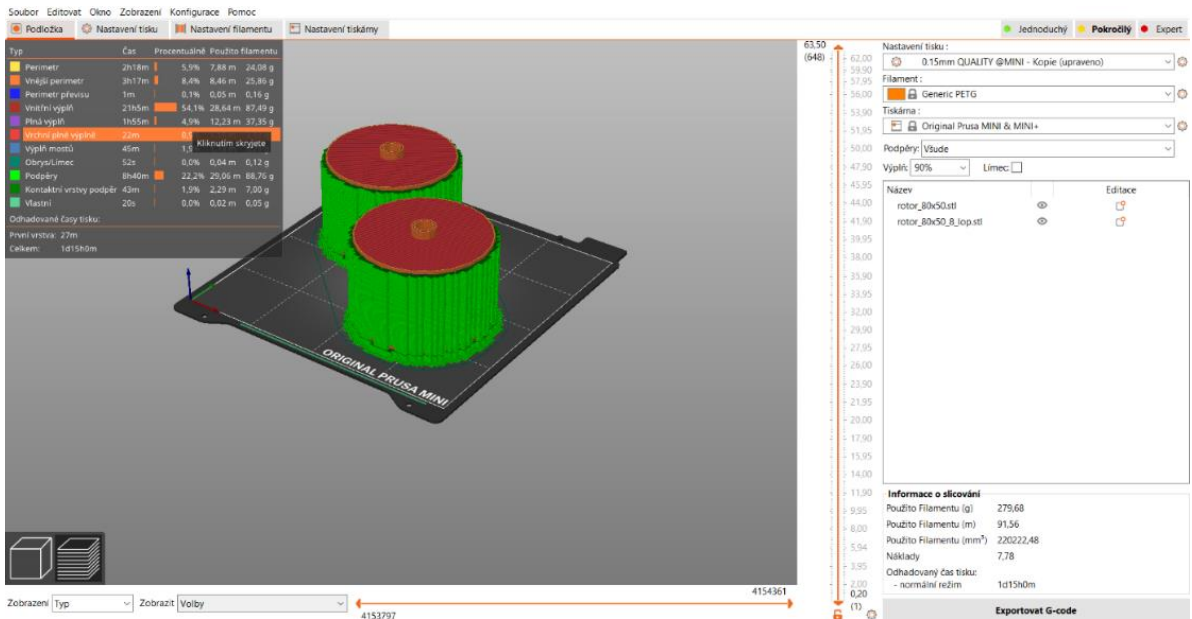
Tisk základních komponentů modelu turbíny probíhal metodu FDM na 3D tiskárně Original Prusa MINI+. Pro tisk byl zvolen černý filament materiálu PETG. Samotný tisk probíhal v několika etapách. Při prvním tisku byl vytištěn jeden model rotoru s výplní 5 % pouze jako vizualizace, druhým tiskem s 95 % výplní byl vytvořen model šesti a osmi lopatkového rotoru, který byl následně usazen na hřídel turbíny. Vrchní část skříně turbíny byla vytištěna až na druhý pokus s výplní 90 %, z důvodu špatného nastavení podpor při prvním tisku. Spodní část skříně s výplní 80 % a přechodový díl s výplní 90 % byly vytištěny bez větších komplikací prvním tiskem. Po dokončení každé etapy tisku byli díly vyjmuty zbaveny podpor v případě potřeby byli některé části obrobny ať už ručně případně strojně (vrtání).



*Obr. 21 3D tiskárna Original Prusa MINI+ [vlastní]*

### **Volba materiálu PETG**

Materiál PETG je glykolem modifikovaný polyethylentereftalát, jedná se o levný velmi často používaný materiál pro 3D tisk. Je snadno tisknutelný, houževnatý s dobrou teplotní odolností. Je vhodný pro tisk velkých modelů, z důvodů minimálního kroucení při tisku. Snadno se brousí za sucha i za mokra. Nevýhodou je horší odstraňování podpor a špatná schopnost tvorby přemostění a převisů. [11]



