



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

Fakulta stavební  
Katedra hydrotechniky

**Analýza provozu MVE na základě archivních dat  
a měření in situ**

**Analyse of SHPP operation based on archive records  
and measuring in situ**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Eliška Zakouřilová**

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

Vedoucí bakalářské práce: Dr. Ing. Petr Nowak

**Praha, 2020**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Zakouřilová Jméno: Eliška Osobní číslo: 468702  
Zadávací katedra: Katedra hydrotechniky  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Analýza provozu MVE na základě archivních dat a měření in situ

Název bakalářské práce anglicky: Analyse of SHPP operation based on archive records and measuring in situ

Pokyny pro vypracování:

Vyhodnocení dlouhodobých archivních dat provozu MVE a následné statistické zpracování za účelem definice četnosti jednotlivých provozních stavů a jejich významu z hlediska výroby elektrické energie. Vytipování problematického provozního stavu s ohledem na proudění ve vtoku a změření povrchových rychlostí se zakreslením do výkresu vtoku.


Seznam doporučené literatury:

- Hydraulic structures - Novak
- MatLab manuals and tutorials

Jméno vedoucího bakalářské práce: Dr. Ing. Petr Nowak

Datum zadání bakalářské práce: 19.2.2020 Termín odevzdání bakalářské práce: 17.5.2020

Údaj uveďte v souladu s kalendářem příslušného ak. roku

  
Podpis vedoucího práce

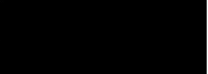
  
Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutně uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

19.2.2020

Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta(ky)

### Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Analýza provozu MVE na základě archivních dat a měření in situ** zpracoval(a) samostatně za použití uvedené literatury a pramenů.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne ...

.....  
Jméno Příjmení

## Poděkování

Ráda bych poděkovala Dr. Ing. Petru Nowakovi za jeho čas a cenné rady užitečné nejenom pro zpracování bakalářské práce. Dále děkuji pánům L. Pavlovi a P. Bučinovi za poskytnutí podkladů a umožnění měření v zájmové lokalitě.

## Anotace

Tato bakalářská práce v první části představuje problematiku měření rychlostí proudění vody se zaměřením na přiváděcí objekty malých vodních elektráren. Dále se zabývá vyhodnocováním časové řady hydrologických dat a záznamů provozu malé vodní elektrárny Liběchov, kde bylo také provedeno měření in situ. Na základě tohoto měření a analýzy poskytnutých dat je tato práce ukončena simulací výroby a ztrát během jednoho kalendářního roku.

## Klíčová slova:

Malá vodní elektrárna, měření proudění, analýza, hydrologie

## Summary

The first part of this bachelor thesis introduces ways of velocity measuring which is focused on supply channels of small hydropower plants. It continues with an analysis of long term hydraulics data and archive records of small hydropower plant Liběchov, where also the measurement in situ was done. Eventually, the simulation of production during one year was programmed based on the recorded data and measurement.

## Keywords:

Small hydropower plant, velocity measuring, analysis, hydrology

# Obsah

<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>2. MĚŘENÍ RYCHLOSTI VODY.....</b>	<b>10</b>
2.1. HYDROMETRICKÁ VRTULE .....	11
2.1.1. <i>Historie a vývoj</i> .....	11
2.1.2. <i>Princip měření</i> .....	13
2.1.3. <i>Výhody a nevýhody</i> .....	15
2.1.4. <i>Využití</i> .....	15
2.2. PLOVÁKOVÁ METODA.....	16
2.2.1. <i>Princip a postup měření</i> .....	16
2.2.2. <i>Výhody a nevýhody</i> .....	17
2.2.3. <i>Využití</i> .....	18
2.3. ELEKTROMAGNETICKÝ INDUKČNÍ METODA .....	18
2.3.1. <i>Princip a postup měření</i> .....	18
2.3.2. <i>Výhody a nevýhody</i> .....	20
2.3.3. <i>Využití</i> .....	20
2.4. LASER .....	21
2.4.1. <i>Princip měření</i> .....	21
2.4.2. <i>Výhody a nevýhody</i> .....	21
2.4.3. <i>Využití</i> .....	22
2.5. RADAR.....	22
2.5.1. <i>Princip měření</i> .....	22
2.5.2. <i>Výhody a nevýhody</i> .....	23
2.5.3. <i>Využití</i> .....	23
2.6. ULTRAZVUKOVÁ MĚŘIDLA S PEVNOU INSTALACÍ .....	23
2.6.1. <i>Princip měření</i> .....	23
2.6.2. <i>Využití</i> .....	24
2.7. ADCP (ACOUSTIC DOPPLER CURRENT PROFILER) .....	24
2.7.1. <i>Princip a postup měření</i> .....	24
2.7.2. <i>Výhody a nevýhody</i> .....	26
2.7.3. <i>Využití</i> .....	26
2.8. PITOTOVA TRUBICE.....	27
2.9. STOPOVACÍ ZKOUŠKY .....	27
2.9.1. <i>Směšovací metoda</i> .....	27
2.9.2. <i>Integrační metoda</i> .....	28
2.9.3. <i>Výhody a nevýhody</i> .....	29

2.9.4.	<i>Využití</i> .....	29
2.10.	SHRNUTÍ .....	29
<b>3.</b>	<b>VODNÍ DÍLO MVE LIBĚCHOV</b> .....	<b>30</b>
3.1.	ZÁKLADNÍ INFORMACE .....	30
3.2.	VÝVOJ PROFILU .....	31
3.3.	MVE .....	32
<b>4.</b>	<b>PODKLADY</b> .....	<b>33</b>
4.1.	ARCHIVNÍ DATA Z MVE LIBĚCHOV .....	33
4.2.	POVODÍ LABE .....	34
<b>5.</b>	<b>PROVOZNÍ STAVY</b> .....	<b>35</b>
5.1.	SÓLO PROVOZ TG1 .....	35
5.2.	SOUBĚH TG1 + TG3 .....	35
5.3.	SÓLO PROVOZ TG3 .....	36
<b>6.</b>	<b>VYHODNOCENÍ DAT Z MVE LIBĚCHOV</b> .....	<b>37</b>
6.1.	ÚČINNOSTNÍ CHARAKTERISTIKA .....	37
6.2.	VÝKONNOSTNÍ CHARAKTERISTIKA .....	40
6.3.	HYDRAULICKÉ ZTRÁTY VE VTOKOVÉM OBJEKTU BEZ JEMNÝCH ČESLÍ .....	43
6.3.1.	<i>Zohlednění rychlostní výšky</i> .....	43
6.3.2.	<i>Analýza dat</i> .....	43
6.3.3.	<i>Definice ztrátového výkonu</i> .....	44
<b>7.</b>	<b>MĚŘENÍ IN-SITU</b> .....	<b>44</b>
7.1.	POSTUP .....	45
7.1.1.	<i>Nivelace hladiny</i> .....	45
7.1.2.	<i>Hladinové rychlosti</i> .....	46
7.1.3.	<i>Plováky</i> .....	46
7.1.4.	<i>ADCP</i> .....	47
7.2.	PREZENTACE NAMĚŘENÝCH HODNOT .....	47
7.2.1.	<i>Měření č. 1</i> .....	47
7.2.2.	<i>Měření č. 2</i> .....	49
7.3.	ZHODNOCENÍ .....	50
<b>8.</b>	<b>PODKLADY OD POVODÍ LABE</b> .....	<b>51</b>
8.1.	ČÁRA PŘEKROČENÍ .....	51
8.1.1.	<i>Dolní voda</i> .....	52
8.1.2.	<i>Horní voda</i> .....	52
8.1.3.	<i>Průtok</i> .....	53



8.2.	MĚRNÁ KŘIVKA DOLNÍ VODY .....	53
<b>9.</b>	<b>SIMULACE VÝROBY MVE ZA ROK 2018.....</b>	<b>55</b>
9.1.	ZÍSKANÝ VÝKON.....	55
9.2.	ZTRÁTOVÝ VÝKON .....	56
9.3.	ZHODNOCENÍ .....	56
<b>10.</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>57</b>
<b>11.</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>58</b>
<b>12.</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>59</b>
<b>13.</b>	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>60</b>
<b>14.</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>61</b>

# 1. ÚVOD

Malé vodní elektrárny jsou ideálním způsobem, jak využít energii vody přepadající přes jezy na řekách. Aby efektivita těchto staveb byla co největší, je vhodné provádět vyhodnocování dlouhodobých záznamů hydraulických dat. Taková statistická zpracování jsou důležitá ne jenom pro samotný návrh elektráren, je žádoucí je provádět i po uvedení do provozu. Správné nastavení a fungování vodních elektráren je věc citu a žádá pečlivý přístup zkušených odborníků. Hledání ideálního poměru průtoků či nevyhodněnějšího přepínacího bodu mezi jednotlivými provozními vztahy, tím vším lze zlepšovat účinnost a navyšovat výrobu.

Je tedy více než vhodné provádět nejen průběžná měření, ale i nárazová, která budou mnohem detailnější. Způsobů měření rychlostí a průtoků je spousta, ovšem měření cílená na vyhodnocování provozu vodních elektráren si žádají největších přesností, aby vůbec měla smysl. V dnešní době existuje celá řada moderních technologií, díky kterým lze měřit i vyhodnocovat výsledky velice rychle a pohodlně bez nutnosti hlubokých technických znalostí. Zatím se sice jedná o poměrně drahé záležitosti, ale cena bude jistě s dalším vývojem klesat a tyto moderní metody budou dostupnější. Některým těmto metodám se věnuje první část práce.

Při analýze provozu vodní elektrárny je vhodné podívat se zvláště na jednotlivé provozní stavy. Vyhodnotit, který je s ohledem na výrobu elektrické energie nejrelevantnější a tím se zabývat v první řadě.

Často bývá problematickým objektem vtokový kanál, na kterém kvůli nevhodně zvolené geometrii či špatnému provedení dochází k velikým hydraulickým ztrátám. To připravuje elektrárnu o cenné centimetry spádu, čímž se snižuje i vyrobená energie. Pro nalezení problematických míst je vhodné provést měření povrchových rychlostí a průběhu hladiny. Tato měření je ideální realizovat při různých průtokových stavech.

Zkoumaným objektem této práce je malá vodní elektrárna v Liběchově. Zpracování jejích provozních dat bylo uskutečněno v softwaru MATLAB společnosti MathWorks, který slouží pro vědeckotechnické výpočty. Práce je zakončena simulací roční výroby.

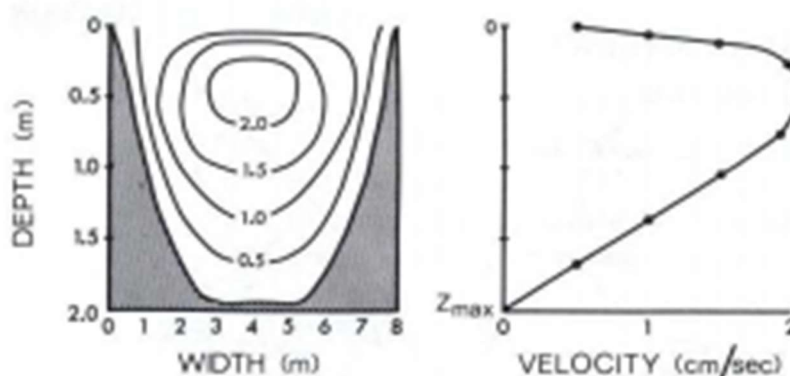
## 2. MĚŘENÍ RYCHLOSTI VODY

Rychlost proudění vody je jedna z frekventovaných hydraulických veličin. Jedná se o určitou vzdálenost, kterou částice urazí za určitý čas. Základní jednotkou je  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Často se měří z důvodu potřeby zjištění jiné hydrologické veličiny, průtoku [ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$ ], kterou lze získat ze vztahu

$$Q = S * v$$

kde  $S$  [ $\text{m}^2$ ] je plocha řešeného profilu a  $v$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] rychlost proudění.

Rychlost se dá měřit různými metodami založenými na různých principech. Každá používaná metoda má své výhody i nevýhody a hodí se do různých podmínek, ať už podle velikosti průtoku a rychlosti proudění, nebo finanční dostupnosti a praktičnosti měření. Metody se také zásadně mění podle dosahované přesnosti výsledků, což je mimo jiné způsobené i tím, jak moc zahrnují započítání nerovnoměrného rozložení rychlosti v profilu koryta.



Obrázek 1 - Příklad rozložení rychlosti proudění v otevřeném korytu [4]

Přesnost je v případě měření v přírodních kanálech vodních elektráren velmi podstatný parametr, je zde třeba dosahovat výsledků co nejpřesnějších. Nejlepším měřidlem je ve výsledku samotná turbína.

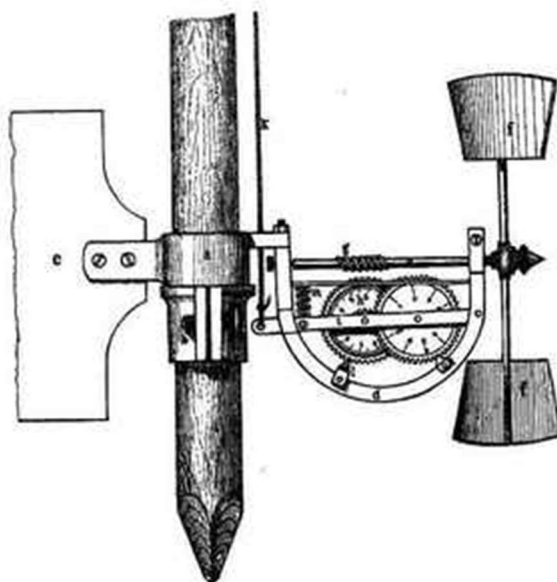
Vedle klasických způsobů měření zde bude představeno i několik méně tradičních, které stále nejsou tak hojně používány, ale jejich vývoj jde rychle kupředu, a především klesá jejich cena, čímž se zvyšuje jejich dostupnost pro běžného uživatele.

## 2.1. Hydrometrická vrtule

Hydrometrické vrtule jsou ve vodním hospodářství a hydrologii stále nejvyužívanějším způsobem měření rychlosti proudění vody, a to i přes to, že od jejího vzniku byla vyvinuta spousta přístrojů založených na jiném principu sloužící ke stejnému účelu. [1]

### 2.1.1. Historie a vývoj

Historie hydrometrické vrtule sahá až do roku 1787, kdy byla navržena R. Woltmannem. Jednalo se o kolo s dvěma šikmými lopatkami a mechanickým počítadlem na horizontální ose. Tento přístroj se brzy ujal a byl často používán.

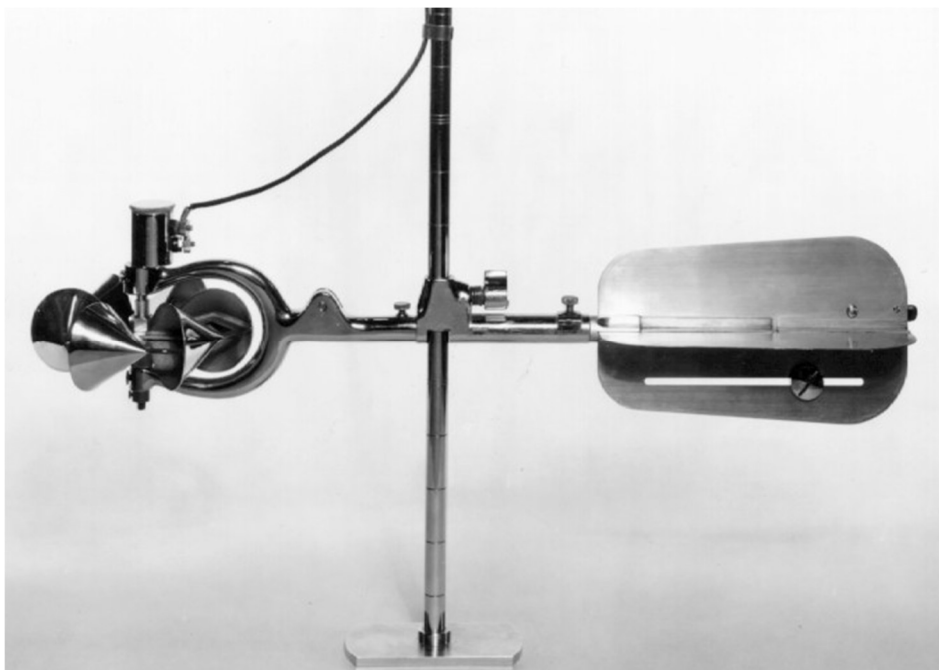


Obrázek 2 - Původní Woltmannova vrtule [1]

Zanedlouho se také dočkal úprav, zejména v přechodu z lopatkového kola na šroubovici. Toto vylepšení, se kterým přišel kolem roku 1820 Trevianos, se používá dodnes. Dalším pokrokem bylo přidání elektrické signalizace otáček, o který se zasloužil švýcarský profesor pražské univerzity Harlacher. Vývoj systému počítání otáček se nakonec díky posunu v elektronice dostal do bodu, kdy elektronický čítač impulzů vysílá signály při každé otáčce po dobu, kterou lze předem nastavit. [1]

Důležitým jménem pro další vývoj vrtulí je Albert Ott, který v roce 1873 založil firmu „Mathematisch-Mechanisches Institut A. OTT“. O dva roky později začali vyrábět hydrometrické vrtule a pod názvem „OTT Hydromet“ v tom pokračují

dodnes. Za celou svou historii vyvinula firma celou řadu vrtulí. Vedle této značky se formovala a dodnes zachovala i firma SEBA. Vznikly také firmy, které vyrábějí netradiční modely vrtulí. Mezi ty tradiční však patří vrtule Woltmannova typu, která je rozšířená především v Evropě. Ve Spojených státech šel vývoj vlastní cestou. Inženýr W. G. Price přišel v roce 1885 s typem vrtule se svislou osou. Její hlavní výhodou je, že zatímco při měření vrtulí s horizontální osou je nezbytné, aby byla nastavena rovnoběžně s proudem, jinak nereaguje správně, výsledky z měření Priceovou vrtulí nejsou na vektoru rychlosti závislé. Dále je uváděno, že vrtule s horizontální osou mají větší nepřesnosti, obzvláště dojde-li na menší rychlosti proudění. Vrtule Priceova typu jsou navíc snazší ke konstrukci. I přes tato fakta převažují výhody Woltmannovy vrtule natolik, že se začínají dostávat ke slovu i tam, kde doposud převládaly vrtule Priceovy.



Obrázek 3 - Priceova vrtule typu AA [1]

Dnes jsou většinou k dostání celé sety s vrtulemi různých velikostí a tvarů, což poskytuje značnou flexibilitu a možnost hydrometrické vrtule použít v široké škále podmínek. [1]



Obrázek 4 - Příkladů různých vrtulí od firmy SEBA [5]



Obrázek 5 - Sada na měření hydrometrickou vrtulí SEBA [5]

### 2.1.2. Princip měření

Vrtule se připevní na tyč se stupnicí, aby bylo snadno zjistitelné, v jaké se nachází hloubce. Tyč se používá zejména při měření na menších tocích, které lze brodit. U větších toků se vrtule zavěšuje na lano.

