

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

**FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ**

**Katedra vodního hospodářství a environmentálního  
modelování**

**POSOUZENÍ ÚČINNOSTI MALÉ VODNÍ  
ELEKTRÁRNY**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Máca, Ph.D.**

**Autor: Michaela Havlíčková**

2015

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Michaela Havlíčková

Vodní hospodářství

Název práce

Posouzení účinnosti malé vodní elektrárny

Název anglicky

The efficiency analysis of SWPP

---

### Cíle práce

Cílem práce je analýza účinnosti malé vodní elektrárny. Pro vybranou malou vodní elektrárnu získáte časové řady průtoků a výkonu malé vodní elektrárny. Na základě jejich vyhodnocení provedte posouzení účinnosti malé vodní elektrárny.

### Metodika

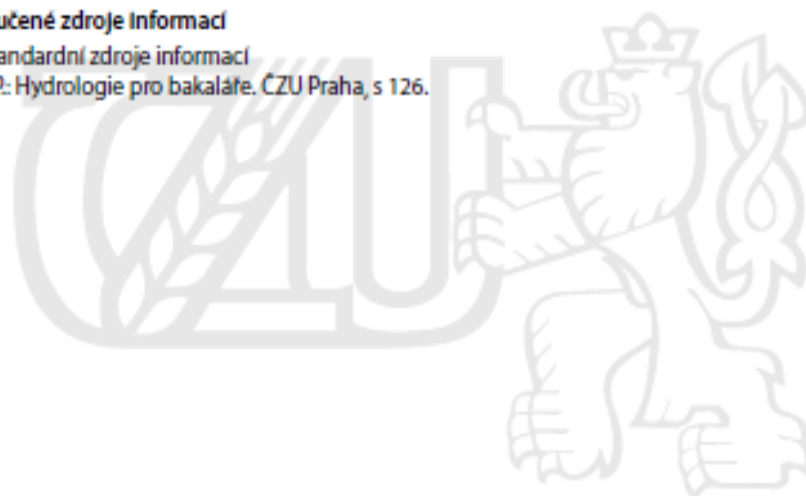
Posouzení malé vodní elektrárny proveďte prostřednictvím následujících bodů:

1. Vyberte vhodnou malou vodní elektrárnu
2. Shromáždíte časové řady průtoků a výkonu malé vodní elektrárny
3. Stanovte pro různé agregované časové řady průtoků a výkonu jejich autokorelační funkce
4. Vyhodnoťte lineárním modelem vzájemnou závislost mezi průtoky a výkony malé vodní elektrárny

**Doporučený rozsah práce**  
standardní

---

**Doporučené zdroje informací**  
další standardní zdroje informací  
Máca, P.: Hydrologie pro bakaláře. ČZU Praha, s 126.



---

**Předběžný termín obhajoby**  
2015/06 (červen)

**Vedoucí práce**  
Ing. Petr Máca, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 14. 4. 2015  
**prof. Ing. Pavel Pech, CSc.**  
Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 14. 4. 2015  
**prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.**  
Děkan

V Praze dne 15. 04. 2015

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením doc. Ing. Petra Máci, Ph. D., a že jsem uvedla všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpala.

V Praze dne 14. 4. 2015

### **Poděkování**

Děkuji vedoucímu mé práce, panu doc. Ing. Petrovi Mácovi, Ph. D., za ochotu, trpělivost, čas a cenné rady, které mi při psaní bakalářské práce věnoval.

## **Abstrakt**

V bakalářské práci se zabývám posouzením účinnosti malé vodní elektrárny na řece Olešce ve městě Semily v Libereckém kraji. Úvodní část popisuje historii využívání vodní energie až do současnosti na našem území. Dále popisuji velikost hydroenergetického potenciálu v České republice. V rešeršní části se ještě zabývám dělením a charakteristikou malé vodní elektrárny. V neposlední fázi se věnuji zpracování časových řad pro průtoky, výšky hladiny a výkony vodní elektrárny. Ze kterých získám přehled o rozptýlu, četnosti a závislostí získaných dat. V konečné řadě je posouzena účinnost malé vodní elektrárny.

**Klíčová slova:** malá vodní elektrárna, průtok a výkon.

## **Abstract**

In this bachelor thesis I deal with the assessment of efficiency of small hydro power plant on river Oleška which flows through the Semily city in Liberec region. An introductory part describes a history of usage of hydro energy in our area till now. Next I describe a potential of hydropower in Czech republic. In a research part I deal with categorization and characteristic of small hydro power plants. Processed data of flow rate, water level and electric power are in next part of this bachelor thesis. From these processed data I get an overview about variance, frequency and dependence of obtained data. In conclusion there is assessed an efficiency of this small hydro power plant.