**Obr. 22** Ukázka pracovního prostředí softwaru PrusaSlicer 2.5.0 [vlastní]

### 3D tisk metodou FDM

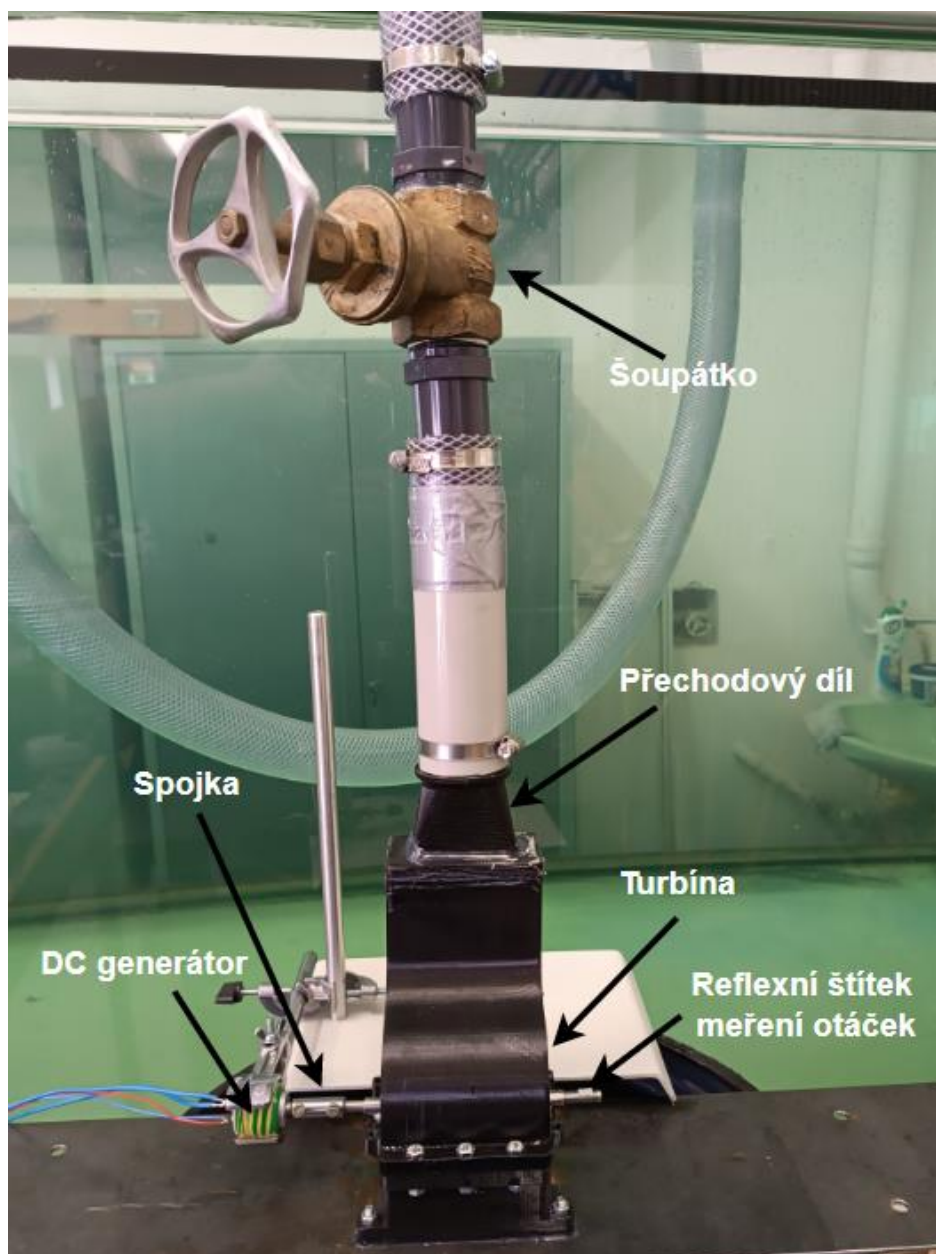
Fused deposition modeling, zkráceně FDM je metoda využívající nanášení vlákna termoplastu vynalezená v roce 1988 společností Stratasys, Inc. Tisknutá součást je vytvářena postupným nanášením jednotlivých vrstev různých termoplastů, nebo některých vosků. Materiál zahřátý mírně nad teplotu tavení vychází z vyhřívané trysky pohybující se v rovině na pracovním prostoru, při styku roztaveného materiálu s materiálem již naneseným, dochází k vzájemnému spojení jednotlivých vrstev. Pro tvarově složitější součásti je nutné využití podpory. [12]

Výhody: relativně nízká pořizovací cena 3D tiskárny, levný stavební materiál modelu, široké spektrum používaných materiálů. [13]

Nevýhody: dlouhý čas tisku, limity v geometrii, značný rozptyl tiskové přesnosti. [13]