K otáčející se vrtuli, která je připevněná na ose, se kabelem připojí počítač. To je ovládáno kontaktem, který se spíná otáčením vrtule. Jak je již zmíněno výše, tento signál je vysílán při každé otočce. Dříve byl impuls zaznamenán při každé desáté, dvacáté, dvacáté páté nebo padesáté otáčce. Dnes v laboratorním prostředí existují dokonce takové přístroje, které vysílají impuls i šedesátkrát za otáčku. Díky známému počtu otáček a času je pak určena rychlost proudění díky kalibrační rovnici. Další možností je, že vrtule roztáčí dynamo, které pak namísto impulsů vysílá napěťový signál, který je rychlosti úměrný. [2]

Při měření se buď zvolí časový interval  $T$ , během kterého se určují otáčky vrtule  $N$ , nebo se měří čas  $T$  potřebný k dosažení určeného počtu otáček vrtule  $N$ . První ze zmíněných postupů se používá spíše u moderních zařízení, které vysílají signál po každé otáčce, druhý pak spíše u vrtulí starších, které signál dávají po více otáčkách. Existují však i typy, u kterých má uživatel možnost výběru z obou způsobů. [2]

Cestou k získání rychlosti v bodě  $v$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] je pak vypočtení kalibrační rovnice vrtule. Kalibrační rovnice vrtule je dána normou ČSN ISO 3455 ve tvaru

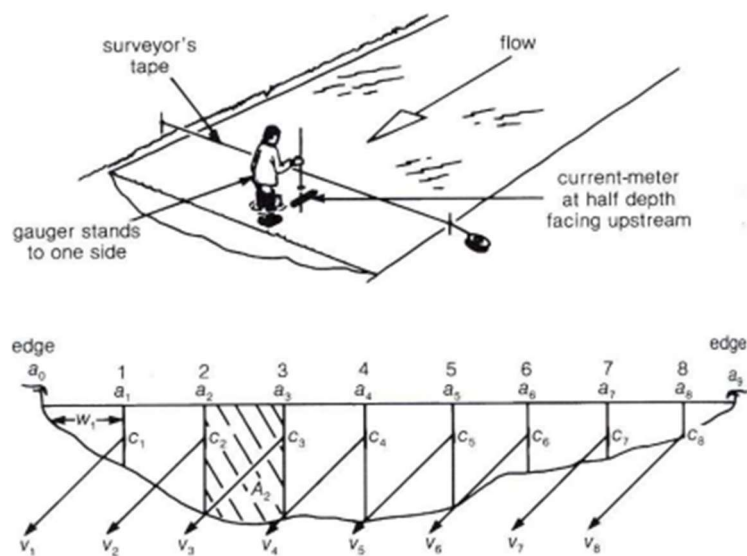
$$v_i = \alpha_i * \beta_i * n$$

kde  $n = N/T$  [ $s^{-1}$ ] a  $\alpha_i$  a  $\beta_i$  jsou kalibrační konstanty vrtule. Tyto konstanty platí v uvedeném rozsahu specifických otáček  $n$ . Počet jednotlivých lineárních úseků rovnice  $i$  by neměl překročit hodnotu tři. Podrobněji konstanta  $\alpha$  odpovídá přibližně minimální rychlosti proudění a  $\beta$  se blíží stoupání propeleru vrtule. [2]

Při určování průtoku z bodových rychlostí je nutné rozvrhnout, kam vrtuli umístit. Zájmový profil je tedy třeba po šířce rozdělit do několika pruhů o určité vzdálenosti a v každém pruhu uskutečnit několik měření v daných hloubkách. Čím hustější síť měření bude, tím se dospěje k výsledku bližšímu realitě. Rozdělení profilu může vypadat tak, že je-li hloubka některé části menší než 0,5 metru, stačí měření v jednom bodě, čímž rovnou získáme střední svislicovou rychlost  $v_s = v_{0,4hloubky}$  [ $m \cdot s^{-1}$ ]. Při hloubkách mezi 0,5 až 1 metrem se měří bodová rychlost ve dvou bodech na svislici a střední svislicovou rychlost získáme dopočítáním podle vzorce  $v_s = (v_{0,2h} + v_{0,8h}) / 2$  [ $m \cdot s^{-1}$ ]. Při hloubkách větších než 1 metr, měříme na svislici v pěti bodech a svislicovou rychlost dopočteme vzorcem  $v_s = (v_{dno} + 2v_{0,2h} + 3v_{0,4h} + 3v_{0,8h} + v_{hladina}) / 10$  [ $m \cdot s^{-1}$ ]. Konečný výpočet průtoku je pak proveden graficko-početní metodou vzorcem

$$Q = \sum (F_i + v_i)$$

kde  $F_i$  [ $m^2$ ] je dílčí plocha jedné části, kterou získáme násobením její šířky a hloubky a  $v_i$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] je střední svislicová rychlost daného úseku. [2]



Obrázek 6 - Měření rychlosti proudění v příčném profilu toku [4]

### 2.1.3. Výhody a nevýhody

Výhodou Hydrometrické vrtule je její jednoduchost a spolehlivost výsledků. Tato metoda je díky rozmanitosti velikostí a tvarů použitelná na větších i menších tocích, avšak rychlosti by se měly pohybovat mezi  $0,025 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . [2]

Profil, ve kterém by měl být měřen průtok by však měl být co nejrovnější. Tedy by měl být bez větších překážek jako je hustý porost či větší kameny. Ze špatného změření či odhadu průtočné plochy profilu pak mohou plynout nepřesnosti. Vhodné je zbudování stálých měrných profilů, není to však nezbytností. Další nevýhodou je také nemalá pořizovací cena. [1]

### 2.1.4. Využití

Díky své mobilitě a rozmanitosti je metoda měření hydrometrickou vrtulí velmi univerzální. Je použitelná pro malé i relativně vodnaté toky a všude je její aplikace poměrně snadná a rychlá. Navíc není potřeba převážet velké množství různého náčiní. Problémem však mohou být toky mělké a koryta s bohatou vegetací, negativní dopad na výsledky by také mělo proudění turbulentní a veliký spád.

Pokud by měla být tato metoda využita pro měření v nátoku na malou vodní elektrárnu, bylo by ideální použít sestavu i několika desítek vrtulí pro změření co nejvíce bodových rychlostí ve stejný okamžik, aby byl výsledek co nejpřesnější. Měření s jednou vrtulí bychom dostatečně přesného výsledku nedosáhli.





Obrázek 7 - Hydrometrická vrtule OTT C2 [1]

## 2.2. Plováková metoda

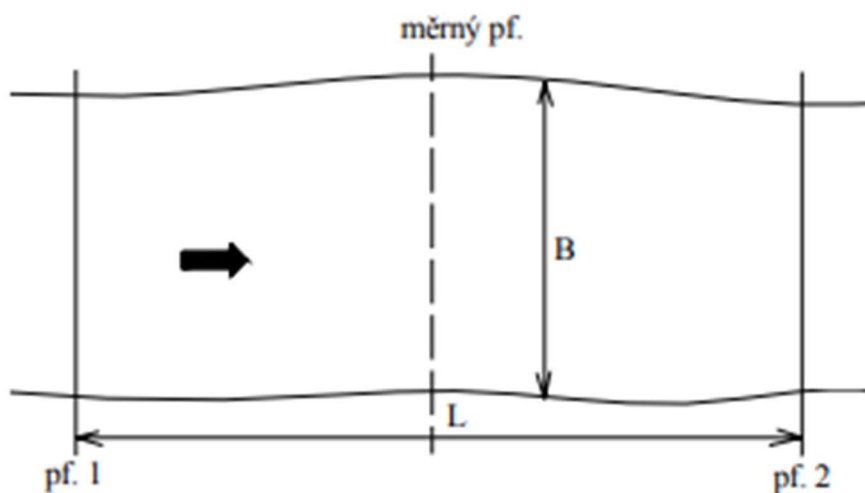
Tato metoda je velmi prostá a jednoduchá a není k ní potřeba žádná speciální technika. Umožňuje měření povrchových rychlostí, díky kterým se dá odhadnout rychlost proudění v celém profilu. Je vhodná v okamžiku, kdy není možné použití jiné metody měření pro bodové rychlosti.

### 2.2.1. Princip a postup měření

Prvním krokem je volba vhodného úseku toku, kde bude měření probíhat. Správnost tohoto kroku je opravdu důležitá a zcela na něm závisí správnost výsledku celého měření. Měrný úsek by měl být rovný s konstantním profilem a rovnoměrným rozdělením rychlostí. Dále je třeba určit délku měrného úseku  $L$ . Ta by se měla zvolit tak, aby doba, za kterou ji plovák urazí, byla delší, než 20 s. U širokých toků se pro hrubý nástřel používá vztah  $L = 2B$  kde  $B$  je šířka toku při hladině. U toků menších se vztah úměrně upravuje na  $L = (2 - 5)B$ . Na úseku o této délce se na břehu vytyčí začátek a konec a pro případné měření průtoku i střed, kde se bude nacházet měrný profil. Z těchto bodů se potom vedou kolmice, čímž se vyznačí potřebné profily. Profil koryta řeky se může zaměřit buď pouze ve středu úseku a s tímto profilem se počítá do celé délky úseku. Přesnější

variantou je zaměření všech tří profilů a následné zprůměrování pro získání průtočné plochy. [2]

Vedle přípravy měrného úseku je nutné připravit dostatečné množství shodných plováků. Ty musí být z plovoucího materiálu (např. dřevo) a ve vodě dobře viditelné. Ty se potom postupně pouští do vody v dostatečné vzdálenosti od začátku měrného úseku, aby v něm již plovák dosáhl rychlosti proudu. Ze břehu se změří čas, za který plovák trať urazil. Vhodné je zaměřit čas i ve středu úseku pro zkontrolování rozdělení rychlostí po celé délce úseku. Pro měření rychlosti je třeba umístit plovák do proudnice toku, měření se alespoň 3 – 5krát opakuje (pro získání průtoku by bylo třeba plováky pouštět ve více místech po šířce toku). Naměřené rychlosti plováků, které z trasy proudnice vybočí, se do výsledného měření nezapočítávají. Také rychlosti, které se velmi liší od ostatních do výsledků, se z měření vyloučí. Díky naměřenému času a známé délce se nejprve vypočtou rychlosti jednotlivých plováků a následně celková maximální povrchová rychlost se určí jako aritmetický průměr tří plováků s nejvyšší rychlostí. [2]



Obrázek 8 - Měrný úsek [2]

### 2.2.2. Výhody a nevýhody

Největší výhodou je jednoznačně její jednoduchost. Pro využití této metody není potřeba žádného složitého zařízení, je tedy i velmi levná. Díky improvizaci je také možné ji realizovat i když dopředu s měřením nepočítáte, ale z nějakého důvodu je potřeba. Může tedy ušetřit i čas. Navíc v některých situacích jsou jiné

metody nepoužitelné, např. při velkém znečištění vody nebo velmi malých rychlostech.

Ovšem s jednoduchostí přichází i nepřesnost. Aby byly nepřesnosti co nejmenší, je žádoucí dodržet několik podmínek, a to dbát na správný výběr měrného úseku a dát si pozor na případné spodní, boční a turbulentní proudy.

### **2.2.3. Využití**

Plováková metoda se dá využít pro měření maximální bodové rychlosti i průtoku v korytě. Je to metoda vhodná pro malé rychlé horské toky i pro velké řeky. Tato metoda je záchranou, když všechny ostatní metody selžou, když není potřeba nejpřesnějšího měření, ale důležitější je rychlost a jednoduchost. Užitečná je i za výjimečných stavů, jako jsou kupříkladu povodně.

Jelikož je tato metoda velice nepřesná, k měření na vtoku malé vodní elektrárny by byla naprosto nevhodná.

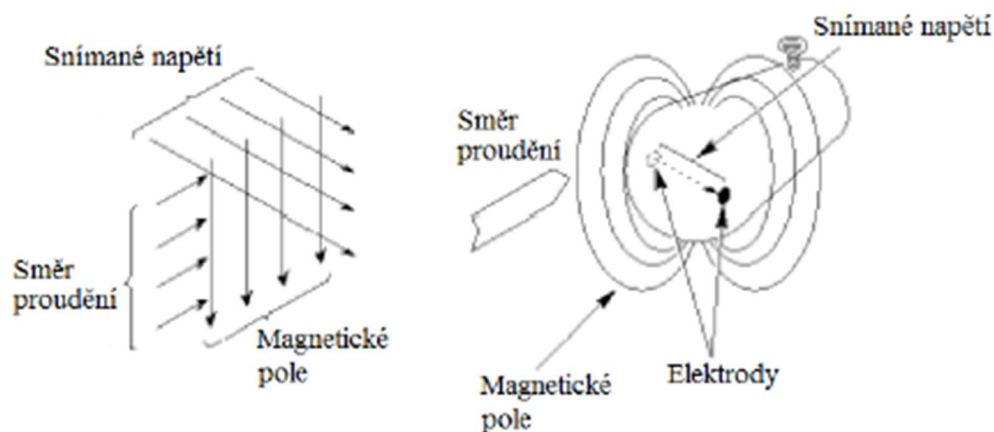
## **2.3. Elektromagnetický indukční metoda**

### **2.3.1. Princip a postup měření**

Tato metoda je založena na Faradayově zákoně, který říká, že velikost indukovaného napětí je přímo úměrná změně magnetického indukčního toku v čase. [3]

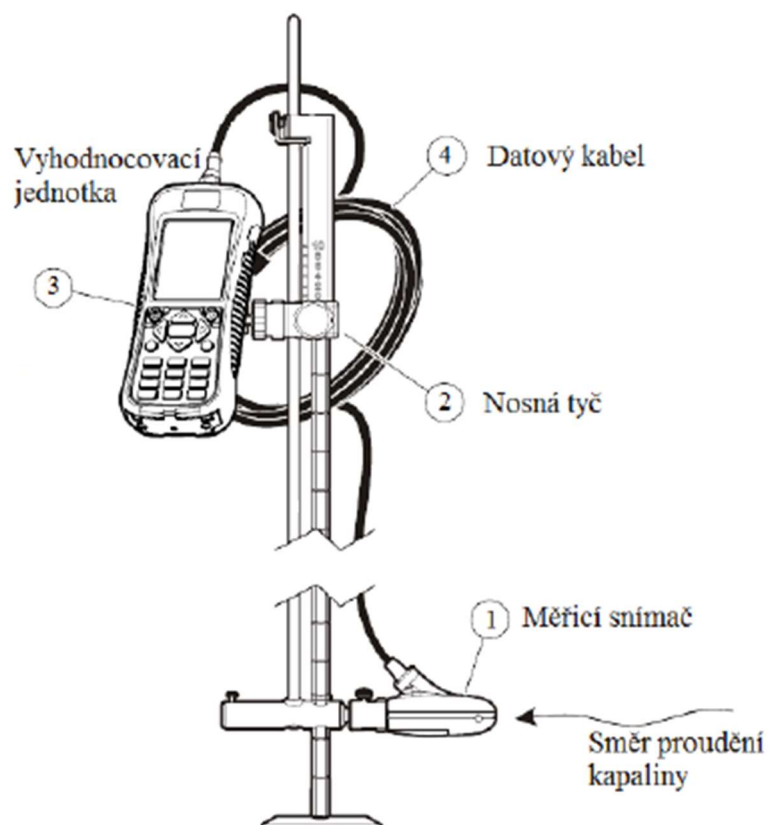
Pokud voda proudí přímo na přední stran měřícího snímače, pak jsou směr proudící kapaliny, magnetické proudění a snímané napětí vzájemně kolmé. Díky tomu je výstupní napětí na elektrodách přímo úměrné výsledné rychlosti proudění. [3]

Součástí měřícího snímače tohoto přístroje je elektromagnetická cívka, která kolem sebe vytváří elektromagnetické pole. Rychlost proudící vody, která v tomto případě hraje roli elektrického vodiče, indukuje napětí. To je měřeno dvojicí uhlíkových elektrod a následně elektronickým zařízením převedeno na rychlost. [3]



Obrázek 9 - Princip měření rychlosti kapaliny měřícím snímačem [3]

Celá měřící soustava se skládá z měřícího snímače upevněného na nosné tyči. Zároveň je propojen datovým kabelem s vyhodnocující jednotkou. V té se obvykle nachází akumulátor, který je zdrojem elektrické energie pro celé zařízení.



Obrázek 10 - Sestava elektromagnetického indukčního měřidla [3]

Jelikož přístroj slouží v této podobě k měření bodových rychlostí, postup měření je téměř totožný jako při měření hydrometrickou vrtulí, pouze s jinou technologií.

### **2.3.2. Výhody a nevýhody**

Výhodou elektromagnetického indukčního je jeho uživatelská přívětivost. Ovládání je intuitivní, údržba velmi nenáročná. Měření je automatické a výsledek je ihned čitelný na barevném displeji vyhodnocovací jednotky. [4]



Obrázek 11 - Ovládací jednotka OTT MF pro [3]

### **2.3.3. Využití**

Využití tento přístroj najde u otevřených koryt i kanalizací. Přístroj je vhodný pro velmi nízké rychlosti, poradí si i se zarostlými profily a turbulentními podmínkami proudění. Zvládne i velmi znečištěné vody. Použít se dá také jako kalibrace či kontrolní měření. [4]



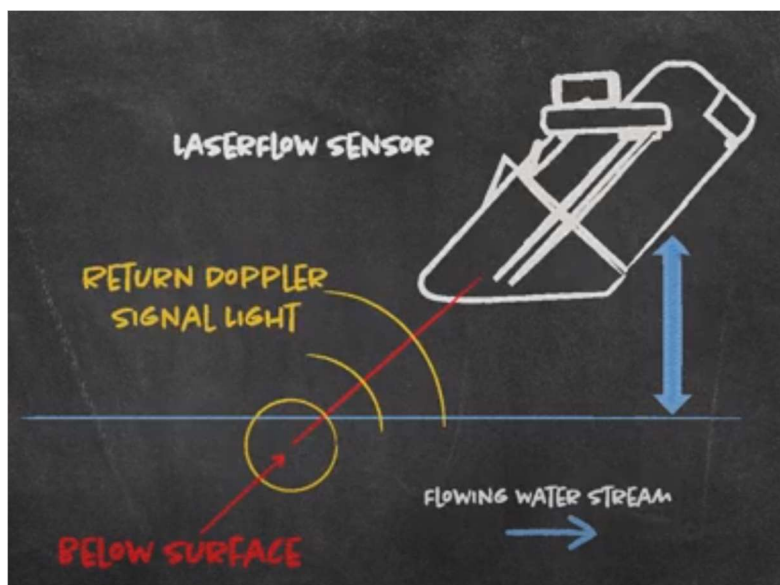
Obrázek 12 – Měřicí snímač OTT MF pro [4]

## 2.4. Laser

Měření laserem umožňuje kontinuální bezkontaktní měření. Laser dokáže zaměřit rychlost ne jenom na hladině, ale v celém toku.

### 2.4.1. Princip měření

Rychlost proudění v toku je měřena díky laserovému paprsku na základě Dopplerova jevu. Ten je s ohledem na hloubku vysílán pod hladinu, kde si automaticky zvolí vhodné místo a zaznamená frekvenční posun vracejícího se paprsku. Touto metodou je možné změřit mnoho bodů v řadě a výsledkem je potom rychlostní pole celého profilu. Příklad je zároveň vybaven ultrazvukovým senzorem, který měří výšku hladiny. Po naměření rychlosti se výsledek vynásobí obsahem příčného profilu koryta, který je zadáván softwarově. Tím je získán průtok. [5] [6]



Obrázek 13 - Princip měření laserem [6]

### 2.4.2. Výhody a nevýhody

Pro laserový přístroj nejsou překážkou sedimenty či hrubé nečistoty. Poradí si i v případě nízkých hladin a vysokých rychlostí. Problém může nastat u zpětného vzduť. Při případném zatopení pokračuje měření na základě Dopplerově ultrazvukové technologie. [6]

### **2.4.3. Využití**

Přístroj je vhodný především pro měření na odtoku čistíren odpadních vod a z průmyslových podniků. Vhodné je to z důvodu relativně konstantních průtoků v těchto objektech.



*Obrázek 14 - LaserFlow Velocity Sensor od Teledyn ISCO [6]*

## **2.5. Radar**

Radary dokážou změřit povrchovou rychlost, díky které je následně vypočten průtok ve známém profilu.