**Key words:** small hydro power plant, flow rate, electric power

## Obsah

<b>1. Úvod .....</b>	<b>9</b>
<b>2. Cíl práce .....</b>	<b>10</b>
<b>3. Využití vodní energie na našem území.....</b>	<b>11</b>
3.1. Historie využívání vodní energie .....	11
3.2. Rozvoj malých vodních elektráren v České republice .....	12
3.3. Stav od roku 1990 po současnost.....	13
3.4. Hydroenergetický potenciál v ČR.....	15
3.4.1. Hrubý energetický potenciál .....	15
3.4.2. Teoretický hydroenergetický potenciál .....	15
3.4.3. Reálně využitelný hydroenergetický potenciál .....	16
<b>4. Druhy malých vodních elektráren a jejich klasifikace.....</b>	<b>18</b>
4.1. Základní pojmy a názvosloví.....	18
4.2. Dělení MVE .....	19
<b>5. Kritéria výběru lokality a návrh MVE .....</b>	<b>21</b>
5.1. Výběr lokality (Gabriel a kol. 1998, SPVEZ).....	21
5.2. Návrh MVE.....	21
5.3. Základní parametry vodního díla (Dušička a kol. 2003) .....	22
5.3.1. Spád.....	22
5.3.2. Průtok.....	23
5.3.3. Účinnost vodní turbíny .....	23
<b>6. Princip a stavební řešení MVE .....</b>	<b>24</b>
6.1. Princip .....	24
6.2. Stavební řešení MVE a její zařízení.....	24
6.2.1. Hlavní stavební části MVE .....	24
<b>7. Vodní turbíny .....</b>	<b>29</b>
7.1. Základní Rozdělení vodních turbín .....	29
7.2. Nejčastěji využívané vodní turbíny v České republice.....	31
7.2.1. Bánkiho turbína (obr. č. 1) .....	31
7.2.2. Francisova turbína (obr. č. 2).....	32
7.2.3. Kaplanova turbína .....	33
7.2.4. Peltonova turbína (obr. č. 5) .....	34

<b>8. Výpočet roční výroby elektřiny</b>	<b>37</b>
<b>9. Účinnost MVE:</b>	<b>38</b>
<b>10. Malá vodní elektrárna Semily</b>	<b>39</b>
10.1. Historie vodního díla	39
10.2. Parametry vodního díla MVE Semily	39
10.3. Popis vodního díla	40
10.4. Hydrologické údaje:	42
<b>11. Metodika</b>	<b>44</b>
11.1. Data	44
Hydrologické časové řady	44
11.2. Agregace	44
11.3. Zpracování dat v Microsoft Excel	45
11.3.1 Koeficient spolehlivost $R^2$	47
11.4. R Software	48
11.5. Zpracování dat v R Studiu	48
11.5.1. Autokorelační funkce	49
11.5.2. Histogram	50
11.5.3. Empirická kumulativní distribuční funkce (ecdf)	50
11.5.4. Rozptyl (variance)	51
11.5.5. Směrodatná odchylka	52
11.5.6. Krabicový graf (boxplot)	52
11.5.7. Shlukový graf	54
11.5.8. Lineární regrese	55
11.5.9. Chyby	55
<b>12. Výsledky</b>	<b>57</b>
<b>13. Diskuse</b>	<b>79</b>
<b>14. Závěr</b>	<b>80</b>
<b>15. Zdroje</b>	<b>82</b>
<b>16. Přílohy</b>	<b>85</b>



## 1. Úvod

Již odedávna mělo lidstvo snahu využít energii vodního zdroje k usnadnění své práce. Avšak, čím je civilizace vyspělejší, tím více se stává závislá na energii. V dnešní době jsme závislí na elektrické energii úplně. Proto se stále častěji klade otázka, kde vzít dostatek elektrické energie do budoucna, Bez znečištění životního prostředí a drancování nerostného bohatství.

Bohužel momentálně jsou jedním z hlavních zdrojů pro výrobu energie fosilní paliva. Tato paliva jsou pro životní prostředí značně nepříznivě a jejich zásoba se rapidně snižuje. Na našem území je nerostného bohatství málo, a proto jsme závislí na dodávce plynu i ropy ze zahraničí. Fosilní paliva ubývají, a tak se Česká republika spoléhá na jadernou energetiku. Bohužel jaderné elektrárny mají svoje velká rizika, i proto se stále častěji řeší otázka obnovitelných zdrojů energie. Zatím nejsme schopni pomocí obnovitelných zdrojů zásobovat celou republiku elektrickou energií, ale i přesto obnovitelné zdroje mají v energetice své místo. A hlavně jsou šetrné k životnímu prostředí, což do budoucna bude jedním z důležitých hledisek ( Bednář 2013)

Nenahraditelným a dobře dostupným obnovitelným zdrojem je v České Republice vodní energie. Hydroenergetický potenciál na našem území je jen z části využit. Ovšem pro výstavbu velkých vodních elektráren už je využit zcela. A tak se pozornost obrací na malé vodní elektrárny (dále MVE), které mají výkon jen několik desítek kW a mohou zbylý hydroenergetický potenciál využít. Nutno dodat, že nynější legislativa, podmínky trhu a podpora obnovitelných zdrojů, tyto malé zdroje energie příliš nepodporují (Dušička a kol. 2003).