## 4. Měření výkonu modelu malé vodní turbíny

Měření výkonu modelu malé vodní turbíny probíhalo v laboratoři katedry energetických zařízení Technické univerzity v Liberci. K měření byla využita bývalá tažná nádrž s objemem přibližně 5800 litrů jenž zajišťuje, společně s částečným dopouštěním vody, dostatečné množství vody, aby mohl být pokles hladiny považován za zanedbatelný. Samotná sestava turbíny byla usazena na sud o objemu 200 litrů, který sloužil jako sběrná nádrž. Pro pohodlné naběhnutí bylo nad přechodový díl usazeno šoupátko, díky němuž bylo možné turbínu opakovaně najíždět bez potřeby zalívat vodou hadicí pro vytvoření tzv. násosky.



*Obr. 23 Výsledná sestava modelu malé vodní turbíny v laboratoři katedry energetických zařízení [vlastní]*

Na hřídel turbíny byl pomocí spojky připevněn stejnosměrný motorek, sloužící jako generátor, pomocí něhož bylo možné jednoduše měřit výkon turbíny.

Měření výkonu dynama bylo provedeno pomocí dvou multimetrů jedním multimetrem byl měřen indukovaný proud, tento multimetr byl zapojen do série a druhým multimetrem bylo měřeno indukované napětí, druhý multimetr byl zapojen paralelně. Následně bylo využito vztahu (16) pro výpočet elektrické výkonu.

$$P_e = U \cdot I \quad (16)$$

Následně lze určit účinnost celého soustrojí v procentech.

$$\eta = \frac{P_e}{P_t} \cdot 100 \quad (17)$$

### **Postup měření**

1. Otevření šoupátka přibližně na čtvrtinu rozsahu, z důvodu pozvolného najetí turbíny.
2. Otevření přítoku vody do nádrže pro zajištění stálosti výšky hladiny.
3. Otevření šoupátka na 100 % výdrž přibližně 45-60 sekund v závislosti na ustálení stavu
4. Odečtení hodnot z optického otáčkoměru, ampérmetru a voltmetru
5. Zavření šoupátka a zavření přítoku vody do nádrže.
6. Opakování měření dvanáctkrát pro dostatečnou statistickou přesnost.

### **Používaná měřidla.**

Optický otáčkoměr C.A 1727, multimetr UNITEST 9005, multimetr TrueRMS SUPERMETER, klasický svinovací metr, rtuťový teploměr.

## 4.1. Výsledky měření

### 4.1.1. Výsledky měření pro šesti lopatkový rotor

Č. měření	šesti lopatkový rotor			
	proud [mA]	napětí [mV]	výkon [mW]	otáčky [min <sup>-1</sup> ]
1	28,605	300,2	8587,22	556
2	28,752	300,8	8648,60	556
3	28,425	298,5	8484,86	558
4	28,612	301,3	8620,80	561
5	28,475	301,8	8593,76	558
6	28,015	304,3	8524,96	559
7	28,106	303,9	8541,41	558
8	28,17	303,3	8543,96	561
9	26,425	308,8	8160,04	557
10	27,995	304,8	8532,88	561
11	28,302	303,3	8584,00	562
12	28,191	302,2	8519,32	559
Průměrná hodnota výkonu			8528,48	559
Směrodatná odchylka			119,69	1,951
Nejistota měření typu A			34,55	0,563
Teoretický výkon [W]			13,7	
Účinnost v %			62,25	

**Tab. 5** Výsledky měření pro šesti lopatkový rotor

#### 4.1.2. Výsledky měření pro osmi lopatkový motor

Č. měření	osmi lopatkový rotor			
	proud [mA]	napětí [mV]	výkon [mW]	Otáčky[ $\text{min}^{-1}$ ]
1	27,875	294,3	8203,61	558
2	28,058	300,1	8420,21	560
3	28,152	299,6	8434,34	559
4	28,496	299,3	8528,85	562
5	28,594	299,5	8563,90	561
6	27,761	302,7	8403,25	561
7	27,783	302,3	8398,80	560
8	27,971	303,6	8492,00	561
9	28,013	301,4	8443,12	560
10	28,134	300,8	8462,71	562
11	28,085	299,8	8419,88	558
12	28,015	299,6	8393,29	561
Průměrná hodnota			8430,33	560
Směrodatná odchylka			85,29	1,299
Nejistota měření typu A			24,62	0,375
Teoretický výkon [W]			13,7	
Účinnost v %			61,54	