### **2.5.1. Princip měření**

Každou sekundu vysílají radary velké množství signálů, které poté přijímají zpět a zpracovávají. Technologie zpracování signálu musí být tedy velice precizní a přístroj nutností je také správná kalibrace. [7]



Obrázek 15 - OTT SVR 100 [8]

### **2.5.2. Výhody a nevýhody**

Radarové měření je bezkontaktní, umístěný vysoko nad hladinou. Je tedy chráněn od plovoucích nečistot. Jeho aplikace je velice flexibilní. Výsledky jsou poměrně přesné, i když ve srovnání s technologiemi měřícími i pod hladinou dosahují nižších přesností. [8]

### **2.5.3. Využití**

Radarový přístroj je vhodný pro měření v otevřených korytech a řekách. Vhodný je také pro přívodní i odtokové kanály čistíren odpadních vod či průmyslových závodů. [8]

## **2.6. Ultrazvuková měřidla s pevnou instalací**

Tento princip spočívá na Dopplerově jevu, průtok je měřen díky časové prodlevě zvukového signálu. Na protilehlých stěnách koryta jsou umístěna ultrazvuková čidla vysílače a přijímače. [4]

### **2.6.1. Princip měření**

Čidla jsou vůči sobě po směru koryta posunuta. Šíření zvukového signálu má ve vodě různé prodlevy, a právě jejich rozdíl čidlo zaznamenává a vyhodnocuje.



Při měření proti proudu vody se doba, za kterou signál vzdálenost urazí, s rychlostí prodlužuje. Naopak při měření po proudu se doba s vyšší rychlostí snižuje. Díky známé vzdálenosti mezi čidly a naměřené časové prodlevě je spočítána průměrná profilová rychlost v podobě úhlové složky rychlosti. Vynásobením průměrné profilové rychlosti a průtočné plochy je pak získán okamžitý průtok. [3]

### **2.6.2. Využití**

Toto měření je vhodné pro kontinuální měření v otevřených korytech a kanálech.



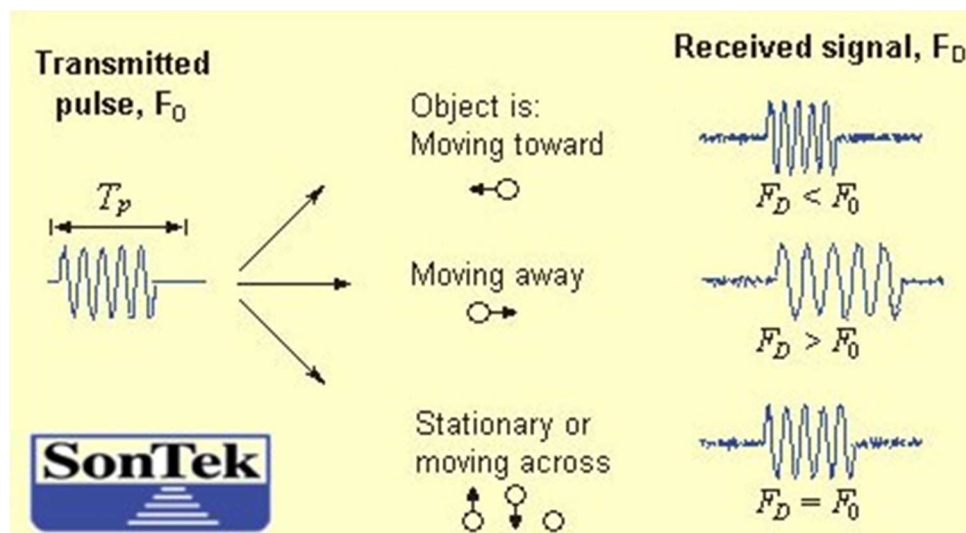
*Obrázek 16 - OTT SLD [4]*

## **2.7. ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)**

### **2.7.1. Princip a postup měření**

Přístroj ADCP funguje na principu Dopplerova jevu. Sonar pod sebe z hladiny vysílá ultrazvuk. Tento signál se po odrazu od nerozpuštěné částice vrací zpět, kde ho sonar přijme a analyzuje změnu jeho frekvence. Tato změna je dána posunem částic nerozpuštěných ve vodě. Na obrázku níže lze vidět, že

při pohybu částic směrem k přístroji se signál vrací se zkrácenou délkou frekvence a obráceně. Zůstává-li vlnová délka nezměněna, pohyb částic, od kterých se signál odrazil, je buď napříč, nebo se tato částice nehýbe vůbec. [9]



Obrázek 17 - Změna frekvence vysílaného ultrazvuku [9]

Přístroj ADCP se skládá ze 4 hlavních částí. Sondy, která vysílá a přijímá signál, modemem pro online komunikaci, plastové lodičky, pomocí které se celé zařízení drží na hladině, a počítač s potřebnou aplikací, která plně automaticky během pár okamžiků provede výpočet. Plovák bývá připevněn na kladkový systém či lano natažené přes profil, pomocí kterého je tažen po hladině. [10]



Obrázek 18 - Teledyne RD Instruments StreamPro ADCP [1]

Během přetahování vysílá a přijímá čidlo signály, které rovnou online posílá do počítačové aplikace, kde hned proběhne výpočet a prezentace výsledků v určité grafické formě.

Zařízení ADCP existuje i v podobě mobilního měřiče, který je nutné vždy ručně podržet na hladině, než se provede měření.



Obrázek 19 - HydroProfiler M-Pro [11]

### **2.7.2. Výhody a nevýhody**

Systém ADCP je velmi přesný a nabízí vysoké rozlišení. Průměrná rychlost je měřena v různých hloubkách po celém profilu. Díky nízké časové prodlevě při celém měření je výsledek velice přesný, zhruba s +/- 1 % rychlosti vody. Vysoké je i rozlišení měřeného profilu. [11]

### **2.7.3. Využití**

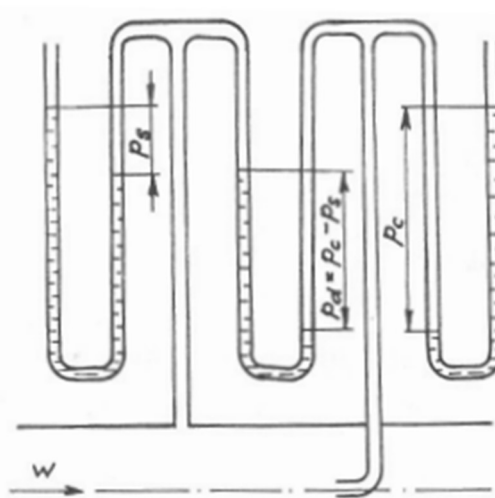
ADPC přístroje jsou vhodné od malých po velké toky, omezení hloubky závisí již na konkrétním produktu. Například Teledyne RD Instruments StreamPro ADCP od SEBA Hydrometrics dosáhne v základní verzi do 2 metrů, ve verzi rozšířené do 6 metrů. Vedle toho OTT Qliner 2 dosáhne až do 20 metrů. Někteří výrobci jsou schopni dosáhnout měření v hloubkách až 50 metrů.

Tato metoda by měla zajistit přesné výsledky i v případě pohyblivého dna.

## 2.8. Pitotova trubice

Další veličinou, pomocí které se dá změřit rychlost proudění je tlak. Na tomto principu funguje tzv. Pitotova trubice pojmenována po svém objeviteli Henri Pitotovi, který s touto myšlenkou přišel na počátku 18. století. Hodnota tlaku proudící kapaliny nabývá ve dvou různých profilech různých hodnot a díky dosažení jejich rozdílu do Bernoulliho rovnice lze získat rychlost.

Tento způsob měření rychlosti je využíván především pro měření plynů nebo velice čistých kapalin. Při měření v nátoku na vodní elektrárnu by hrozilo ucpání otvoru trubic proudícími nečistotami. [12]



Obrázek 20 - Schéma principu Pitotovy trubice [12]

## 2.9. Stopovací zkoušky

Metoda stopovacích zkoušek je velmi stará metoda, ovšem do nedávna poměrně opomíjená. Dnes se jedná o celkem často používanou chemickou metodu, která je založena na použití stopovače. Stopovač je látka, která je ve vodě velmi stabilní. Nesorbuje, ani se nerozpouští. Po aplikaci v jednom profilu se po dané vzdálenosti změní v měrném profilu, jak moc se látka stihla rozředit.

Používají se dvě různé metody tohoto principu, směšovací a integrační. [10]

### 2.9.1. Směšovací metoda

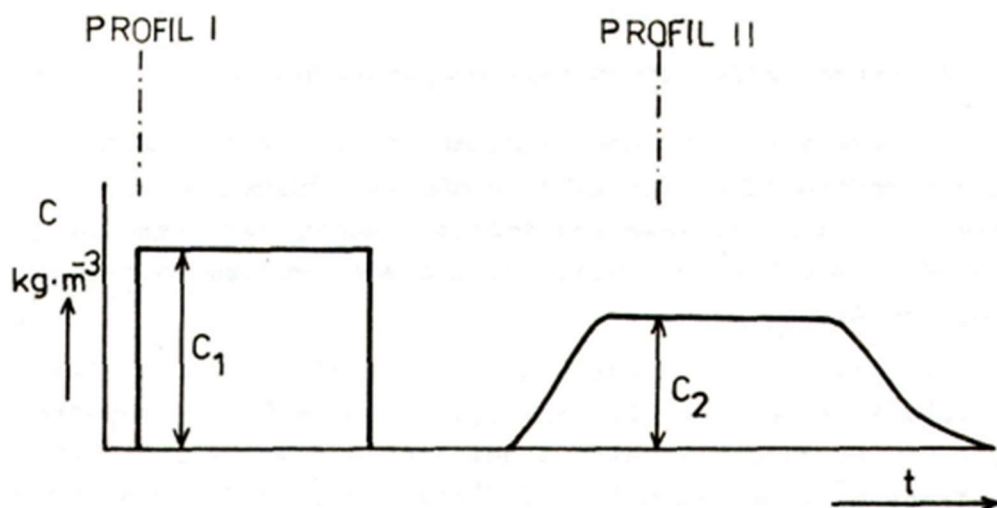
Princip této metody spočívá v určení rozdílu koncentrací použité látky. Často používanými látkami jsou chlorid sodný, manganistan draselný

nebo fluorescenční barvivo. Koncentrace aplikovaného roztoku je známá a s velikostí průtoku se úměrně mění.

V horním profilu je do toku konstantně přidáván stopovač. Je důležité, aby byla aplikace rovnoměrná, proto probíhá buď z obou břehů, nebo i na více místech průběžně napříč profilem. Když dojde k dokonalému promíchání, změří se nová koncentrace v měrném profilu a hodnoty se dosadí do rovnice

$$Q = q * \left( \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0} \right)$$

kde  $q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] je průtok dávkovaného stopovače,  $C_1$  [ $\text{S.m}/\text{mm}^2$ ] je jeho koncentrace,  $C_2$  [ $\text{S.m}/\text{mm}^2$ ] je koncentrace v měrném profilu a  $C_0$  [ $\text{S.m}/\text{mm}^2$ ] je koncentrace bez stopovače. [10]



Obrázek 21 - Průběh koncentrací [10]

### 2.9.2. Integrační metoda

Integrační metoda se od směšovací liší tím, že namísto konstantního přidávání stopovače je tento přidán jednorázově ve známém objemu. Jinak jsou oba principy obdobné, v měrném profilu se po dokonalém smíchání změří koncentrace a výpočet pokračuje podle následující rovnice:

$$Q = V * \frac{C_1}{t(C_2 - C_0)}$$

Kde  $V$  [ $\text{m}^3$ ] je objem dávkované látky,  $C_1$  [ $\text{S.m/mm}^2$ ] její koncentrace,  $t$  [s] je čas, za který se dostane do měrného profilu,  $C_2$  [ $\text{S.m/mm}^2$ ] koncentrace stopovače právě při jeho průchodu a konečně  $C_0$  [ $\text{S.m/mm}^2$ ] je opět koncentrace v pozadí. [13]

### **2.9.3. Výhody a nevýhody**

Výhodou je, že tato metoda se dá využít v horších podmínkách, ve kterých by selhávaly některé jiné metody. Není nutné, aby bylo koryto rovné, proudění může být nepravidelné a na rychlosti proudění také nezáleží.

Můžeme z ní ovšem dostat i poměrně nepřesné výsledky, obzvláště, pokud nedojde k řádnému promísení stopovače s vodou.

### **2.9.4. Využití**

Nejvýhodnější je tato metoda v případě malých profilů s kamenným dnem, kde by se jiné metody využívaly jen stěží. Ideální jsou tedy například malé bystřinné toky, kde navíc díky turbulentnímu proudění dojde k dokonalému promísení aplikované látky.

Pro přírodní koryta malých vodních elektráren by se tedy o této metodě zřejmě ani neuvažovalo.

## **2.10. Shrnutí**

Existuje velká spousta možných způsobů měření rychlostí a průtoků. Důležité je zorientovat se v tom, co trh nabízí a zvolit si správně podle toho, co se od měřidla očekává. Při výběru budou rozhodovat především poměr požadované přesnosti, náročnosti měření a cena.

Pro využití v souvislosti s vodní elektrárnou by z výše zmíněných technologií byly nevhodnější přístroje ADCP, které se vyznačují vysokou přesností. Navíc velmi rychle a komfortně nabídne ucelený obraz o průběhu rychlostí v celém profilu. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena, která ovšem bude pravděpodobně s časem a dalším vývojem klesat. Pro kontinuální měření by byly vhodné pevné přístroje založené také na Dopplerově jevu.

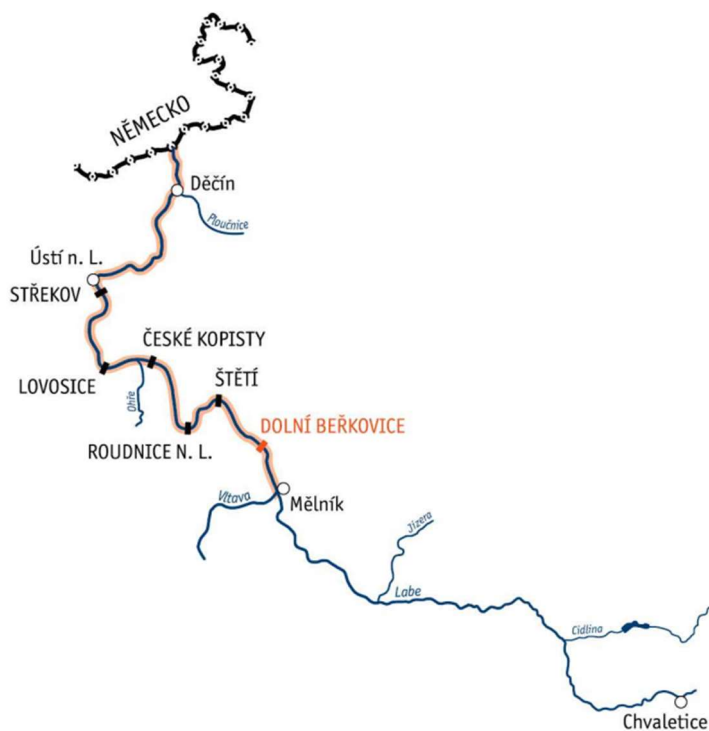
### 3. VODNÍ DÍLO MVE LIBĚCHOV

#### 3.1. Základní informace

Výstavba malé vodní elektrárny Liběchov byla zahájena v roce 2005 a nachází se v říčním kilometru 830,6 řeky Labe, což je přibližně 7 km po proudu od soutoku Labe s Vltavou. Je postavena v jedné linii s jezem Dolní Beřkovice a dvěma plavebními komorami.



Obrázek 22 - Umístění MVE Liběchov



Obrázek 23 - Poloha jezu Dolní Beřkovice [14]



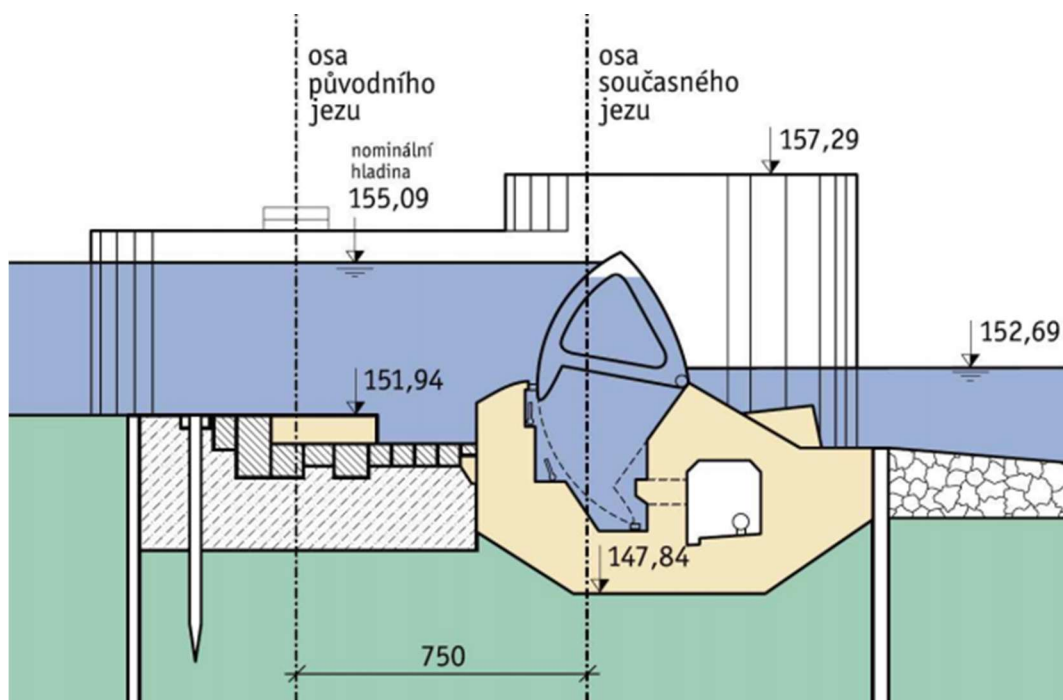
### 3.2. Vývoj profilu

Realizace jezu Dolní Beřkovice a malé a velké plavební komory započala již v roce 1903. Tento projekt byl financován Rakousko-Uherskem a Českým královstvím v rámci budování vodní cesty na Labi a Vltavě. Vedle pohyblivého hradlového jezu o třech polích a plavebních komor se zde nacházela ještě vorová propust a rybí přechod. [14]

V 60. letech 20. století proběhla významná rekonstrukce. Jejím hlavním účelem byla celoroční splavnost. Kvůli náročné a nebezpečné údržbě během zimních vodních období byl jez přestavěn na hydrostatický sektorový. Počet polí zůstal nezměněn. Malá plavební komora s klapkovými vraty je po rekonstrukci dlouhá 85 m a velká plavební komora dosahující užžitnou délkou 200 m byla osazena pokloповými vraty Čábelkova typu. [14]



Obrázek 24 - Schématická situace plavebních komor [3]



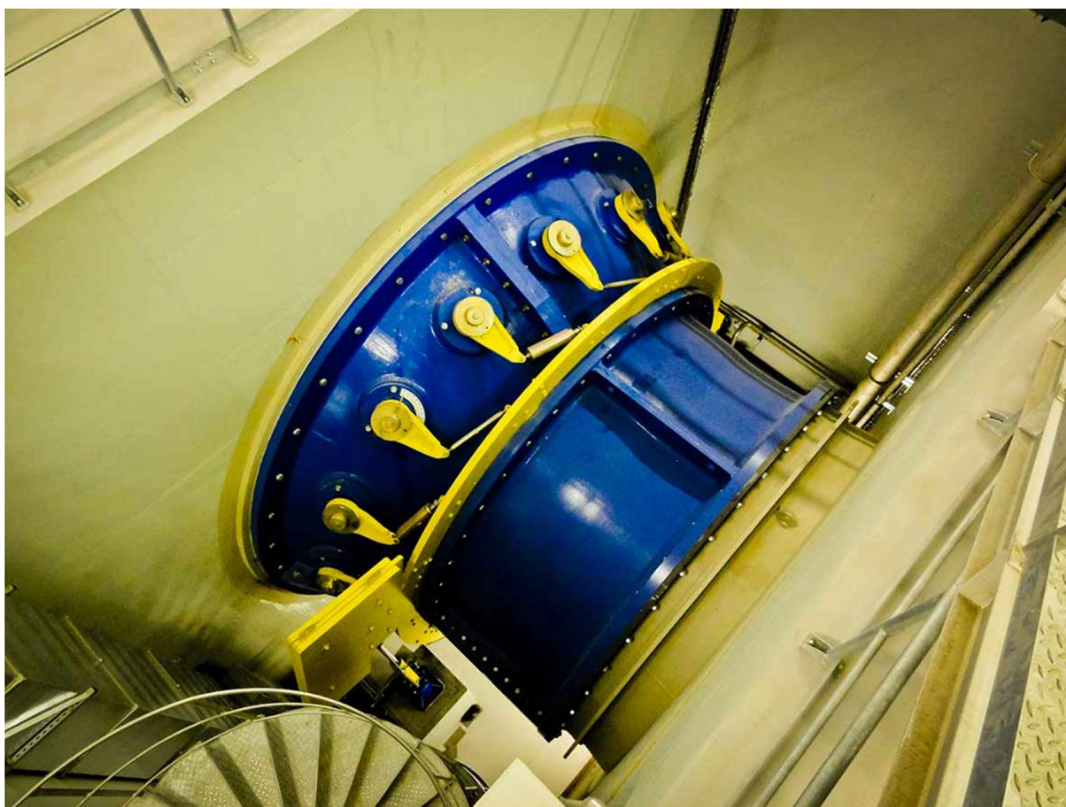
Obrázek 25 - Schématický příčný řez jezovým polem [3]



### 3.3. MVE

Na místě původní vorové propusti začala v roce 2005 vznikat malá vodní elektrárna jezového typu. Podmínky, ve kterých vznikala, byly prostorově a staticky neobvyklé. Značně omezující byl pro projekt fakt, že se celá stavba musela vměstnat mezi pravý koncový pilíř jezu a těleso rychlostní železniční trati Praha – Děčín. Ta navíc vede na vyvýšené ploše nad prudkým svahem. Základy dosují hloubky 16 metrů pod úroveň hladiny. Na výstavbu se spotřebovalo 16 tis. m<sup>3</sup> speciálního odolného betonu a 3 tis. tun ocelových výztuží. Průběh výstavby první etapy byl náhle pozastaven povodní v roce 2013, čímž se celková doba realizace prodloužila na 9 let.