## **2. Cíl práce**

V rešeršní části je popsán stručný přehled o využití vodní energie na našem území, jak v minulosti, tak i v současnosti. Dále je popsán stručný popis funkce malé vodní elektrárny, následně její dělení, konstrukční prvky a využívané technologie pro výrobu elektrické energie.

Hlavním cílem této práce byla analýza účinnosti malé vodní elektrárny Semily na řece Olešce, kterou jsem provedla posouzením na základě analýzy vztahu časových hydrologických řad pro průtoky, výšky hladiny a časových řad pro výkony. A následně zjistit jejich rozptyl, četnosti a posoudit závislosti. Účinnost byla popsána prostřednictvím popisu vzájemného vztahu mezi výkonem MVE a průtokem daného toku

### **3. Využití vodní energie na našem území**

#### **3.1. Historie využívání vodní energie**

Voda je od nepaměti pro člověka velmi důležitá, nejen jako zdroj pitné vody, ale i jako zdroj energie. Již ve druhém století př.n.l. se začala stavět vodní kola pro pohon vodních mlýnů. S tímto nápadem jako první přišli na Balkánském poloostrově. Vodní kolo bylo konstruováno s vertikální hřídelí, ale později se konstruovala i s horizontální hřídelí. Na našem území je využívání vodní energie datováno od roku 718, kdy byl postaven na řece Ohři u Žatce první vodní mlýn. Tento vodní mlýn byl dokonce první svého druhu ve střední Evropě. Dle dochovaných pramenů sloužil k drcení zrna a osvědčil se. A tak začala výstavba nových vodních mlýnů, které se využívaly nejen k drcení zrna, ale i na pilách. Postupem času začaly vznikat malé manufaktury, kde se využívalo síly vodní energie. V těchto manufakturách se většinou prováděla řemeslná výroba (Bednář 2013, Štoll a kol. 1977).

Od vzniku prvních vodních mlýnů až do první poloviny 19. století se k využívání vodní energie používala dřevěná vodní kola, která se během staletí různě zdokonalovala, ale princip zůstal stejný. Za zmínění ještě stojí objevení nové konstrukce vodního kola ve 14. století, tzv. korečníků. Korečníky byly jedinečné tím, že měly svrchní nátok, díky němuž se staly dvakrát účinnější než do té doby běžně využívané vodní kola. Jen pro představu běžně se využívala vodní kola o průměru 12 m a výkonu až 7,5 kW. Až s nástupem druhé poloviny 19. století došlo k vývoji vodních turbín, které jsou součástí malých vodních elektráren. Zde se přestal využívat název Vodní mlýn (SPVEZ 2010, Bednář 2013).

V letech 1848-1849 vyvinul Američan James Bicheno Francis první vodní turbínu svého druhu. Její výhoda byla ta, že se dala vyrábět sériově ve velkém. V Evropě se začala využívat od roku 1870. Ovšem měla jisté technické nedostatky. Po technické stránce byla dořešena až v roce 1886. Nutno dodat, že tato turbína se používá až dodnes.

Další typ vodní turbíny navrhl a vyvinul v roce 1877 Američan Lester Allan Pelton. Peltonova turbína funguje na principu vstřikování tlakové vody do lopatek miskovitého tvaru. Turbína se osvědčila na větší spády.

Samozřejmě i na našem území se objevily snahy o vyvinutí vodní turbíny s dobrou účinností. To se povedlo v roce 1912, kdy profesor Viktor Kaplan v Brně

vyvinul první vrtulovou turbínu a také sestrojil turbínu s natáčivými oběžnými lopatkami. Tyto lopatky podstatně zvyšují účinnost turbíny.

V letech 1912– 1919 maďarský prof. D. Bánky navrhl turbínu, která je řešena jako rovnotlaká.

Všechny výše zmíněné typy vodních turbín se využívají a vyrábějí ještě v současnosti. Samozřejmě, že se tyto turbíny stále vyvíjejí a zdokonalují, aby vyhovovaly dnešní technické úrovni (SPVEZ 2010, Bednář 1989, Štoll a kol. 1977).

Za zmínění stojí i důležití výrobci vodních turbín na našem území v minulosti. Jedná se o firmy: (SPVEZ 2010).

- Josef Prokop a synové, Pardubice: Francisova turbína
- Ignác Storek, Brno: Kaplanova turbína
- Českomoravská – Kolben, Praha: Francisova a Peltonova turbína
- ČKD Blansko: všechny výše zmíněné

### **3.2. Rozvoj malých vodních elektráren v České republice**

Rozvoj MVE v českých zemích byl značný. Inventarizací v roce 1930 se zjistilo, že v tu dobu bylo v provozu 11 785 vodních elektráren s výkonem 194,4 MW. Tento stav přetrval až do roku 1948.