**Tab. 6** Výsledky měření pro osmi lopatkový rotor

## Závěr

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout model malé vodní turbíny, následná výroba a měření některých parametrů. Jak již bylo zmíněno cílem nebylo vytvořit převratný vodní motor, ale vytvořit model pro ověření základních principů z oblasti využití vodní energie. Z naměřených hodnot viz Tab. 5 a Tab.6 lze usoudit, že rozdíl v účinnosti šesti a osmi lopatkového rotoru není výrazný, naopak proti očekávání osmi lopatkový rotor dosáhl přibližně o 0.71 % menší účinnosti než rotor šesti lopatkový. Dále je nutné zmínit, že dle názoru autora lze samotnou turbínu vylepšit tak, aby dosahovala lepší účinnosti. Jedním ze způsobů, jak zlepšit účinnost turbíny by mohla být úprava trysky jenž urychluje proud vody, před vstupem do rotoru. Pro vylepšení by mohlo být například využito numerické simulace, nebo metody PIV (Particle Image Velocimetry) neboli laserové anemometrie pro diagnostiku proudění tryskou. Dále by bylo možné předejít dalším ztrát úpravou přívodního potrubí, tedy výměnou hadice, jež byla použita pro měření v laboratoři, za například ocelové, nebo plastové potrubí a také úpravou vtoku vody do přivaděče. Jednou z možností zvýšení výkonu je také použití savky, jež by mohla výrazně zlepšit využití spádu.

V případě použití turbíny pro stálý provoz by bylo také nutné provést některé konstrukční úpravy s ohledem na lepší zatěsnění ložisek, případně se zde nabízí možnost využití ložisek kluzných, jež jsou využívána pro větší vodní turbíny.

Dále byly popsány základy hydroenergetiky, ať už jako popis základních vodních turbín a některých jejich komponentů, tak zhodnocení využití MVE v České republice a zejména využití MVE v oblasti Jizerských hor a Liberecka.

Je nutné si uvědomit, že využití vodní energie je do budoucna jednou z cest, jak společně s využitím dalších obnovitelných zdrojů a jaderné energie dosáhnout co nejvýhodnějšího energetického mixu s ohledem na životní prostředí.



## Literatura

- [1] NECHLEBA, Miroslav. *Vodní turbíny, jejich konstrukce a příslušenství: Vysokošk. učebnice pro obor vodní stroje a zařízení : Určeno konstruktérům a provoz. inž. 2., rozš. vyd.* Praha: SNTL, 1962. Řada strojírenské literatury.
- [2] MELICHAR, Jan, Jan VOJTEK a Jaroslav BLÁHA. *Malé vodní turbíny: konstrukce a provoz.* Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01-01808-0.
- [3] *Svět energie* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/>
- [4] MELICHAR, Jan, Jaroslav BLÁHA a Karel BRADA. *Hydraulické stroje: konstrukce a provoz.* 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2657-4.
- [5] Archimédův šroub – od čerpadla k turbíně. In: *OEnergetice.cz* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/archimeduvsroub-od-čerpadla-k-turbine>
- [6] GABRIEL, Pavel, František ČIHÁK a Petr KALANDRA. *Malé vodní elektrárny.* Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN isbn80\_01\_01812\_1.
- [7] Malá vodní elektrárna Spálov. In: *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobnizdroje/obnovitelnezdroje/voda/vodnielektrarny/ceska-republika/spalov-58162>
- [8] *TV-ADams Vodní lekeetrárny v České republice* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: [http://www.tv-adams.wz.cz/vodni\\_elektrarny\\_v\\_cr.html](http://www.tv-adams.wz.cz/vodni_elektrarny_v_cr.html)
- [9] NOVOTNÝ, Petr. *Pracovní sešit z Mechaniky tekutin pro kombinované studium.* Vyd. 1. V Liberci: Technická univerzita, 2007-2012. ISBN 978-80-7372-210-4.
- [10] PETŘÍKOVÁ, Markéta a Pavel KRYŠTŮFEK. *Tabulky a diagramy pro termodynamiku.* Vydání šesté. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. ISBN 978-80-7494-272-3.
- [11] PETG. In: *3D tiskárny Original Prusa* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/petg\\_2059](https://help.prusa3d.com/cs/article/petg_2059)
- [12] Nekonvenční metody obrábění 10. díl. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonzvencni-metody-obrabeni-10-dil>
- [13] Principy a technologie 3D tisku. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/principy-a-technologie-3d-tisku>