Stěžejními objekty této elektrárny jsou dvě kaplanovy turbíny typu pit. Voda proudí nátokovým kanálem přes jemné česle na pit, ve kterém je generátor a převodovka. Pit je z obou stran obtékán vodou, která se následně spojuje do rozváděcího kola. To má 16 rozváděcích natáčecích lopat, které nasměrovávají vodu na oběžné kolo o 3 lopatách. Dál voda proudí do savky, což je rozšířený prostor, ve kterém se voda zpomaluje, a vzniklým podtlakem napomáhá urychlení průtoku vody turbínou. [15]



Obrázek 26- Pohled na rozváděcí kolo turbíny MVE Liběchov [8]

Celkový instalovaný výkon elektrárny činí 3515 kW a potřebuje alespoň 8hodinový denní nepřetržitý provoz pod dohledem profesně kvalifikované osoby. Stavba vodní elektrárny je dimenzována na 1000letou vodu.

Tabulka 1 - Provozní data z řídicího systému

Kaplanova turbína typu PIT	TG1	TG3	
Rok spuštění provozu	2013	2014	
Průměr OK	4500	3000	mm
Provozní otáčky	64	94	ot/min
Minimální průtok	20	10	m <sup>3</sup> /s
Účinnost v optimu	93.1	93.1	%
Optimální spád	2.44	2.34	m
Optimální průtok	60.92	26.51	m <sup>3</sup> /s
Výkon synchronního generátoru	2565	950	kW
Otáčky synchronního generátoru	750	1000	ot/min
Maximální výkon	2488	922	kW
Minimální výkon	357	132	kW
Optimální jednotkový průtok	1.92	1.92	m <sup>3</sup> /s
Optimální jednotkové otáčky	184.3	184.3	ot/min
Minimální jednotkový průtok	1.04	1.17	m <sup>3</sup> /s
Minimální jednotkové otáčky	303.58	297.25	ot/min
Maximální otevření při provozu	98	99	%
Rozdělení průtoků v poměru	2.2	1	
Osa turbíny	148.62	149.02	m n.m.
Celkový optimální průtok	87.43		m <sup>3</sup> /s
Celkový instalovaný výkon	3515		kW

## 4. PODKLADY

### 4.1. Archivní data z MVE Liběchov

Na žádost byla provozovatelem elektrárny zaslána archivní data. Konkrétně se jednalo o 8 vybraných provozních dnů, který každý z nich je něčím specifický a dává možnost utvořit si představu o fungování malé vodní elektrárny Liběchov za určitých stavů. V časovém kroku po jedné sekundě, byly poskytnuty tyto veličiny:

- otevření OK [%]
- otevření RK [%]
- otáčky [%]
- hladina před česlemi [m n.m.]
- hladina za česlemi [m n.m.]
- diference hladiny na česlích [mm]
- čistý spád [m]
- průtok turbínou [m<sup>3</sup>/s]

To vše zvláště pro turbínu TG1 a TG3. Dodané byly ještě informace o výšce hladin horní a dolní vody [m n.m.], průtok přes jez a přes elektrárnu [m<sup>3</sup>/s]. Pro doplnění informací o rozměry a tvar celého objektu byly přiloženy také výkresy.

## 4.2. Povodí Labe

Dalším podkladem byla časová řada šesti let poskytnutá z dispečinku státního podniku Povodí Labe. Záznamy začínaly rokem 2013, ovšem až od 27. 1. 2014 byl přidán záznam o průtoku přes jez a záznamy o průtoku přes elektrárnu byly přidány o měsíc později, tedy 27. 2. 2014. Data obsahovala v kroku 15 minut následující údaje:

- Relativní kóta horní hladiny od nominální hladiny VD Dolní Beřkovice [cm]
- Relativní kóta dolní hladiny od nominální hladiny VD Štětí [cm]
- Celkový průtok [m<sup>3</sup>/s]
- Průtok přes MVE [m<sup>3</sup>/s]
- Průtok přes jez [m<sup>3</sup>/s]

V příloze 1 jsou zobrazeny ukázky formátů .xlsx, ve kterých byly podklady poskytnuty.

Některé údaje (např. výška hladiny, průtok přes MVE) jsou poskytovány oběma zdroji, ovšem každý pochází z jiného snímače, proto se hodnoty liší. Níže je uveden orientační plánec umístění těchto snímačů.



Obrázek 27 - Plánek umístění sond

## 5. PROVOZNÍ STAVY

Malá vodní elektrárna Liběchov má k dispozici dvě kaplanovy turbíny – TG1 a TG3. To, za jakých podmínek je jaká kombinace těchto turbín používána, je dáno pravidly, která byla během provozu upravována, aby byl výsledný výkon maximalizován. Toto postupné upravování a doladování i malých detailů až během provozu je běžné, protože neexistují obecná pravidla, jak vodní elektrárnu provozovat. Každé dílo má své specifické podmínky, které je třeba vypořádat, aby nedocházelo ke zbytečným ztrátám.

### 5.1. Sóló provoz TG1

K sóló provozu turbíny TG1 dochází, když jsou průtoky nižší než přibližně  $84 \text{ m}^3/\text{s}$ . Provozovatelem elektrárny bylo vypořááno, že při  $83 \text{ m}^3/\text{s}$  je sóló provoz TG1 výhodnější, než souběh a při  $85 \text{ m}^3/\text{s}$  už je získaný výkon vyšší při souběhu obou strojů.

### 5.2. Souběh TG1 + TG3

Jak je již uvedeno výše, souběh je uveden do provozu při překročení průtoku  $84 \text{ m}^3/\text{s}$ , ovšem jen v případě, kdy se tento vyšší průtok očekává po delší dobu. Pro krátkodobé zvýšení průtoku by bylo nabíhání turbíny TG3 zbytečné a menší ze strojů by se navíc zbytečně opotřebovával.

### **5.3. Sólo provoz TG3**

Tento stav je velmi výjimečný a dochází k němu jen zřídka. Sólo provoz TG3 nastává většinou v okamžiku, kdy je třeba odstavit turbínu TG1. K tomu může dojít buď při revizi TG1, nebo při poruše.

Příklad průběhu tohoto stavu je popsán v datech ze dne 27.7.2016, kdy došlo k nejdelšímu sólo provozu TG3 za celou historii malé vodní elektrárny Liběchov. Servisní odstávka turbíny TG1 byla započata po poledni 26.7.2016 a protáhla se až do druhého dne. Celý tento provoz trval 15,5 hodiny.

Sólo provoz turbíny TG3 by byl výhodný ještě při nízkých průtocích, takových hodnot ale průtok většinou nenabývá. Funguje-li tedy stroj TG1, šetří se turbíně TG3 provozní hodiny.

## 6. VYHODNOCENÍ DAT Z MVE LIBĚCHOV

V následující tabulce je soupis poskytnutých dní. Ke každému dni je přiřazeno několik základních informací, které ho charakterizují. Jsou zde uvedeny podmínky, za kterých elektrárna fungovala, včetně stručného slovního popisu, který dává nejlepší představu o chodu v každém dni.

Tabulka 2 - Základní informace z měření MVE Liběchov

Označení	den 1		den 2		den 3		den 4	
Datum	03.05.2020		9.7.216		10.01.2015		14.04.2018	
Turbogenerátor	TG1	TG3	TG1	TG3	TG1	TG3	TG1	TG3
max průtok celkem [m <sup>3</sup> /s]	131.9		97.4		149.6		161.5	
min průtok celkem [m <sup>3</sup> /s]	72.9		70.5		88		152.4	
max průtok [m <sup>3</sup> /s]	116.5	42.4	97.4	0	102.1	47.5	110.4	51.1
min průtok [m <sup>3</sup> /s]	49.6	0	70.5	0	56.2	31.8	104	48.3
max spád [m]	2.57	2.61	2.47	2.54	1.87	1.92	2.18	2.27
min spád [m]	2.31	2.38	2.21	2.29	1.01	1.01	1.93	2.01
stručný popis dne	souběh, vypnutí TG3 pro potřeby měření		sólo provoz TG1 (průtok nepřesahuje 84 m <sup>3</sup> /s na delší dobu)		souběh – nárůst průtoku, 19 min po půlnoci odstavení		souběh TG1 a TG3	
Označení	den 5		den 6		den 7		den 8	
Datum	15.05.2018		21.08.2018		23.02.2017		27.07.2016	
Turbogenerátor	TG1	TG3	TG1	TG3	TG1	TG3	TG1	TG3
max průtok celkem [m <sup>3</sup> /s]	161.4		109		124.7		152.7	
min průtok celkem [m <sup>3</sup> /s]	48.5		48.3		0		46.6	
max průtok [m <sup>3</sup> /s]	116.3	50.4	109	0	83.8	40.9	105.1	49.2
min průtok [m <sup>3</sup> /s]	34.1	0	47.3	0	0	0	0	0
max spád [m]	2.59	2.62	2.61	2.64	1.37	1.41	2.14	2.13
min spád [m]	2.2	2.28	2.34	2.45	1	1	1.87	1.83
stručný popis dne	souběh TG1 a TG3, zachycení poklesu průtoku		sólo provoz TG1 (průtok nepřesahuje 84 m <sup>3</sup> /s na delší dobu)		odstavení od min výkonu (20:04 TG1 a 20:13 TG3)		sólo provoz TG3 – odstávka TG1	

### 6.1. Účinnostní charakteristika

Pro analyzování chodu elektrárny bylo třeba znát účinnostní charakteristiku. Ta jako součást utajovaných výrobních technických dat nebyla poskytnuta a bylo třeba jít cestou veřejně publikovaných zdrojů. Ta spočívala v nalezení takové

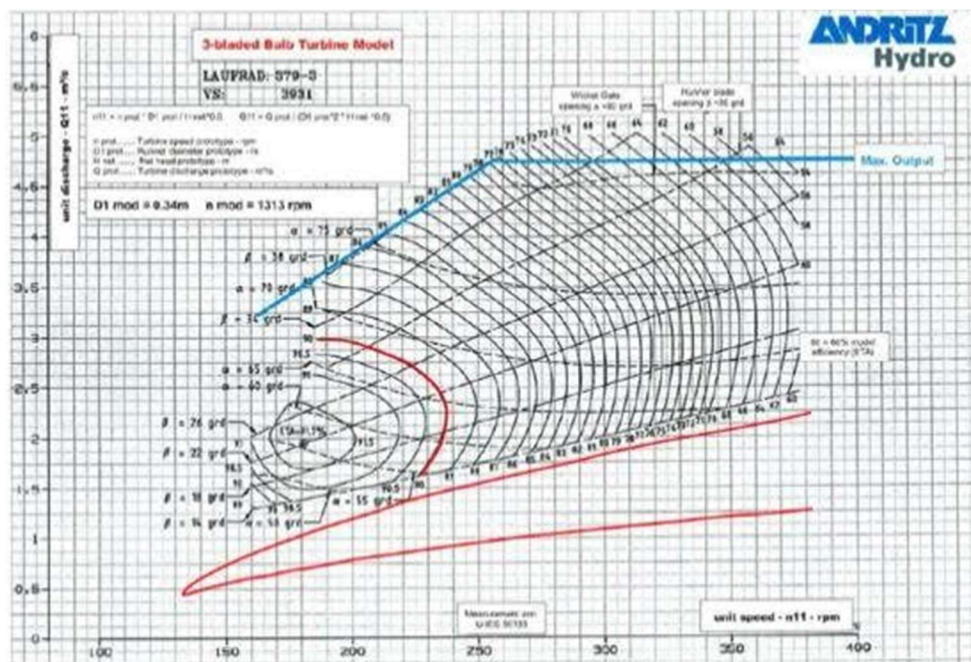


účinnostní charakteristiky, která by alespoň přibližně odpovídala stejnému bodu nejlepší účinnosti (BEP – Best Efficiency Point), jaký platí pro turbíny MVE Liběchov. Tento bod je definován jednotkovými charakteristikami, které jsou pro obě turbíny shodné, stačí tedy jedna univerzální účinnostní charakteristika.

Prvním krokem k jejímu získání byl tedy výpočet optimálních jednotkových otáček  $n_{11}$  [ot/s] a optimálních jednotkových průtoků  $Q_{11}$  [m<sup>3</sup>/s] ze známých optimálních hltností  $Q$  [m<sup>3</sup>/s], spádů  $H$  [m] a průměrů oběžných kol  $D$  [m] dle vztahů

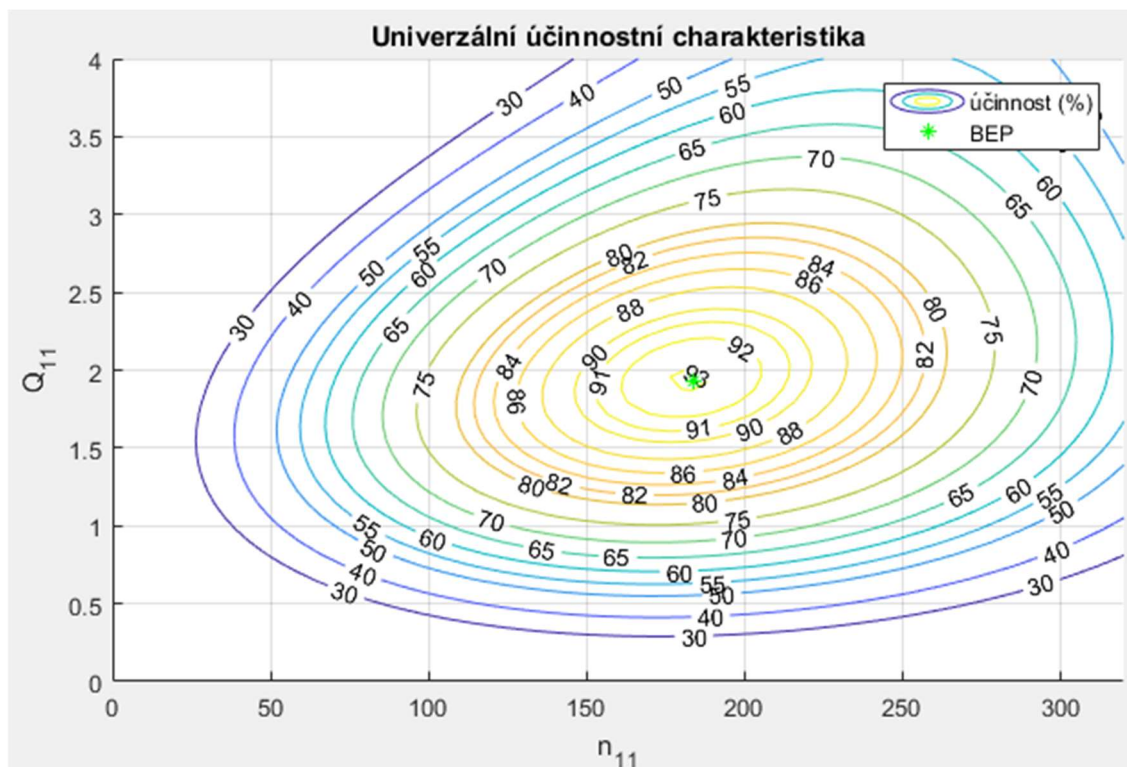
$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \sqrt{H}} \quad n_{11} = \frac{n * D}{\sqrt{H}}$$

Podle takto získaného bodu nejlepší účinnosti byla převzata účinnostní charakteristika od společnosti Andritz Hydro, která patří také kaplanově turbíně o třech lopátkách a má přibližně stejný bod nejlepší účinnosti.



Obrázek 28 - Univerzální účinnostní charakteristika Andritz Hydro

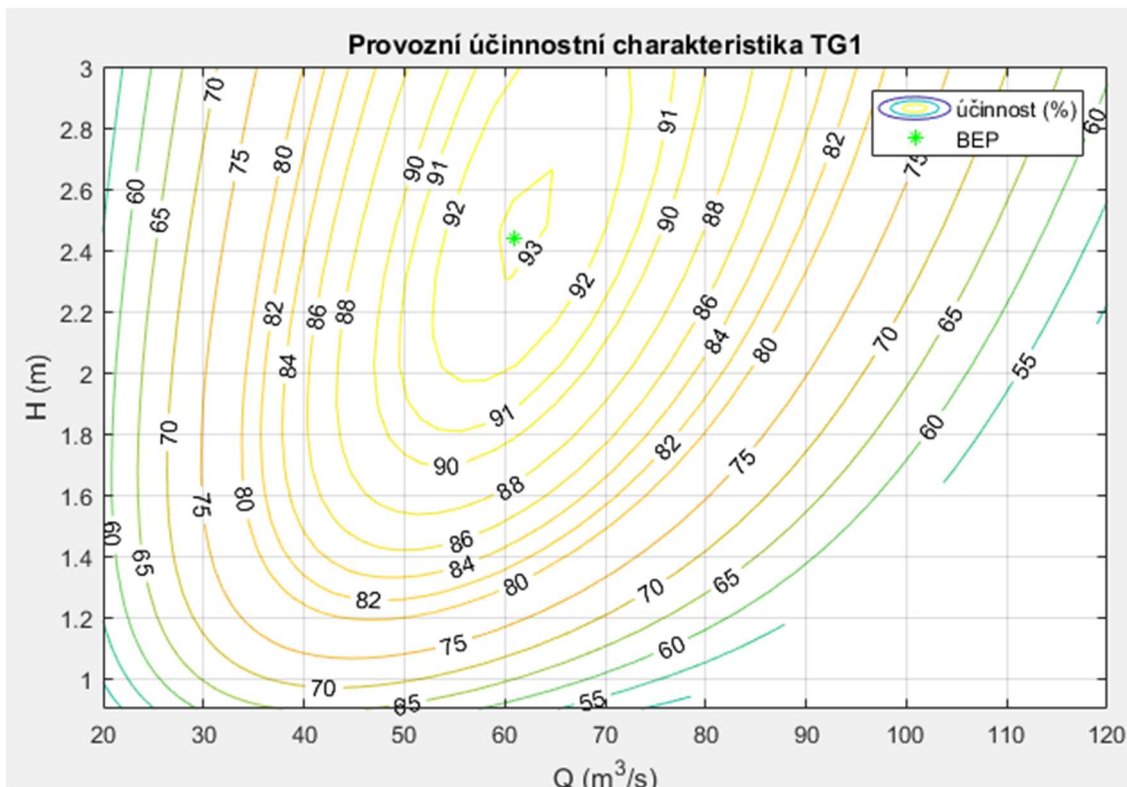
Z ní bylo převzato několik bodů a následně nahráno do programu Matlab. Tyto body byly proloženy plochou a zároveň na základě konzultací bylo přidáno několik dalších bodů, aby byla charakteristika ucelenější a co nejvíce odpovídala turbínám malé vodní elektrárny Liběchov.