V roce 1948 došlo k znárodnění hydro-energetických děl a ve velké většině to vedlo k jejich zrušení. O velké vodní elektrárny mělo zájem ústřední ředitelství ČEZ, které převzalo 152 velkých MVE s instalovaným výkonem 84 MW. Zbylé MVE byly v držení JZD, místních národních výborů a průmyslových podniků, kde postupně docházelo k jejich zániku. Např. v roce 1953 zbylo jen 4 392 MVE. V roce 1966 už jen 450 a v roce 1980 jich bylo v provozu pouhých 109. Celkem bylo zrušeno více než 11 000 MVE. Naštěstí zrušení většiny MVE proběhlo pouze administrativně. U vodních děl nedošlo k demontáži soustrojí. Takže bylo možno je snadno uvést do provozu prakticky ihned. Samozřejmě během několika let byla díla poničená velkou vodou a korozí, přesto jejich oprava ještě nebyla tak finančně náročná. V dnešní době vychází najevo, že k demontáži soustrojí nedošlo, protože se u těchto děl počítalo se znovu spuštěním v případě útoku na naše území. Velké vodní elektrárny jsou snadným cílem náletů. V tomto okamžiku by posloužily jako záloha pro výrobu elektrické energie zrušené malé vodní elektrárny (Dušička a kol. 2003, SPVEZ 2010).

Nástupem 80. let došlo k uvolnění malých vodních elektráren do soukromého sektoru bylo totiž zjištěno, že MVE jsou významným zdroje elektrické energie. Jejich instalovaný výkon by se pohyboval kolem 530 MW, roční výroba by činila 1 850 GWh/rok a dále bylo posouzeno, že další lokality pro výstavbu nových MVE by mohly přinést dalších 650 MW. Což není vůbec zanedbatelné. Díky tomu mohli soukromníci budovat nová díla a opravovat stávající. Nová vodní díla byla navíc osvobozena od daně a to po dobu deseti let, ale byl v tom háček. Soukromníkům se povolila pouze díla, u kterých roční výkon nepřesáhl 200 000 kWh/rok. Těto roční výrobě vyhovovala jen ta nejmenší hydroenergetická díla s instalovaným výkonem do 35 kW (Gabriel a kol. 1998).

### **3.3. Stav od roku 1990 po současnost**

S příchodem roku 1990 bylo schváleno úplné uvolnění soukromého podnikání v tomto sektoru. Maximální hranice ohledně instalovaného výkonu byla zrušena a mohla naplno začít obnova starých MVE a výstavba nových děl, ale jen pouze v místech, kde kdysi v minulosti stálo vodní dílo. Je jedno, jestli šlo o vodní mlýn nebo hamr. Valná většina MVE je v soukromém sektoru. Některé velké MVE vlastní ČEZ. Důležitým posunem bylo i zlepšení podmínek pro výkup elektřiny (Dušička a kol. 2003, Gabriel a kol. 1998, SPVEZ 2010).

Také byl přijat zákon, který osvobozuje nové MVE do výkonu 1 MW od daně z příjmu a to od data uvedení do provozu po dobu 5 let. Dále je uzákoněný povinný výkup elektrické energie po dobu dvaceti let. V dnešní době už je obrovský problém postavit novou MVE, protože je málo volných lokalit pro výstavbu a hlavně je potřeba k tomu velké množství povolení, které trvají získat až 6 let. A není vždy jasný kladný výsledek. Výkupní cena je poměrně nízká, viz. tabulka č. 1. Výstavba se dá provádět jen v lokalitách, jak už bylo zmíněno, kde dřív stálo vodní dílo. Při vyčerpání veškerých volných lokalit výjimečně povolí Povodí výstavbu nové MVE na nové lokalitě. Dále je obrovský problém s připojením provozoven do distribuční soustavy, kvůli její vyčerpané kapacitě a zastarání (Dušička a kol. 2003).

Momentální trend je vytvářet tvrdý administrativní a ekonomický tlak na znemožnění výstavby nových MVE a na omezení využití zbývajících hydroenergetického potenciálu ČR.

Do roku 2013 instalovaný výkon všech malých elektráren v ČR činil 330,2 MW. Celkový počet MVE se odhaduje na cca 1470 (ČEZ).

V Tabulce č. 1 je srovnání výkupních cen z obnovitelných zdrojů v CZK/kWh za uplynulé roky.

zdroj	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
fotovoltaika	13,46	13,46	12,79	12,15	5,5	6,16	2,83	0	0
Větrné elektrárny	2,46	2,46	2,34	2,23	2,23	2,23	2,12	2,014	1,98
Malé vodní elektrárny	2,39	2,6	2,70	3,00	3,00	3,19	3,23	3,23	3,23
biomasa	3,37	4,21	4,49	4,58	4,58	4,58	3,73	3,335	3,263
bioplyn	3,04	3,9	4,12	4,12	4,12	4,12	3,55	0	0