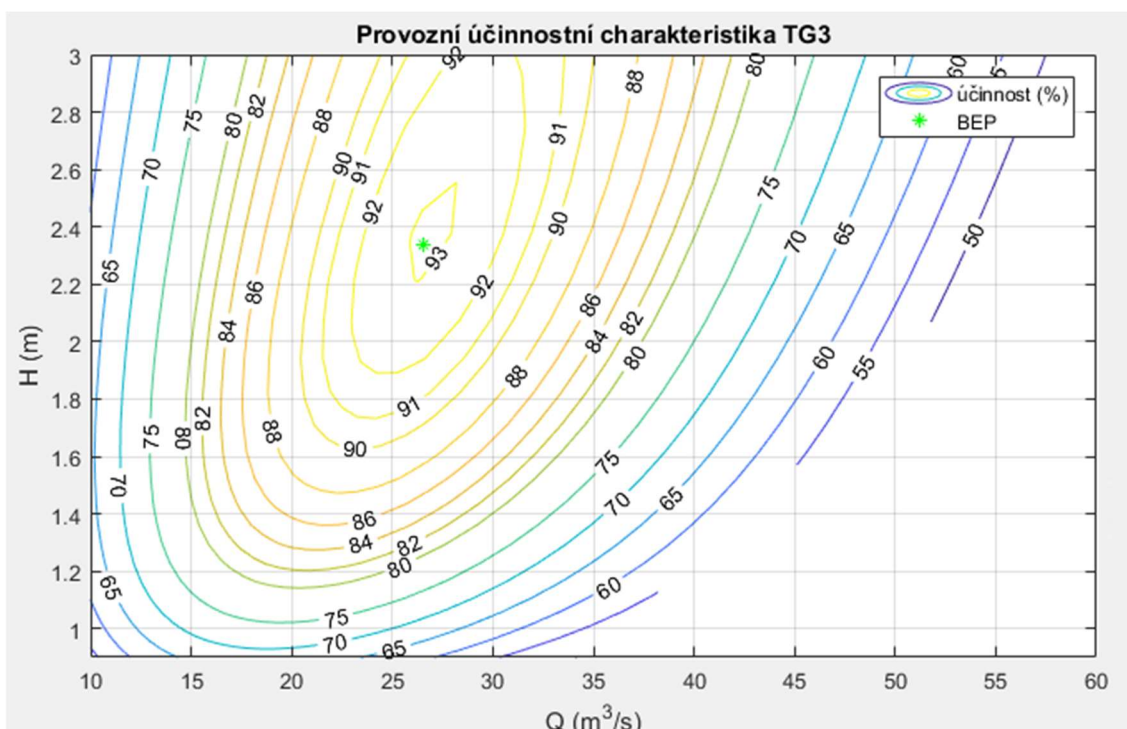
Obrázek 29 - Univerzální účinnostní charakteristika

Tato charakteristika byla poté zpět přes výše uvedené vzorce přepočítána pro každou z turbín zvlášť tak, aby odpovídala provozním hodnotám. V následujících grafech je také vyznačen Best Efficiency Point, jehož hodnoty odpovídají optimálním spádům a průtokům (viz. Tabulka 1).





Obrázek 30 - Provozní účinnostní charakteristika TG1



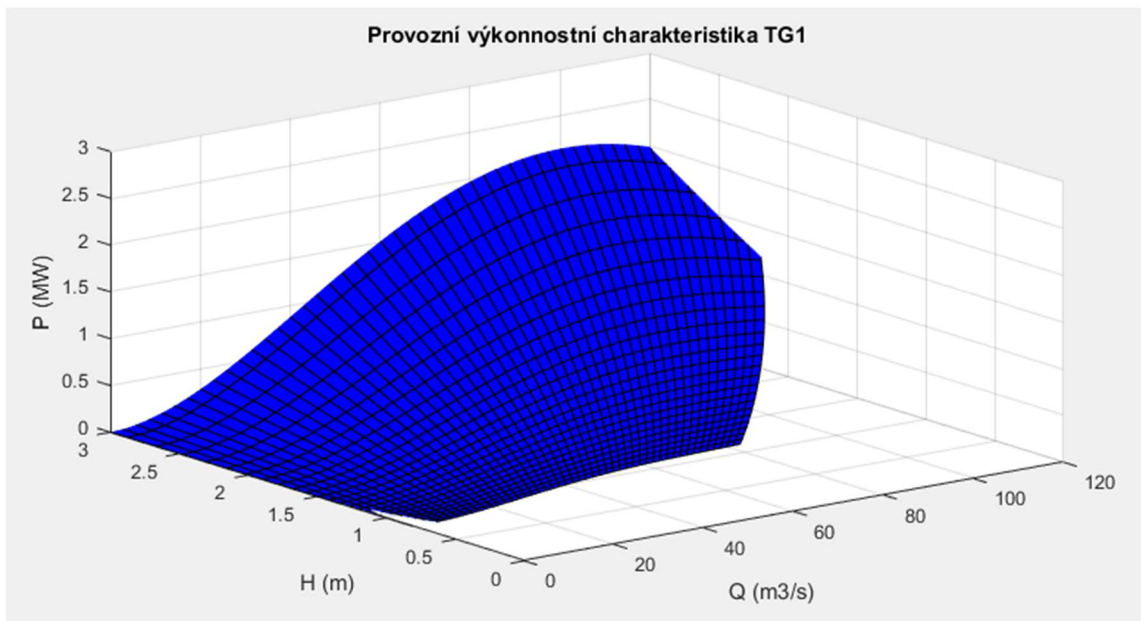
Obrázek 31 - Provozní účinnostní charakteristika TG3

## 6.2. Výkonnostní charakteristika

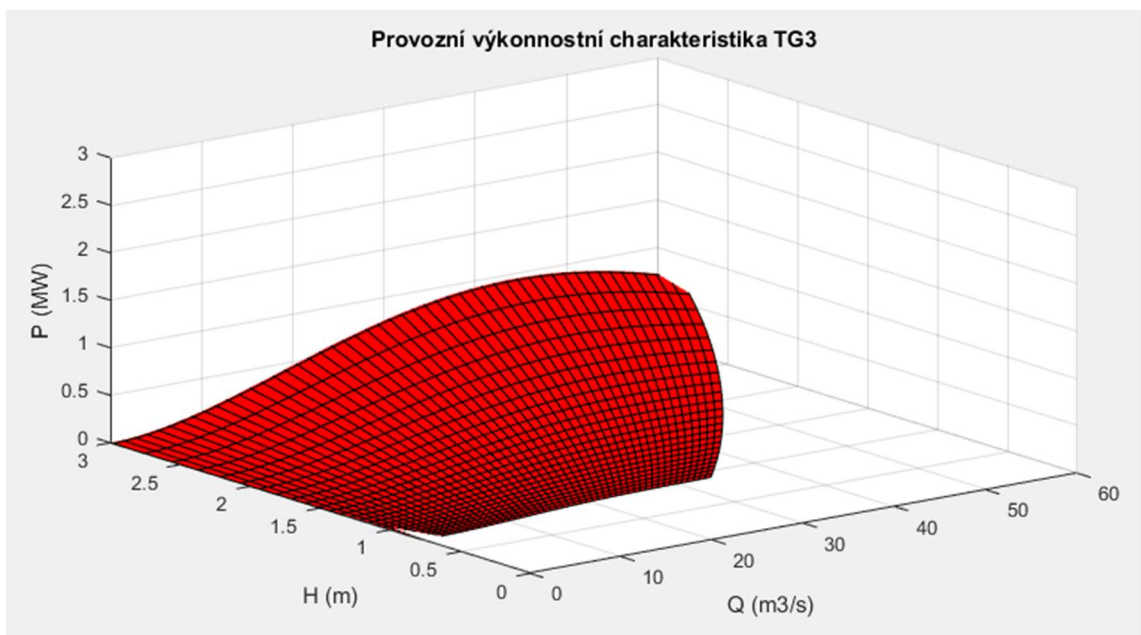
Pro další analýzu provozu MVE Liběchov bylo třeba definovat výkonnostní charakteristiku. Výkon se běžně počítá dle vztahu

$$P = H * Q * \eta * \rho * g$$

kde  $H$  (m) je spád,  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) průtok,  $\eta$  je účinnost (-),  $\rho$  hustota vody (kg/m<sup>3</sup>) a  $g$  (m/s<sup>2</sup>) tíhové zrychlení. Díky tomuto vztahu byla funkce účinnosti charakteristiky převedena na charakteristiku výkonnosti nejprve pro každou turbínu zvlášť.



Obrázek 32 - Provozní výkonnostní charakteristika TG1



Obrázek 33 - Provozní výkonnostní charakteristika TG3

V dalším kroku bylo potřeba dát obě plochy do jednoho grafu a přidat třetí pro souběh. Komplikací bylo to, že celkový průtok není rovnoměrně rozdělen mezi obě turbíny, ale dělí se v poměru 1:2,3. Průtok turbíny TG1 se tedy nechal jako podklad a TG3 se na něj v měřítku dopočetl. Stejný postup byl uskutečněn s výkonem. Takto definované hodnoty turbíny TG3 tvoří plochu pro sólo provoz TG3 a po sečtení s hodnotami pro TG1 dávají dohromady souběh.

```
% souběh TG1 must - TG3 dopočet
figure
plocha_P_T1 = surf(Q_T1,H_T1,P_T1,'FaceColor',[0 0 1]); hold on;

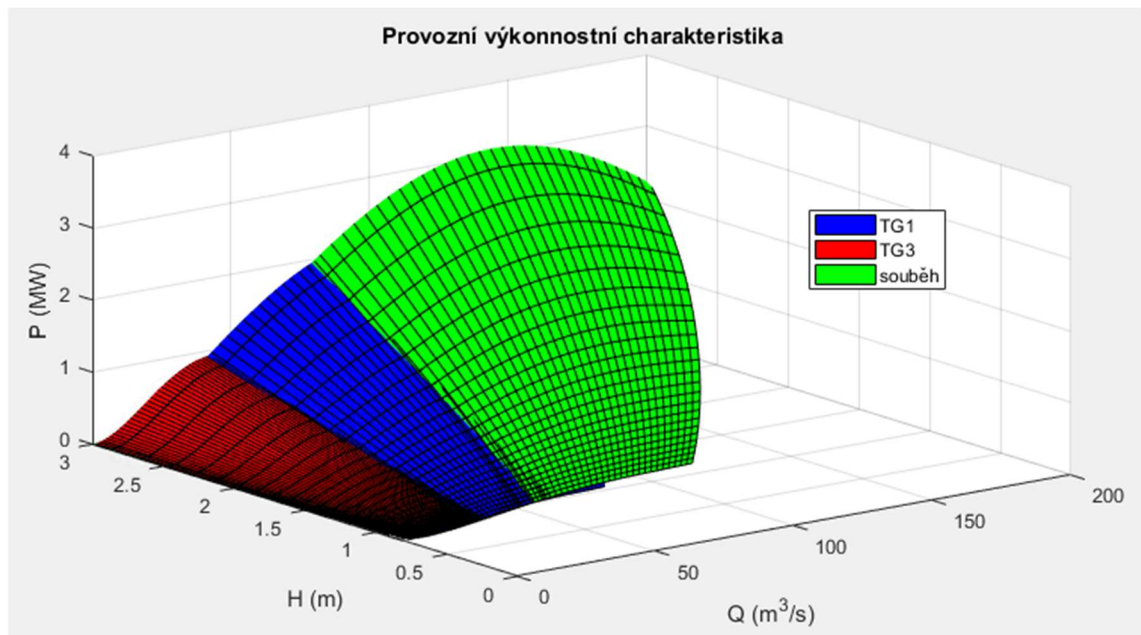
% souběh
pomer = 2.3; % poměr průtoků

Q_T3_sou = Q_T1/pomer;
H_T3_sou = H_T1;
P_T3_sou = P_T1/pomer;

plocha_P_T3 = surf(Q_T3_sou,H_T3_sou,P_T3_sou,'FaceColor',[1 0 0]); hold on;

Q_T_sou = Q_T1+Q_T3_sou;
H_T_sou = H_T1;
P_T_sou = P_T1+P_T3_sou;

plocha_P_T_sou = surf(Q_T_sou,H_T_sou,P_T_sou,'FaceColor',[0 1 0]); hold on;
```



Obrázek 34 - Provozní výkonnostní charakteristika

### 6.3. Hydraulické ztráty ve vtokovém objektu bez jemných česlí

Důležitým objektem ke zkoumání s ohledem na celkovou výrobu je přiváděcí kanál. Díky rozdílu hladin na jezu a v místě před jemnými česlemi lze jednoduchým rozdílem spočítat velikost této ztráty. Kdyby tato ztráta byla nulová, hladiny by vzhledem k vodorovnosti vody byly na stejné úrovni.

Pro výsledek bližší realitě je nutné od této ztráty odečíst ještě rychlostní výšku.

#### 6.3.1. Zohlednění rychlostní výšky

Pouhý rozdíl hladin by ztrátě na přiváděcím objektu neodpovídal, protože hladina před jemnými česlemi je navíc snížena o rychlostní výšku proudící vody.

Rychlostní výšku najdeme v Bernoulliho rovnici

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}$$

kde  $h_1$  a  $h_2$  [m] jsou výšky hladin ve dvou řešených profilech,  $\frac{p_1}{\rho g}$  a  $\frac{p_2}{\rho g}$  jsou jejich tlakové výšky a konečně  $\frac{v_1^2}{2g}$  a  $\frac{v_2^2}{2g}$  jsou výšky rychlostní.

Díky známému průřezu před česlemi a průtoku lze vypočítat průřezovou rychlost a následně tedy i rychlostní výška. Tu už stačí jen odečíst od rozdílu hladin a získáme ztrátu na vtoku.

#### 6.3.2. Analýza dat

Z jednotlivých dní bylo určeno, jaký průběh bude mít funkce ztrátové výšky v závislosti na průtoku elektrárnou.

$$H_{ztr} = fce(Qmve)$$

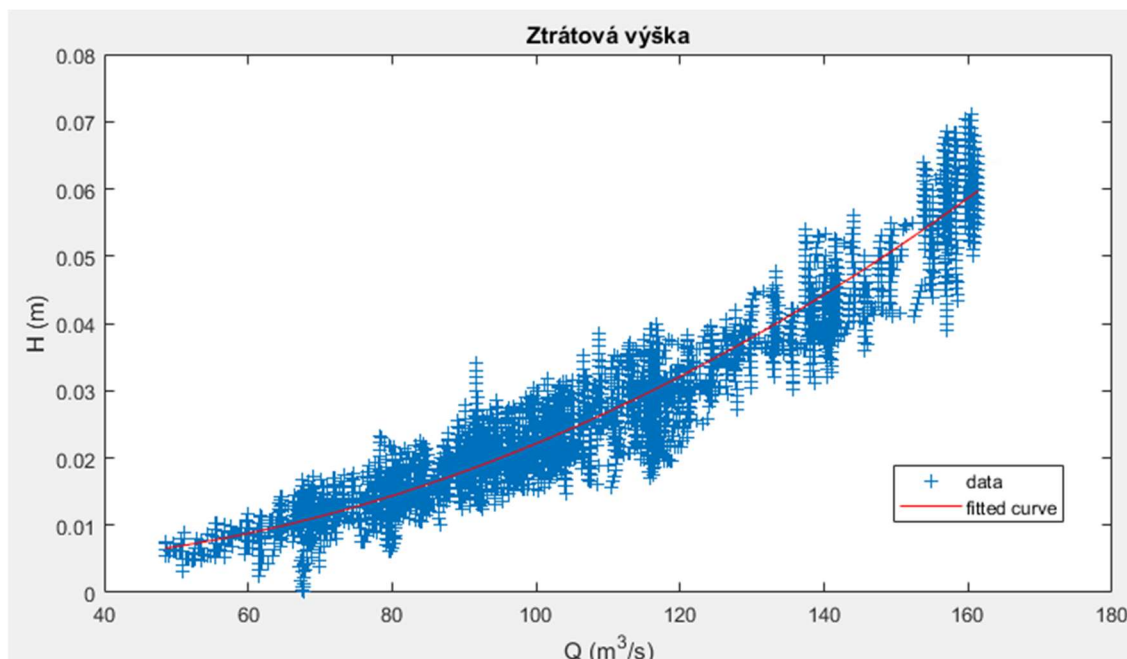
Naměřenými body byla proložena křivka druhého stupně ve tvaru

$$y = p1 * x^2 + p2 * x + p3$$

$$p1 = 2.7437e - 06$$

$$p2 = -0.00010505$$

$$p3 = 0.0052111$$



Obrázek 35 - Funkce ztrátové výšky na základě archivních dat

Z argumentu  $p3$  vidíme, že křivka neprochází počátkem, tedy že hladina není při odstavené elektrárně v rovině, což by měla. Důvodem může být špatná kalibrace čidla, či jiné pochybení poskytnutých dat.

### 6.3.3. Definice ztrátového výkonu

Hydraulické ztráty na vtoku snižují spád, který je přímo úměrný výkonu. Jinými slovy, čím větší jsou ztráty na vtoku, tím je menší získaný výkon. Proto čím lépe je udělaný vtokový objekt, tím větších zisků lze z chodu elektrárny dosáhnout.