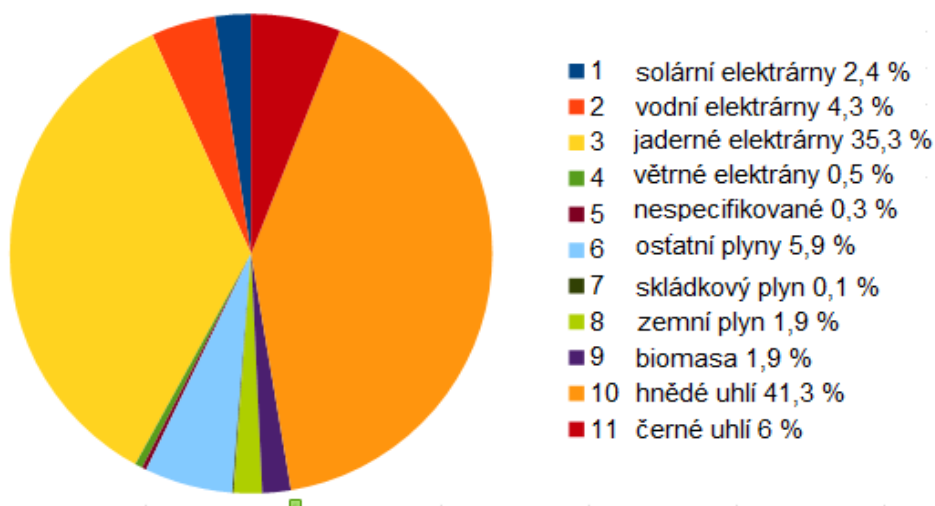
Tabulka č. 1 Srovnání výkupních cen z obnovitelných zdrojů v CZK/kWh

Zdroj: ČSVE

(upraveno autorem)

Graf 1 znázorňuje podíl výroby elektrické energie v České Republice za rok 2013

Podíl výroby elektřiny za rok 2013 v ČR



Graf 1 podíl výroby elektřiny za rok 2013

Zdroj: ERU, MPO

(upraveno autorem)

### **3.4. Hydroenergetický potenciál v ČR**

Česká republika nemá moc velký hydroenergetický potenciál, protože velkých řek tu máme málo. Všechny významnější toky, které získaly na mohutnosti odvádějí vodu do sousedních států. Přesto je vodní energie důležitým a cenným zdrojem elektrické energie a to díky velkému množství menších říček a potoků, kde svoji roli hraje hlavně větší spád. Momentálně je na našem území hydroenergetický potenciál využit asi jen z 2/3. Vodní elektrárny se řadí mezi jedny z nejšetrnějších výrobců elektrické energie. Např. každá vyrobená kWh uspoří 1 kg uhlí. Další výhodou vodních elektráren je jejich životnost, která se počítá minimálně na 50 let. Mají nízkou poruchovost a nedochází k zatěžováním elektrické sítě, narozdíl od jiných obnovitelných zdrojů. Protože mají stálý výkon v určitém časovém horizontu a vyvažují napětí v přenosné soustavě (Dušička a kol. 2003, Gabriel a kol 1998).

Co je to hydroenergetický potenciál vodního toku? Je to údaj, který určuje celkovou energii odtékající vody toku v určité lokalitě. Energie toku je odvozená podle odtokové křivky a spádu. Určuje se z něj jednotka v kWh/rok. Každý tok má svoji potenciální energii. Rozlišujeme tři typy hydroenergetického potenciálu a to potenciál hrubý, teoretický a reálně využitelný (Pažout 1990).

#### **3.4.1. Hrubý energetický potenciál**

Hrubý energetický potenciál povrchových toků má evidenční charakter a určuje se pomocí nadmořských výšek pro hodnocenou oblast a příslušných průměrných průtoků. Vztahuje se ke kótě hladiny moře, do něhož ústí daný tok, anebo ke kótě hladiny toku na státní hranici. Pro Českou republiku by stanoven k hraniční kótě (Gabriel a kol. 1998).

#### **3.4.2. Teoretický hydroenergetický potenciál**

Teoretický hydroenergetický potenciál počítá se 100% využití spádu toku a jeho průtoku. Tím představuje teoretické zásoby vodní energie v tocích.

**Z průtoku se počítají dvě hodnoty:**

- Q50 = střední průtok s 50% pravděpodobností překročení.
- Q95 = střední průtok s 95% pravděpodobností překročení.

Vypočítá se dle vzorce (1):

$$Pt = g \cdot Q \cdot H \quad (1)$$

,Zdroj: (Dušička a kol 2003)

,kde  $Q$  je průtok v jednotkách  $[m^3/s]$ ,  $H$  je spád toku  $[m]$  a  $g$  = gravitační konstanta  $9,81 m/s^2$

Pro veškeré toky v České republice je vyhodnocený hydroenergetický potenciál ve Směrných vodohospodářských plánech.

V České republice je hydroenergetický potenciál stanovený na  $Pt = 1500$  GWh/rok. Zatím je využito cca 70%. Pro větší hydroenergetická díla už tu není mnoho využitelných lokalit. Z nevyužitého hydroenergetického potenciálu celých 70% náleží malým vodním tokům, proto na našem území mají a budou mít hlavní význam MVE (Gabriel a kol. 1992, Pažout 1990).