Ztrátový výkon získáme následnou rovnicí, kde průtok vynásobíme ztrátovou výškou, účinností, hustotou vody a tíhovým zrychlením.

$$P_{ztr} = Q * H_{ztr} * \eta * \rho * g$$

## 7. MĚŘENÍ IN-SITU

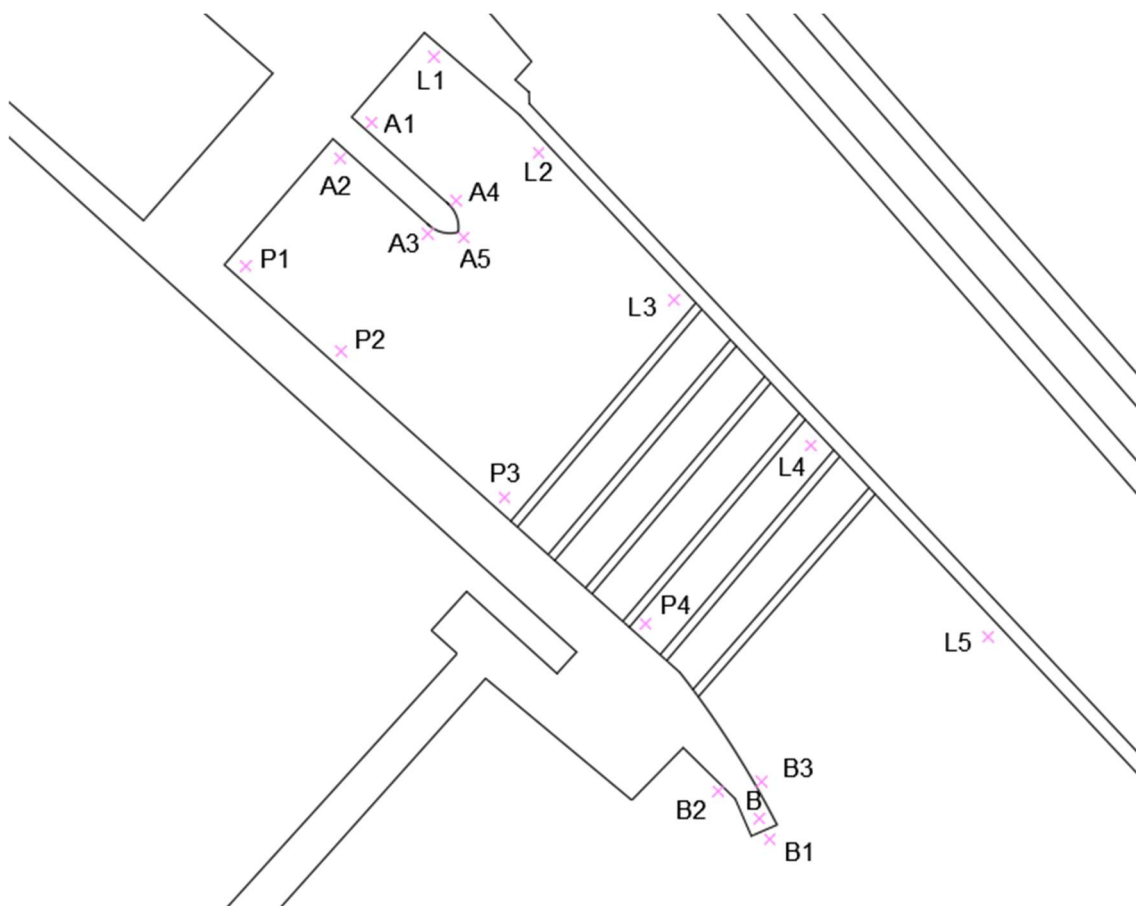
Pro bližší seznámení s chováním proudění v přiváděcím kanálu bylo dne 3. 5. 2020 uskutečněno měření přímo v zájmové lokalitě – areálu MVE Liběchov. Náplní měření bylo především pozorování a měření průběhu hladiny a rychlosti proudění. Uskutečněny byly dvě řady měření při různých provozních stavech.



Toto měření proběhlo díky vstřícné spolupráci s vedením a provozovatelem.

## 7.1. Postup

Nejprve byla vytipována místa, ve kterých se následně měření provedlo. Šlo o takové body, které již od pohledu vykazovaly zajímavé děje jako turbulence, náhlou změnu úrovně hladiny, či pulsování a změny směru proudění.



Obrázek 36 - Plánek měření na vtoku

Před samotným měřením byl zaznamenán čas a aktuální údaje o provozu.

### 7.1.1. Nivelace hladiny

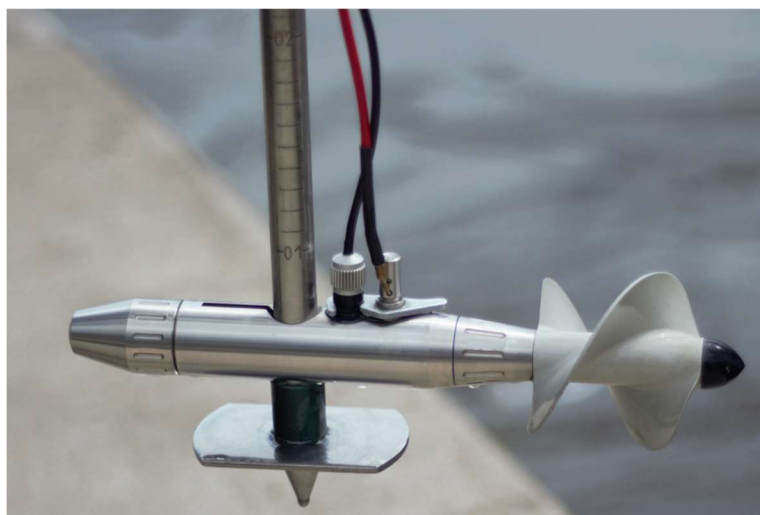
Po postavení nivelačního přístroje byly zaměřeny výšky dvou fixních bodů na betonové konstrukci. Dále už byla měřena výška hladiny u stěny koryta na vybraných místech. Toto měření umožnilo zaznamenat přibližný průběh hladiny, zejména pak různé poklesy a nerovnosti.



Obrázek 37 - Nivelační přístroj (vlastní fotodokumentace)

### 7.1.2. Hladinové rychlosti

Zároveň proběhlo měření bodových rychlostí ve vybraných bodech. K tomu byla využita hydrometrická vrtule SEBA. Čas snímání byl nastaven na 30 vteřin a díky naměřenému počtu otáček a známé kalibrační rovnici byla následně spočítaná skutečná bodová rychlost v daném místě. Z důvodu úmyslného výběru komplikovaných míst často docházelo k různým výsledkům ve stejném místě, dokonce se zde i střídal směr toku.



Obrázek 38 - Hydrometrická vrtule SEBA (vlastní fotodokumentace)

### 7.1.3. Plováky

Poslední akcí bylo vhození plováků rovnoměrně po příčném profilu na začátku přivaděcího kanálu. Cílem tohoto pokusu bylo analyzovat proudění bez čísel, pouze vlastníma očima. Díky chování plováků bylo zřejmé, kudy vede hlavní proudnice a k jakému chování má voda v přivaděči sklony a kde dochází k největším ztrátám. Plováky v podobě jablek a pomerančů byly zaznamenány

na kameru, bohužel i přes tři různé druhy záznamu není z žádného zcela zřetelně plováky vidět. Nicméně při pozorování na vlastní oči bylo možné toto chování zachytit.

#### 7.1.4. ADCP

Představou bylo také vyzkoušení modernější technologie v podobě přístroje ADCP, který by byl přetažen přes koryto a poskytl by nejpřesnější hodnoty průtoku a rychlosti. Bohužel tento přístroj není snadno dostupný a k dispozici by byl pouze takový, který dosáhne do hloubky maximálně 2 metrů, což je v případě malé vodní elektrárny Liběchov nedostačující.

### 7.2. **Prezentace naměřených hodnot**

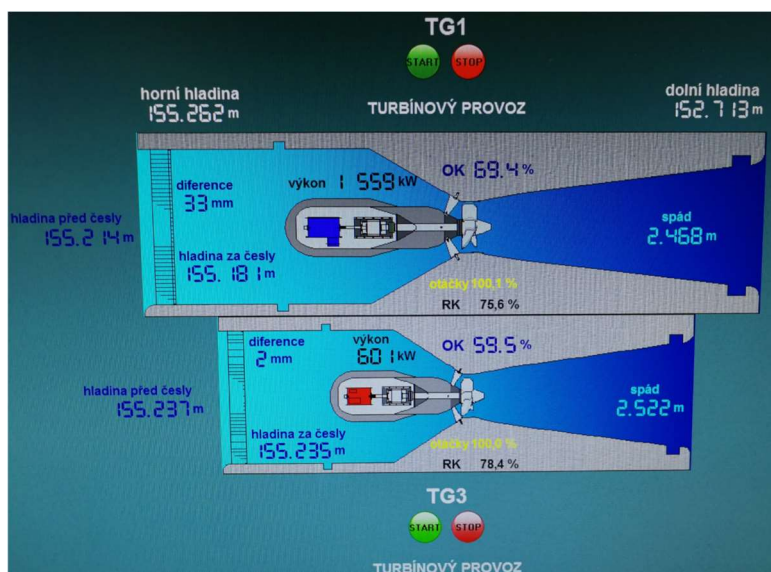
Pro naměřené rychlosti byl vytvořen barevný podklad na základě odhadu proudění v celém přiváděcím objektu. Hodnoty jsou uvedeny v m/s.

Výšky hladin jsou dopočítány v m n.m. Jsou vztaženy k bodu B, jehož nadmořská výška byla vyčtena z výkresu a činí 155.60 m n.m.

Zápis z měření je v Příloze č.2.

#### 7.2.1. Měření č. 1

První měření proběhlo při běžném provozu elektrárny. Průtok odpovídal souběhu obou turbín.

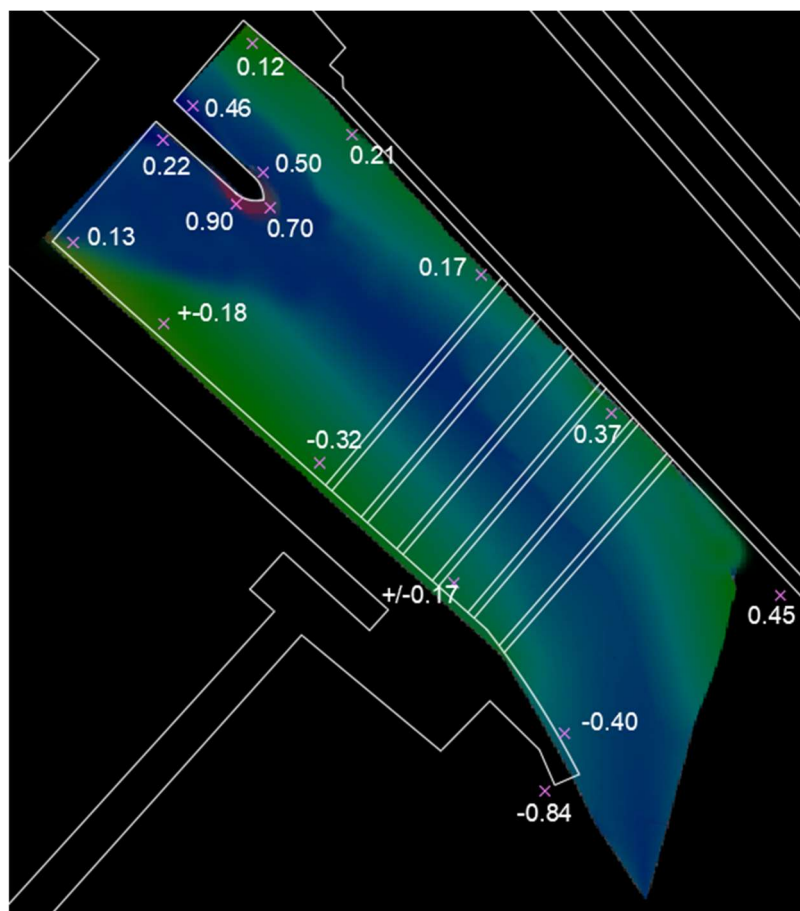


Obrázek 39 - Počáteční stav měření č. 1 (vlastní fotodokumentace)





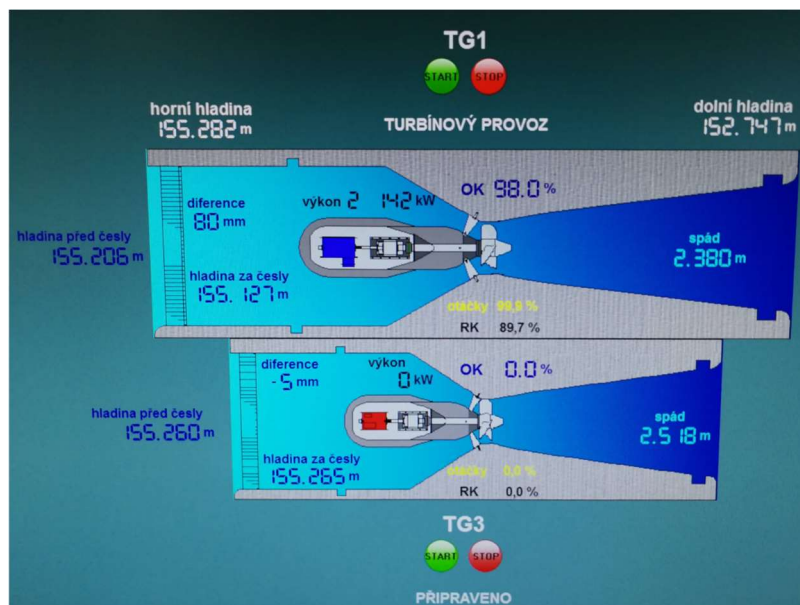
Obrázek 40 - Výšky hladin, měření č.1



Obrázek 41 - Rychlosti, měření č.1

## 7.2.2. Měření č. 2

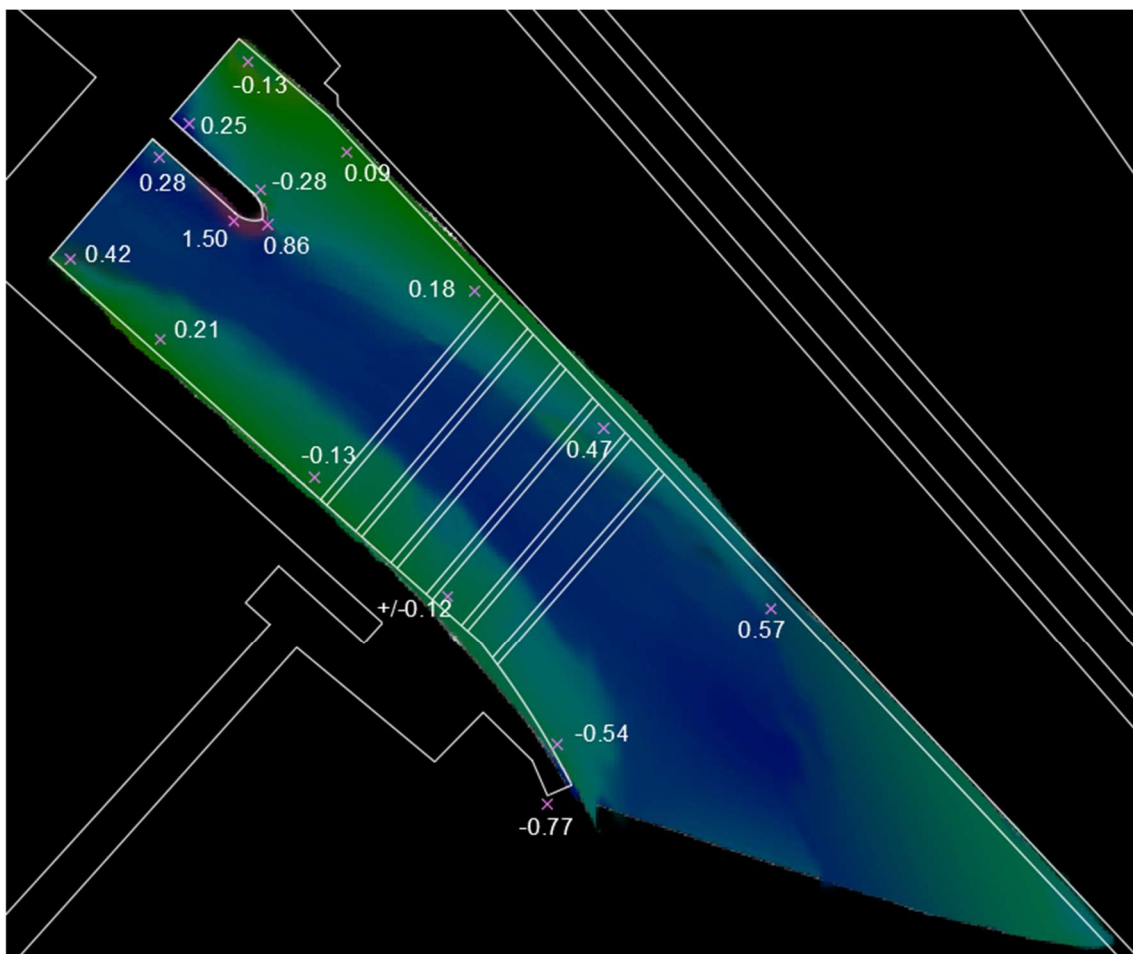
Při dalším měření byla žádoucí simulace nějakého výjimečného stavu. Na žádost byla technikem vyřazena z provozu menší z turbín TG3 a veškerý průtok byl přesměrován na TG1.



Obrázek 42 - Počáteční stav měření č. 2 (vlastní fotodokumentace)



Obrázek 43 - Výšky hladin, měření č.2



Obrázek 44 - Rychlosti, měření č.2

### 7.3. Zhodnocení

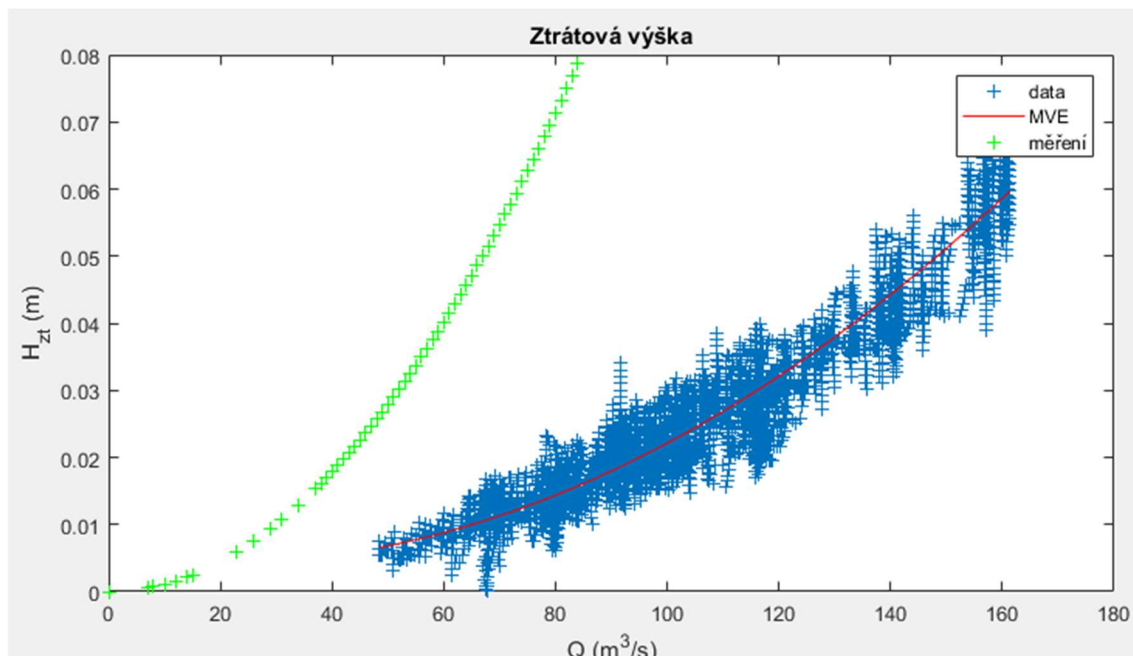
K největším ztrátám dochází na začátku přiváděcího kanálu, kde jsou viditelné rozsáhlé úplavy u začátku rozdělovací zdi a po celé této straně koryta dochází k pulzování a nestálostem proudění. Při pokusu s plováky urazil v tomto úseku jeden plovák zhruba 10 metrů a opět se vrátil zpět do ústí přiváděcího kanálu, většinou však zůstal plovák přímo v místě chycen ve víru. Druhým problematickým místem je dělicí zeď, kde směrem k turbíně TG1 dochází k značnému poklesu hladiny.

S hodnotami poskytnutými od MVE Liběchov se poměrně značně rozcházíme. Dle našeho měření jsou ztráty na vtoku mnohem větší. Pro účely této práce budu věřit svému měření a následné výpočty provedu podle něj. Ideální by bylo měření zopakovat a výsledky si potvrdit. Na grafu níže je vyobrazeno porovnání ztrátových výšek v závislosti na průtoku. Modré jsou z archivních dat MVE Liběchov a zelené body vycházejí z měření. Získaná

funkce ztrátové výšky v závislosti na průtoku vychází z naměřeného vztahu, který činil v době měření ztrátu  $H_{zt} = 0.15$  m při průtoku  $Q = 116$  m<sup>3</sup>/s. Podle vztahu

$$H_{zt} = k * Q^2$$

byla následně vymodelována křivka určující ztrátovou výšku pro řadu průtoků



Obrázek 45 - Srovnání funkcí ztrátových výšek

## 8. PODKLADY OD POVODÍ LABE

Tato data byla analyzována pro představu podmínek, za kterých malá vodní elektrárna Liběchov funguje od svého prvního spuštění.

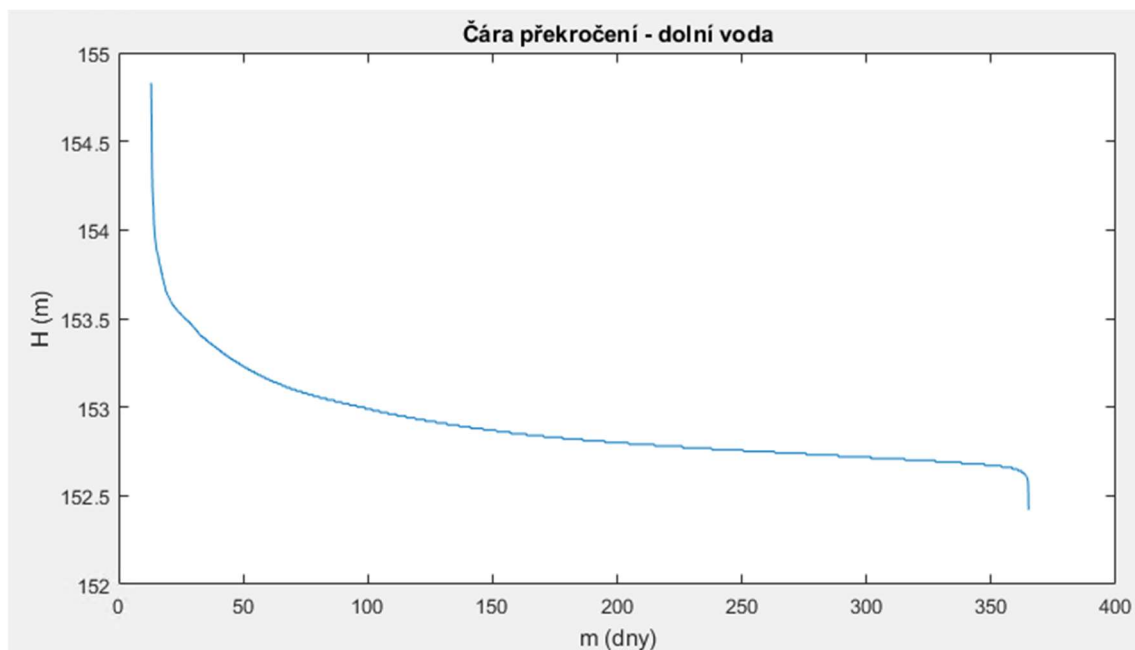
Při prohlížení dat lze zjistit, že některé hodnoty občas úplně chybí, nebo v horším případě jsou naměřené hodnoty nesmyslné. Měření občas vypadávalo, nelze ho tedy brát zcela dogmaticky.

### 8.1. Čára překročení

Čáry překročení poskytují informaci, kolik dní v roce je hodnota zkoumaného údaje překročena. Získáme ji sestupným seřazením hodnot, tento údaj bude na svislé ose, na ose vodorovné budou dny v roce.

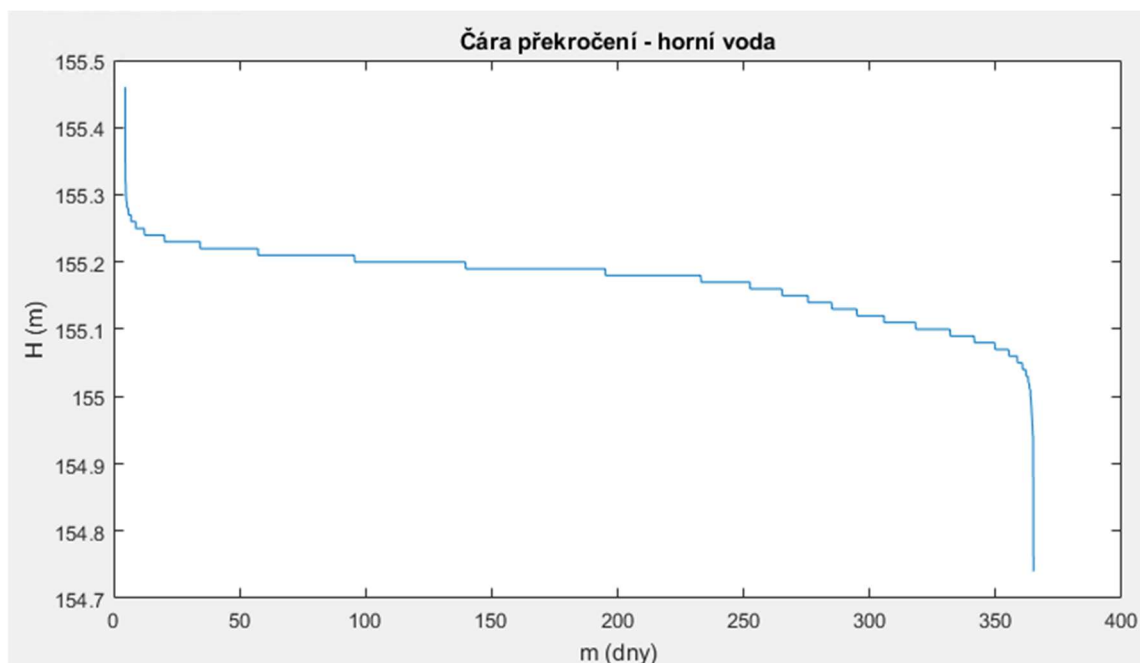
Díky této čáře máme představu o průběhu jednotlivých hydrologických údajích v roce, například o úrovni hladin či průtoku.

### 8.1.1. Dolní voda



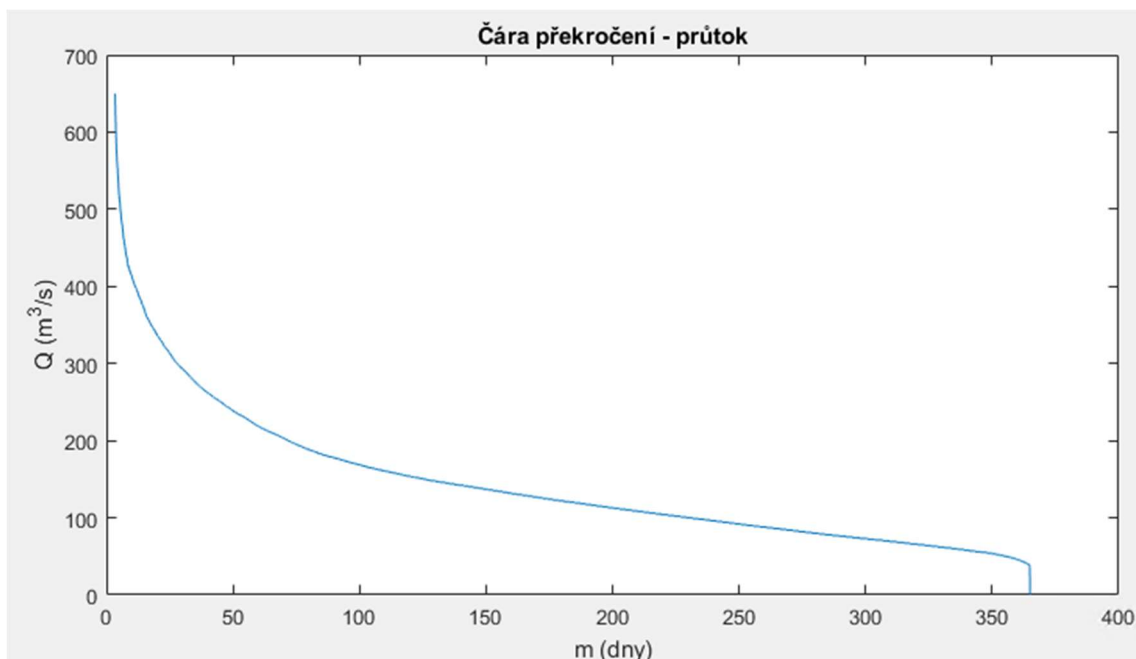
Obrázek 46 - Čára překročení dolní vody

### 8.1.2. Horní voda



Obrázek 47 - Čára překročení horní vody

### 8.1.3. Průtok

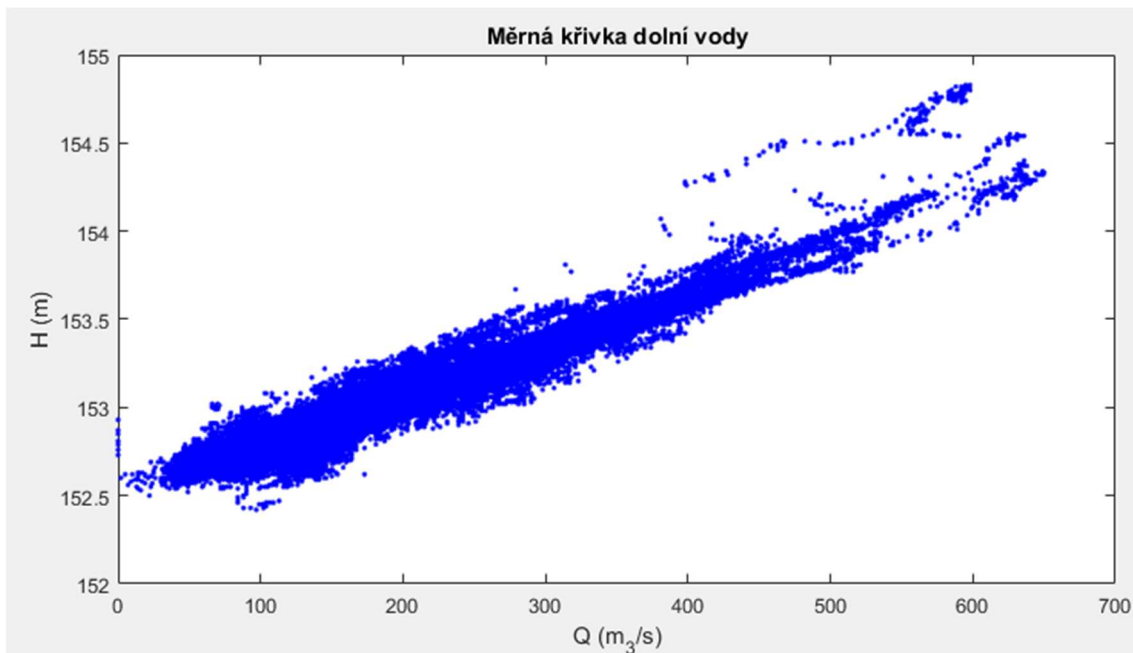


Obrázek 48 - Čára překročení průtoku

## 8.2. Měrná křivka dolní vody

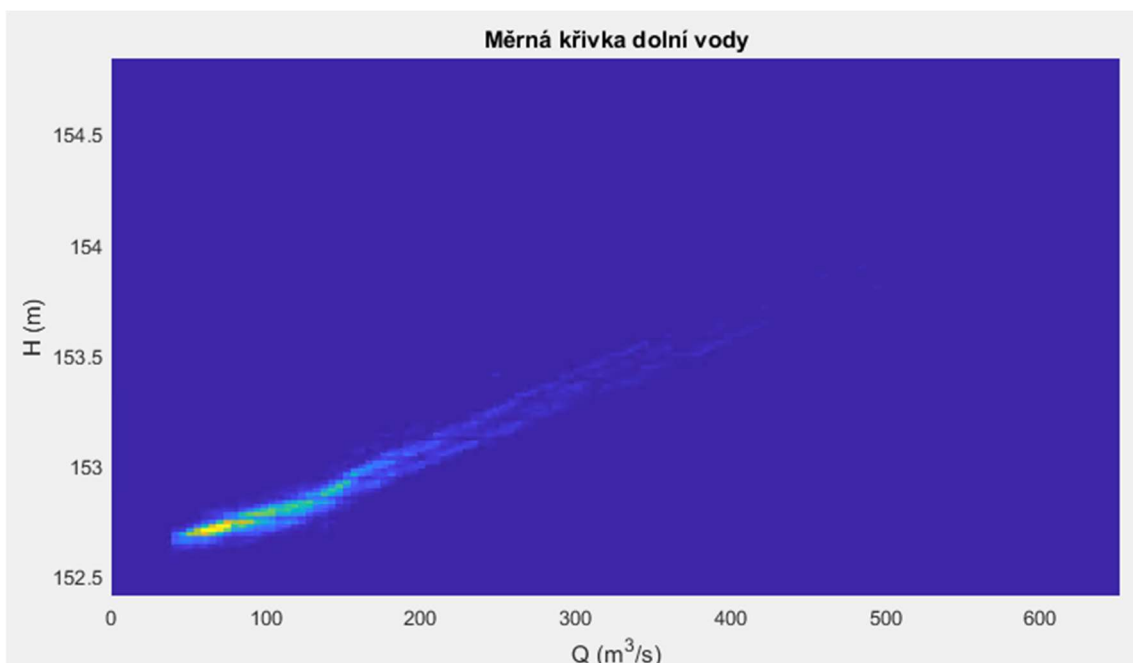
Po vykreslení výšky hladiny dolní vody v závislosti na celkovém průtoku získáme měrnou křivku dolní vody pod MVE Liběchov. Tento údaj ukazuje, jak moc se s rostoucím průtokem (což je příznivý jev z hlediska výroby energie) zvedá hladina dolní vody, čímž se snižuje spád, a to je zase jev nežádoucí. Proto nelze tvrdit, že čím větší průtok, tím lépe, vše je třeba dát do širších souvislostí.

Tato měrná křivka má poněkud přímější tvar, než bychom mohli očekávat. Rozptyl hodnot je způsobený kmitáním hladiny a výpadky měření.



Obrázek 49 - Měrná křivka dolní vody

Pro lepší představu o četnosti jednotlivých stavů je níže uveden ještě histogram nad rovinou Q-H.



Obrázek 50 - Histogram měrné křivky dolní vody

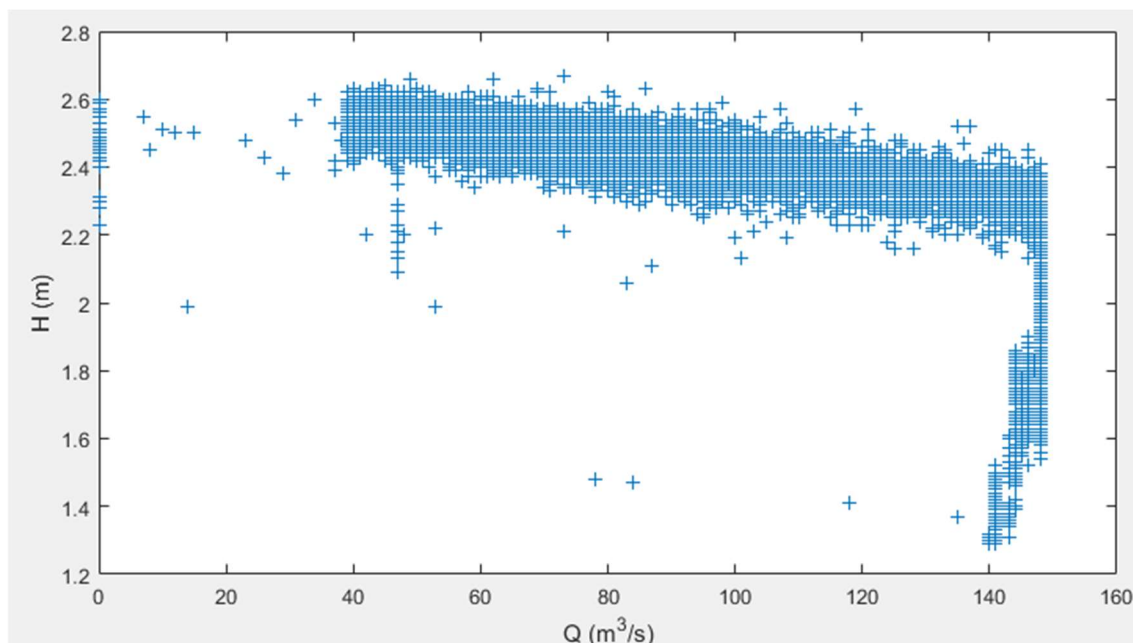


## 9. SIMULACE VÝROBY MVE ZA ROK 2018

Cílem této úlohy bylo říct, kolik energie se v liběchovské elektrárně vyrobilo za rok 2018. Použita pro to byla výkonnostní charakteristika získaná z charakteristiky účinnosti. Díky té bylo zajištěno získání hodnoty výkonu pro libovolnou kombinaci průtoku a spádu.

### 9.1. Získaný výkon

Pro výpočet celkového získaného výkonu za rok 2018 použijeme již vymodelovanou funkci, která nám pro každý naměřený rekord (průtok a spád) zpět vrátí výkon. Na následujícím grafu vidíme rozložení rekordů za rok 2018.



Obrázek 51 - Rozložení záznamů za rok 2018

Rozdíl hladin horní a dolní vody jezu byl snížen o ztráty na vtoku, aby byl výkon počítán s reálným spádem. Tyto ztráty byly určeny na základě měření a sníženy o rychlostní výšku.

V matlabu byl vytvořen algoritmus, který pro každý vzorek vypočítal hodnoty pro všechny provozní stavy zvlášť. Z těchto tří výkonů byl vždy vybrán maximální. Další informací byl index, ze kterého provozního stavu byl tento maximální výkon odečten. Získanými údaji tedy jsou výkony z jednotlivých provozních stavů a jejich četnosti. Přidán byl také stav, kdy byla elektrárna mimo provoz.



Hodnoty výkonů jsou již přenásobeny teoretickou účinností převodovky odhadnutou na 98 % a účinností generátoru – 95 %. Při výpočtu celkové výroby byly hodnoty násobeny ještě teoretickou účinností transformátoru odhadnutou na 98 %.

## 9.2. Ztrátový výkon

Roční ztrátový výkon je výkon spočtený s průtokem, který teče na elektrárnu a spádem, o který elektrárna přijde z důvodu ztrát na vtokovém objektu.

## 9.3. Zhodnocení

V tabulce níže jsou shrnuté výsledky. Pro lepší simulaci by bylo zapotřebí provést více měření za různých průtokových stavů. Díky tomu bychom vylepšili funkci ztrátové výšky. Ta je teď pro celou průtokovou řadu definována pouze díky jednomu bodu a předpokladu, že je její průběh parabolický. Také účinnostní charakteristika, ze které je následně odvozena charakteristika výkonnostní je pouhým odhadem a pokusem o přiblížení se skutečnosti.

Hodnota  $P_{prod}$  udává průměrnou hodnotu výkonu v kW, kterou elektrárna v každém z provozů vyprodukovala.  $E_{prod}$  je poté přepočten na roční výrobu v MWh včetně teoretické účinnosti transformátoru činící 98 %. Vedle toho hodnota  $P_{loss}$  vyjadřuje, o kolik kW průměrně elektrárna přijde kvůli hydraulickým ztrátám na vtoku. Hodnota je opět převedena na roční ztrátovou výrobu v MWh.

Tabulka 3 - Výroba 2018

Výroba 2018					
Provozní stav	mimo provoz	sólo TG1	sólo TG2	souběh	total
Podíl na chodu [%]	0.37	6.51	39.17	53.95	100
$P_{prod}$ [kW]	0	2.21	449.99	937.08	1389.28
$E_{prod}$ [MWh]	0	18.97	3863.07	8044.64	11926.69
Zisk při ceně 4 Kč za kWh	47 706 800.00 Kč				
$P_{loss}$ [kW]	123.7				
$E_{loss}$ [MWh]	1061.94				
Ztráta při ceně 4 Kč za kWh	4 247 800.00 Kč				

## 10. ZÁVĚR

Po protřídění a prozkoumání poskytnutých podkladů bylo možné utvořit si představu o fungování malé vodní elektrárny Liběchov. Díky technickým údajům byly vymodelovány účinnostní a následně také výkonnostní charakteristiky pro obě turbíny, které se na elektrárně nacházejí.