### **3.4.3. Reálně využitelný hydroenergetický potenciál**

Reálně využitelný hydroenergetický potenciál vodního toku je vždy podstatně menší než teoretický hydroenergetický potenciál. Je to dáno tím, že v praxi nelze počítat se 100% využitím vodního spádu a průtoku a to především kvůli osídlení, vybudovaným komunikacím, chráněným krajinným územím atd. U celkového průtoku se také musí počítat se stálým průtokem, který se v řece musí nechat z hlediska ekologického a nelze ho využít pro výrobu elektrické energie. Reálná není ani 100% přeměna vodní energie v elektrickou. Vznikají různé ztráty, lze je rozdělit do tří skupin: (Dušička a kol. 2003, Gabriel a kol 1992, Arndt a Gulliver 1991).

#### **Ztráty:**

- Ztráty na spádu: nevhodné geologické a topografické podmínky, ztráty třením, místní ztráty.
- Ztráty na průtoku: průsak, výpar.
- Ztráty při převodu potenciální energie vody na mechanickou a elektrickou: účinnost turbín a generátoru, ztráty v přenosné soustavě, ztráty v soustrojí MVE.



Vezmeme-li v potaz tyto všechny poznatky, záhy zjistíme, že technicky využitelný hydroenergetický potenciál představuje 40 – 50 % potenciálu teoretického (Gabriel a kol 1992).

## **4. Druhy malých vodních elektráren a jejich klasifikace**

### **4.1. Základní pojmy a názvosloví**

Pro navrhování, rekonstrukce, výstavbu a provoz malých vodních elektráren (MVE) je norma podle které se musí řídit ČSN 73 68 81 – malé vodní elektrárny. (SPVEZ 2010)

#### **Z této normy vychází základní názvosloví a pojmy:**

- Malými vodními elektrárnami jsou zdroje využívající vodní energii pro výrobu elektřiny o instalovaném výkonu do 10 MW.
- Základní parametr MVE je spád, průtok turbínami, instalovaný výkon MVE a průměrná roční výroba elektrické energie.
- Instalovaný výkon je součet jmenovitých činných výkonů všech soustrojí elektrárny.
- Dosažený výkon MVE je nejvyšší činný výkon, kterého MVE může dosáhnout při daném stavu všech zařízení a při provozních podmínkách.
- Využitelný průtok je maximální průtok, který je MVE schopna při příslušném spádu energeticky zpracovat.
- Celkový spád MVE je výškový rozdíl hladin před vtokem a před vyústěním odpadu za předpokladu nulového průtoku elektrárnou.
- Čistý (provozní) spád MVE je výškový rozdíl hladin před vtokovým objektem. (vtokem turbíny) a před vyústěním odpadu (za savkou) zmenšený o ztráty v hydraulického obvodu MVE.
- Hydraulický obvod MVE jsou všechny prostory protékané energeticky využívanou vodou od prvního příčného průřezu na vtokovém objektu do posledního příčného průřezu na výtoku MVE.

## 4.2. Dělení MVE

**Podle dosažitelného výkonu:** (Broža a kol. 1993).

Dle normy ČSN 73 68 81 (malé vodní elektrárny) se dělí MVE do 4 kategorií.

- Průmyslové vodní elektrárny s instalovaným výkonem od 1 MW do 10 MW.
- Vodní minielektrárny s instalovaným výkonem od 100 kW do 1000 kW.
- Vodní mikroelektrárny s instalovaným výkonem od 35 kW do 100 kW.
- Domácí vodní elektrárny s instalovaným výkonem do 35 kW.

**Podle spádu :** (Dušička a kol 2003).

- Nízkotlaké (do 20 m)
- Středotlaké (20 – 100 m)
- Vysokotlaké (od 100 m)

**Podle charakteru pracovního režimu:** (Bednář 1989, Dušička a kol. 2003).

- Průtočné: jsou to elektrárny využívající spád, který je navýšen vzdouvacím tělesem.
- Akumulační: zde se pracuje s vodou, která je zadržena v nádrži a její odběr je řízen dle potřeby.
- Přečerpávací: jsou to typy elektráren, které využívají akumulovanou vodu, která se přečerpává ze spodní nádrže do vrchní. Vrchní nádrž leží na kopci a spodní pod kopcem, velikost spádu je určena rozdílem hladin těchto nádrží. Tyto elektrárny se také nazývají špičkové, protože v době, kdy je větší poptávka po proudu (přes den) vyrábějí elektrickou energii a v noci přečerpávají vodu z dolní nádrže do horní.

**Podle umístění strojovny:** (Brož a kol. 1993, Štoll a kol. 1977)

- Hrázové vodní elektrárny: strojovna je umístěna blízko hráze (u vzdušného líce), v tělese hráze anebo v přelivných blocích
- Jezová vodní elektrárna: strojovna je umístěna přímo v tělese jezu v jeho břehové části nebo ve spodní části.

- Věžová vodní elektrárna: strojovna je umístěna ve speciálním objektu, který má tvar věže nebo šachty. Tento objekt je umístěn v nádrži nebo zdrži.
- Členěné vodní elektrárny: mají rozdělenou strojovnu na dvě i více samostatných částí.
- Derivační vodní elektrárna: je tvořena jezem a náhonem. Náhon vede do strojovny a ze strojovny pak voda odtéká odpadním kanálem zpět do vodního toku. Zde se využívá spád mezi horní hladinou a hladinou u výtoku.
- Pilířová vodní elektrárna: soustrojí má umístěné v pilířích hráze nebo jezu.
- Podzemní vodní elektrárny: tyto elektrárny mají celou strojovnu ukrytou v podzemí.

**Podle řízení provozu:** (Dušička a kol. 2003).

- MVE s ručním ovládáním: celý provoz je řízen výhradně obsluhou.
- Automatizované elektrárny: celý provoz je řízen automatikou, která se pomocí počítače dá ovládat a kontrolovat i z domova, ale většinou není nutné do toho zasahovat, systém je schopen celou elektrárnu řídit sám. Není potřeba obsluha na místě. Případný výskyt problému nahlásí systém obsluze.
- Částečně automatizované: provoz je řízen z části obsluhou a z části automatikou, tato metoda se využívá především u malých vodních elektráren i vzhledem k finanční náročnosti.
- Dálkové řízení: elektrárny jsou řízeny ze vzdáleného velínu nebo dispečinku.

## **5. Kritéria výběru lokality a návrh MVE**

### **5.1. Výběr lokality (Gabriel a kol. 1998, SPVEZ).**

Výběr lokality pro malou vodní elektrárnu je velice důležitý a musí se řídit určitými pravidly.

#### **Pravidla:**

- Umístění: výstavba nové či rekonstrukce MVE u většiny povodí musí probíhat na místech, kde již v minulosti podobné vodní dílo stálo anebo ještě stojí (zbytky vodních mlýnů, hamrů, pil a fabrik). Některá povodí, již povolují stavbu v úplně nových lokalitách a to z důvodu toho, že na nich už je veškerý potenciál starých vodních děl využit.
- Vodní tok: z vodního toku nás nejvíce zajímá průtočné množství vody v daném profilu a velikost využitelného spádu.

#### **Do výběru lokality je nutno zahrnout mnoho dalších parametrů:**

- Vhodné geologické podmínky
- Přístup pro těžkou anebo středně těžkou techniku
- Dostatek místa pro stavbu MVE a jejich přidružených částí
- Zohlednit vyskytující se druhy fauny a flory
- Zjistit majetkoprávní vztahy k pozemku
- Vzdálenost přípojky
- Technickou a finanční náročnost stavby

### **5.2. Návrh MVE**

Důležité je MVE správně a efektivně navrhnout po stránce vodohospodářské, ekologické a územně plánovací. Do návrhu se musí také začlenit možnost připojení na elektrizační soustavu (Gabriel a Kučerová 1995).

Elektrárnu je vždy potřeba navrhnout co nejvíc efektivně, aby její účinnost byla co nejlepší vzhledem k dané lokalitě. Ke správnému návrhu a zhodnocení její efektivnosti slouží podklady: (Dušička 2003, Gabriel a Kučerová 1995).

- Geodetické a geologické.
- Hydrologické údaje (ČHMÚ, PLA).

- Informace o spádových poměrech.
- Technické řešení MVE.
- Předběžný rozpočet investice.
- Výpočet výroby elektřiny na MVE a její ekonomické posouzení.
- Výše nákladů na pořízení technologie.
- Výkupní cena platná pro danou MVE.
- Výše poplatků z provozu vodního díla, placení nájmu za vzdouvací těleso a údržbu vodního toku.

### **5.3. Základní parametry vodního díla (Dušička a kol. 2003)**

- Průtok  $Q$
- Spád  $H$
- Účinnost  $\eta$
- Výkon  $P$
- Výroba elektrické energie  $E$

Tyto parametry jsou důležité u každého hydroenergetického díla.

Pro výpočet výkonu a výroby elektrické energie jsou důležitými veličinami průtok, spád a účinnost vodní turbíny.

#### **5.3.1. Spád**

Spád  $H$  je označení pro výškový rozdíl hladiny vody před vtokem do objektu a při vyústění odpadu vodní elektrárny. Udává se v metrech. Rozlišujeme dva druhy spádů: celkový a čistý spád vodní elektrárny (Dušička a kol. 2003).

Celkový spád vodní elektrárny  $H_c$  je statický spád mezi dvěma posuzovanými úseky a to mezi začátkem a koncem posuzovaného úseku vodního toku, u kterého máme zájem ho energeticky využít. Tento spád se snadno určuje na hotovém hydroenergetickém díle pomocí nivelací úrovně hladin a to od vtokového objektu (nad jezem) až po úroveň spodní hladiny u odtoku z turbíny. Při nulovém průtoku vodním dílem. Celkový spád představuje potencionální energii vody, která bude působit na vodní turbínu pro využití výroby elektrické energie (Dušička a kol. 2003, Štoll a kol. 1977).

Čistý (provozní) spád vodní elektrárny je zmenšený o hydraulické ztráty, avšak bez odečtení ztrát na hydraulickém obvodu. Po odečtení ztrát v hydraulickém obvodu získáme užitečný spád  $H_u$ . Ten to spád nám dává reálnou představu, jak velký spád bude skutečně využitelný. Lze z něho vypočítat, jakou účinnost bude mít vodní turbína při určitém spádu a průtoku (Gabriel a kol. 1998).