Také bylo uskutečněno měření přímo na vtokovém objektu, díky čemuž byla definována funkce ztrátové výšky, která byla důležitou součástí finální části této práce. Nutno dodat, že měření by bylo potřeba opakovat a uskutečnit při různých průtokových stavech. Tím bychom získali funkci ztrátové výšky na základě skutečných údajů, a ne pouze na předpokladu hyperbolického průběhu.

Ze simulace roční výroby a ročních ztrát lze usoudit, že na vtokovém objektu dochází k nezanedbatelným ztrátám a pro efektivnější výrobu a navýšení zisků by bylo vhodné uvažovat nad jeho vylepšením. Z měření bodových rychlostí je zřejmé, že nejvíce problematickými místy jsou stěna oddělující přívodní kanál od jezu a dělící zeď začínající u jemných česlí. Simulace výroby by se dala rozšířit na celou dobu fungování elektrárny.

Tato práce je vhodným podkladem pro další studii snižování ztrát na vtokovém objektu, jejíž výstupem by byl konkrétní návrh vylepšení vtokového objektu.

## 11. LITERATURA

- [1] ČKSVV, „Hydrometrické vrtule".  
<https://cksvv.vuv.cz/index.php/cz/hydrometricke-vrtule> (viděno kvě. 09, 2020).
- [2] Mattas I. D., „Praktické cvičení z hydrometrie", s. 26.
- [3] Březina J. „Elektromagnetická měřidla bodových rychlostí". Viděno: dub. 21, 2020. [Online]. Dostupné z:  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=154099](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=154099).
- [4] „OTT MF pro – OTT HydroMet Německo". <https://www.ott.com/de-de/produkte/durchfluss-41/ott-mf-pro-74/> (viděno kvě. 13, 2020).
- [5] Technoaqua „Průtokoměr LaserFlow". Viděno: kvě. 18, 2020. [Online]. Dostupné z:  
[http://www.technoaqua.cz/underwood/download/files/technoaqua\\_pr.pdf](http://www.technoaqua.cz/underwood/download/files/technoaqua_pr.pdf).
- [6] „Bezkontaktní snímač rychlosti LaserFlow".  
<https://www.teledyneisco.com/en-us/water-and-wastewater/laserflow> (viděno kvě. 18, 2020).
- [7] Veselý M. „Měření průtoku a výšky hladiny v povodí Odry". Viděno: kvě. 18, 2020. [Online]. Dostupné z:  
[http://dspace5.vsb.cz/bitstream/handle/10084/108852/VES110\\_FEI\\_B2649\\_2601R004\\_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://dspace5.vsb.cz/bitstream/handle/10084/108852/VES110_FEI_B2649_2601R004_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- [8] „OTT SVR 100 - HYDROMETRICS s.r.o."  
<http://www.hydrometrics.cz/main-navigation/ott-produkty/water-flow-3/ott-svr-100-2406/> (viděno kvě. 18, 2020).
- [9] „ADCP – MyScienceCruise".  
<https://portal.geomar.de/web/mysciencecruise/adcp> (viděno kvě. 12, 2020).
- [10] Švihálek J., „METODIKA MĚŘENÍ PRŮTOKU NA DROBNÝCH TOCÍCH", s. 16.
- [11] „Teledyne RD Instruments – Acoustic Doppler Current Profilers (ADCPs)".  
<http://www.teledynemarine.com/rdi/> (viděno kvě. 24, 2020).
- [12] Formánek J. „Podklady k principu měření rychlosti a rychlosti proudění". Viděno: kvě. 18, 2020. [Online]. Dostupné z:  
<http://home.zcu.cz/~formanek/mmvvuka/Data/ivk-mt-soubory/12-F.pdf>.
- [13] „Měření průtoků". Viděno: kvě. 17, 2020. [Online]. Dostupné z:  
[https://is.muni.cz/el/1431/podzim2009/G7401/um/G7401\\_text\\_2.pdf](https://is.muni.cz/el/1431/podzim2009/G7401/um/G7401_text_2.pdf).
- [14] „zdl\_dolniberkovice.pdf". Viděno: kvě. 11, 2020. [Online]. Dostupné z:  
[http://www.pla.cz/planet/public/vodnidila/zdl\\_dolniberkovice.pdf](http://www.pla.cz/planet/public/vodnidila/zdl_dolniberkovice.pdf).
- [15] „MVE Liběchov – jez Dolní Beřkovice". <http://hydropro.cz/portfolios/mve-libechov-jez-dolni-berkovice/> (viděno kvě. 17, 2020).

## 12. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Příklad rozložení rychlosti proudění v otevřeném korytu [4]....	10
Obrázek 2 - Původní Woltmannova vrtule [1] .....	11
Obrázek 3 - Priceova vrtule typu AA [1].....	12
Obrázek 4 - Příklady různých vrtulí od firmy SEBA [5] .....	13
Obrázek 5 - Sada na měření hydrometrickou vrtulí SEBA [5].....	13
Obrázek 6 - Měření rychlosti proudění v příčném profilu toku [4] .....	15
Obrázek 7 - Hydrometrická vrtule OTT C2 [1] .....	16
Obrázek 8 - Měrný úsek [2] .....	17
Obrázek 9 - Princip měření rychlosti kapaliny měřícím snímačem [3] .....	19
Obrázek 10 - Sestava elektromagnetického indukčního měřidla [3] .....	19
Obrázek 11 - Ovládací jednotka OTT MF pro [3].....	20
Obrázek 12 – Měřící snímač OTT MF pro [4] .....	20
Obrázek 13 - Princip měření laserem [6] .....	21
Obrázek 14 - LaserFlow Velocity Sensor od Teledyn ISCO [6] .....	22
Obrázek 15 - OTT SVR 100 [8] .....	23
Obrázek 16 - OTT SLD [4].....	24
Obrázek 17 - Změna frekvence vysílaného ultrazvuku [9].....	25
Obrázek 18 - Teledyne RD Instruments StreamPro ADCP [1] .....	25
Obrázek 19 - HydroProfiler M-Pro [11] .....	26
Obrázek 20 - Schéma principu Pitotovy trubice [12].....	27
Obrázek 21 - Průběh koncentrací [10].....	28
Obrázek 22 - Umístění MVE Liběchov .....	30
Obrázek 23 - Poloha jezu Dolní Beřkovice [14] .....	30
Obrázek 24 - Schématická situace plavebních komor [3] .....	31
Obrázek 25 - Schématický příčný řez jezovým polem [3] .....	31
Obrázek 26- Pohled na rozváděcí kolo turbíny MVE Liběchov [8].....	32
Obrázek 27 - Plánek umístění sond .....	35
Obrázek 28 - Univerzální účinnostní charakteristika Andritz Hydro .....	38
Obrázek 29 - Univerzální účinnostní charakteristika.....	39
Obrázek 30 - Provozní účinnostní charakteristika TG1 .....	40
Obrázek 31 - Provozní účinnostní charakteristika TG3 .....	40

Obrázek 32 - Provozní výkonnostní charakteristika TG1.....	41
Obrázek 33 - Provozní výkonnostní charakteristika TG3.....	41
Obrázek 34 - Provozní výkonnostní charakteristika.....	42
Obrázek 35 - Funkce ztrátové výšky na základě archivních dat.....	44
Obrázek 36 - Plánek měření na vtoku .....	45
Obrázek 37 - Nivelační přístroj (vlastní fotodokumentace).....	46
Obrázek 38 - Hydrometrická vrtule SEBA (vlastní fotodokumentace) .....	46
Obrázek 39 - Počáteční stav měření č. 1 (vlastní fotodokumentace) .....	47
Obrázek 40 - Výšky hladin, měření č.1 .....	48
Obrázek 41 - Rychlosti, měření č.1 .....	48
Obrázek 42 - Počáteční stav měření č. 2 (vlastní fotodokumentace) .....	49
Obrázek 43 - Výšky hladin, měření č.2.....	49
Obrázek 44 - Rychlosti, měření č.2 .....	50
Obrázek 45 - Srovnání funkcí ztrátových výšek.....	51
Obrázek 46 - Čára překročení dolní vody .....	52
Obrázek 47 - Čára překročení horní vody .....	52
Obrázek 48 - Čára překročení průtoku .....	53
Obrázek 49 - Měrná křivka dolní vody .....	54
Obrázek 50 - Histogram měrné křivky dolní vody.....	54
Obrázek 51 - Rozložení záznamů za rok 2018.....	55

### 13. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Provozní data z řídicího systému.....	33
Tabulka 2 - Základní informace z měření MVE Liběchov .....	37
Tabulka 3 - Výroba 2018 .....	56

## **14. SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1 – Ukázka formátu poskytnutých dat

Příloha 2 – Záznamy z měření

Příloha 1 – Podklady z MVE Liběchov (dohromady poskytnuto 8x86400 rekordů)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	Date	Time	otevření OK T1 (%)	otevření RK T1 (%)	otáčky T1 (%)	hladina (T1) před česlicemi (m n.m.)	hladina (T1) za česlemi (m n.m.)	diference hladiny na česlích (mm)	čistý spád na T1 (m)	průtok T1 jako funkce OK a H	otevření OK T3 (%)	otevření RK T3 (%)
1												
2	14.04.2018	0:00:00	98.2	90.5	100	155.137	155.085	52	1.98	105.3	98.6	99.4
3	14.04.2018	0:00:01	98.2	90.5	99.9	155.136	155.085	52	1.98	105.3	98.6	99.4
4	14.04.2018	0:00:02	98.2	90.5	99.8	155.136	155.085	51	1.98	105.3	98.6	99.4
5	14.04.2018	0:00:03	98.2	90.5	99.9	155.135	155.085	51	1.98	105.3	98.6	99.4
6	14.04.2018	0:00:04	98.2	90.5	99.9	155.135	155.086	50	1.98	105.3	98.6	99.4
7	14.04.2018	0:00:05	98.2	90.5	100	155.134	155.086	49	1.98	105.3	98.6	99.4
8	14.04.2018	0:00:06	98.2	90.5	100.1	155.134	155.086	49	1.98	105.3	98.6	99.4
9	14.04.2018	0:00:07	98.2	90.5	100	155.133	155.086	48	1.98	105.3	98.6	99.4
10	14.04.2018	0:00:08	98.2	90.5	99.9	155.133	155.086	47	1.98	105.3	98.6	99.4
11	14.04.2018	0:00:09	98.2	90.5	99.9	155.133	155.086	47	1.98	105.3	98.6	99.4
12	14.04.2018	0:00:10	98.2	90.5	99.8	155.133	155.086	47	1.98	105.3	98.6	99.4
13	14.04.2018	0:00:11	98.2	90.5	100	155.133	155.086	47	1.98	105.3	98.6	99.4
14	14.04.2018	0:00:12	98.2	90.5	100.1	155.133	155.086	47	1.98	105.3	98.6	99.4
15	14.04.2018	0:00:13	98.2	90.5	99.8	155.133	155.086	47	1.98	105.3	98.6	99.4
16	14.04.2018	0:00:14	98.2	90.5	99.8	155.134	155.086	47	1.98	105.3	98.6	99.4
17	14.04.2018	0:00:15	98.2	90.5	99.8	155.134	155.086	47	1.98	105.3	98.6	99.4
18	14.04.2018	0:00:16	98.2	90.5	99.9	155.134	155.086	47	1.98	105.3	98.6	99.4
19	14.04.2018	0:00:17	98.2	90.5	99.9	155.133	155.086	47	1.98	105.3	98.6	99.4
20	14.04.2018	0:00:18	98.2	90.5	100	155.132	155.086	47	1.98	105.3	98.6	99.4

M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
otáčky T3 (%)	hladina (T3) před česlicemi (m n.m.)	hladina (T3) za česlemi (m n.m.)	diference hladiny na česlích (mm)	čistý spád na T3 (m)	průtok T3 jako funkce OK a H	hladina HV dle MVE (m n.m.)	hladina DV dle MVE (m n.m.)	hladina HV dle jezu (m n.m.)	hladina DV dle jezu (m n.m.)	průtok přes jez (m3/s)	průtok MVE dispoziční (m3/s)
99.9	155.175	155.172	3	2.07	49	155.233	153.104	155.2	153.11	43.0	0.1
100	155.174	155.171	3	2.07	49	155.233	153.104	155.2	153.11	43.0	0.1
99.9	155.174	155.171	3	2.07	49	155.233	153.104	155.2	153.11	43.0	0.1
99.9	155.174	155.171	3	2.07	49	155.233	153.104	155.2	153.11	43.0	0.1
100	155.174	155.171	3	2.07	49	155.233	153.104	155.2	153.11	43.0	0.1
100	155.175	155.171	4	2.07	49	155.233	153.104	155.2	153.11	43.0	0.1
100	155.175	155.171	4	2.07	49	155.233	153.104	155.2	153.11	43.0	0.1
100	155.175	155.171	4	2.07	49	155.233	153.104	155.2	153.11	43.0	0.1
99.9	155.175	155.171	4	2.07	49	155.233	153.104	155.2	153.11	43.0	0.1
100	155.176	155.172	4	2.07	49	155.233	153.104	155.19	153.11	41.0	0.1
99.9	155.176	155.172	4	2.07	49	155.233	153.104	155.19	153.11	41.0	0.1
99.9	155.177	155.172	5	2.07	49	155.233	153.104	155.19	153.11	41.0	0.1
100	155.177	155.173	4	2.07	49	155.233	153.104	155.19	153.11	41.0	0.1
99.9	155.178	155.174	4	2.07	49	155.233	153.104	155.19	153.11	41.0	0.1
99.9	155.178	155.174	4	2.07	49	155.233	153.104	155.19	153.11	41.0	0.1
100	155.179	155.174	5	2.07	49	155.233	153.104	155.19	153.11	41.0	0.1
100	155.179	155.175	4	2.07	49	155.233	153.104	155.19	153.11	41.0	0.1
99.9	155.18	155.176	4	2.07	49	155.233	153.104	155.19	153.11	41.0	0.1
99.9	155.181	155.176	5	2.07	49	155.233	153.104	155.19	153.11	41.0	0.1



Podklady od státního podniku Povodí Labe s.r.o. (dohromady 254169 rekordů)

	A	B	C	D	E	F
1	<b>Datum a čas</b>	<b>LADBHO1</b>	<b>LADBKHO1</b>	<b>LADBQE01</b>	<b>LADBQJ01</b>	<b>LADB_Q01</b>
180850	16.03.2018 17:00:00.000	47.000	11	148.0	56.000	204.000
180851	16.03.2018 17:15:00.000	47.000	11	148.0	56.000	204.000
180852	16.03.2018 17:30:00.000	47.000	11	148.0	56.000	204.000
180853	16.03.2018 17:45:00.000	47.000	11	148.0	56.000	204.000
180854	16.03.2018 18:00:00.000	47.000	11	148.0	56.000	204.000
180855	16.03.2018 18:15:00.000	47.000	10	148.0	54.000	202.000
180856	16.03.2018 18:30:00.000	46.000	10	148.0	51.000	199.000
180857	16.03.2018 18:45:00.000	44.000	9	148.0	45.000	193.000
180858	16.03.2018 19:00:00.000	43.000	9	148.0	43.000	191.000
180859	16.03.2018 19:15:00.000	41.000	9	148.0	39.000	187.000
180860	16.03.2018 19:30:00.000	40.000	9	148.0	39.000	187.000
180861	16.03.2018 19:45:00.000	39.000	9	148.0	37.000	185.000
180862	16.03.2018 20:00:00.000	38.000	9	148.0	33.000	181.000
180863	16.03.2018 20:15:00.000	37.000	9	148.0	35.000	183.000

**Legenda:**

LADBKHO1 - relativní kóta horní hladiny v cm od nominální hladiny VD Dolní Beřkovic (155,09 m n.m.)

LADBHO1 - relativní kóta dolní hladiny v cm od nominální hladiny VD Štětí (152,69 m n.m.)

LADB\_Q01 - celkový průtok v m<sup>3</sup>/s

LADBQE01 - průtok přes MVE v m<sup>3</sup>/s

LADBQJ01 - průtok přes jez v m<sup>3</sup>/s

Příloha č.2 – Záznamy z měření

Měření č. 1

Začátek měření 10:35:00

Konec měření 11:42:00

Průtok přes MVE 106.8 m<sup>3</sup>/s

Průtok přes TG1 72.7 m<sup>3</sup>/s

Průtok přes TG3 34.1 m<sup>3</sup>/s

Vrtule SEBA - kalibrační rovnice:

<sup>1</sup> rovnice	rozsah platnosti
$v = 0.0147 + 0.1488n$	$n \leq 0.58$
$v = 0.0226 + 0.1351n$	$0.58 \leq n \leq 3.53$
$v = 0.0339 + 0.1319n$	$n \geq 3.53$

NIVELACE		
	čtení na lati	
Bod	[dm]	m n.m.
Fixní bod B	16.2	155.6
P1	24.60	154.76
P2	23.60	154.86
P3	23.10	154.91
P4	22.60	154.96
B1	22.20	155.00
B2	22.10	155.01
B3	-	-
L1	-	-
L2	24.60	154.76
L3	23.40	154.88
L4	22.70	154.95
L5	21.70	155.05
L6	20.20	155.20
A1	24.65	154.76
A2	24.55	154.77
A3	24.20	154.80
A4	23.85	154.84
A5	23.90	154.83

HYDROMETROVÁNÍ			
t =	30 s		
Bod	N	n	v
	[ot/30s]	[ot/s]	[m/s]
P1	24	0.80	0.13
P2	36	1.20	0.18 +/-
P3	-75	-2.50	-0.32
P4	33	1.10	0.17 +/-
B1	-	-	-
B2	-199	-6.63	-0.84
B3	-94	-3.13	-0.40
L1	22	0.73	0.12
L2	42	1.40	0.21
L3	33	1.10	0.17
L4	78	2.60	0.37
L5	96	3.20	0.45
L6	28	0.93	0.15
A1	97	3.23	0.46
A2	43	1.43	0.22
A3	198	6.60	0.90
A4	106	3.53	0.50
A5	150	5.00	0.70

\* +/- střídání směru proudění

## Měření č. 2

Začátek měření 13:05:00  
Konec měření 13:30:00

Průtok přes MVE 116 m<sup>3</sup>/s  
Průtok přes TG1 116 m<sup>3</sup>/s  
Průtok přes TG3 0 m<sup>3</sup>/s

Vrtule SEBA - kalibrační rovnice:

<sup>1</sup> rovnice	rozsah platnosti
$v = 0.0147 + 0.1488n$	$n \leq 0.58$
$v = 0.0226 + 0.1351n$	$0.58 \leq n \leq 3.53$
$v = 0.0339 + 0.1319n$	$n \geq 3.53$

NIVELACE		
Bod	čtení na lati [dm]	m n.m.
Fixní bod B	16.2	155.6
P1	23.45	154.88
P2	23.20	154.90
P3	24.55	154.77
P4	22.20	155.00
B1	21.60	155.06
B2	21.40	155.08
B3	-	-
L1	-	-
L2	23.35	154.89
L3	22.70	154.95
L4	22.15	155.01
L5	21.25	155.10
L6	19.00	155.32
A1	23.35	154.89
A2	23.55	154.87
A3	23.90	154.83
A4	23.20	154.90
A5	23.40	154.88

HYDROMETROVÁNÍ			
t =	30 s		
Bod	N	n	v
	[ot/30s]	[ot/s]	[m/s]
P1	89	2.97	0.42
P2	41	1.37	0.21
P3	-34	-1.13	-0.13
P4	22	0.73	0.12 +/-
B1	-	-	-
B2	-182	-6.07	-0.77
B3	-130	-4.33	-0.54
L1	-34	-1.13	-0.13
L2	16	0.53	0.09
L3	36	1.20	0.18
L4	100	3.33	0.47
L5	122	4.07	0.57
L6	35	1.17	0.18
A1	50	1.67	0.25
A2	58	1.93	0.28
A3	334	11.13	1.50
A4	-67	-2.23	-0.28
A5	186	6.20	0.86

\* +/- střídání směru proudění