### **5.3.2. Průtok**

Průtok je průtočné množství vody v daném profilu, je vyjádřen v jednotce  $m^3/s$ . Údaje o průtocích na daném úseku toku lze získat za určitý finanční obnos od Českého hydrometeorologického ústavu anebo od příslušného povodí. Pro výstavbu MVE nás nejvíce zajímají M-denní průtoky, dále pak je zapotřebí znát dlouhodobé průměrné průtoky  $Q_A$  a N-leté průtoky.

Je také důležité vědět, jaký průtok proteče vodní turbínou za jednotku času. A proto se při výpočtech musí dbát i na minimální sanační průtok, který se v řece musí nechat a nesmí se s ním nakládat pro energetické využití. Sanační průtok je předepsaný při vodoprávním řízení a je ze zákona povinný, jeho nedodržením hrozí podnikateli vysoká pokuta (Dušička 2003).

### **5.3.3. Účinnost vodní turbíny**

Účinnost vodní turbíny je stěžejní pro výpočet výroby elektřiny. Účinnost se pohybuje okolo 80 - 95 % a je dost specifická, záleží na jaké spádové a průtokové poměry je turbína využita a také na jaké poměry byla navrhnutá (Broža a kol. 1993).

## 6. Princip a stavební řešení MVE

### 6.1. Princip

Malé vodní elektrárny mění pomocí technologického soustrojí mechanickou energii vody na elektrickou energii, kterou lze dodávat do distribuční sítě.

Voda přitéká náhonem (přívodním kanálem) do strojovny MVE, kde svojí energií roztočí turbínu, ta je na společně s hřídelí s generátorem elektrické energie, toto soustrojí se nazývá turbogenerátor. Zde se mechanická energie proudící vody mění na elektrickou energii, pomocí elektromagnetické indukce. Elektrická energie se transformuje a odvádí do distribuční sítě (ČEZ, Dušička a kol. 2003).

### 6.2. Stavební řešení MVE a její zařízení

Stavební řešení MVE je přímo spjata s podmínkami v dané lokalitě a je zcela podmíněno vhodnému hydraulickému řešení.

Hydraulický návrh se určuje pomocí hydraulického obvodu vodní elektrárny. Do hydraulického obvodu spadají všechny objekty a dílčí konstrukční prvky, které jsou obtékány vodou, jsou to hlavně vtokové objekty, přivaděče, odpady vody na MVE, lapáky písku a usazovaky (Gabriel a kol. 1998, Dušička a kol. 2003).

#### 6.2.1. Hlavní stavební části MVE

- Vzduvací zařízení
- Vtokový objekt
- Přivaděče a odpady
- Výrobní objekty

#### Vzdouvací zařízení

Slouží k zvýšení vodní hladiny na toku a mají za úkol nasměrovat vodu do přivaděče. Rozeznáváme dva druhy vzdouvacího zařízení (Holata 2002).

- **Hráze** vytvářejí velkou výšku vzduť hladiny, zadržují velký objem vody. Staví se zpravidla buď zemní (sypané) nebo betonové, železobetonové a zděné. Jsou ekonomicky náročné, a proto se jen pro výstavbu MVE většinou nevyplatí. U hrází, které se postavily pro jiný účel než hydroenergetický, většinou jako zdroj pitné vody, nebo jako protipovodňová a regulační opatření, se MVE většinou staví u základových výpustí nádrží. Pro MVE má hráz obrovskou výhodu, na rozdíl od jezu. Hráz, jak bylo řečeno, zadržuje



velký objem vody, je schopna zadržet povodňové vlny a také reguluje rychlost a množství odtoku vody. To znamená, že MVE protéká konstantní průtok po dlouhý časový horizont (Dušička a kol. 2003).

- **Jezy** mají nižší výšku vzduší a zadržují podstatně nižší objem vody než hráze. Jejich pořizovací cena se odvíjí podle jejich šířky a mechanizace, která byla použita. Jejich výhodou je, že jsou finančně i ekologicky o dost méně náročné než hráze. V dnešní době se vyžaduje u jezů vyšších, které brání migraci ryb, výstavba tzv. rybích přechodů. Ryby tímto přechodem překonají výšku jezu a mohou se pohybovat bez problému dál po proudu (Holata 2002).

#### **Rozeznáváme tři druhy jezů:**

- **Pevné:** celá přelivná hrana je po celé své délce pevná a nelze jí nikterak regulovat.
- **Pohyblivé:** jez je rozdělen do několika samostatných pohyblivých jezových polí. Jezovým polem se dá ovlivnit polohu přelivné hrany.
- **Kombinované:** jez je postaven jako pevný, kromě jedné části, kde je umístěno jedno pohyblivé pole, které je vybaveno jezovým uzávěrem.

Jezy se staví buď dřevěné, kamenné, železobetonové anebo zděné.

#### **Vtokový objekt**

Nachází se u každé vodní elektrárny, jeho účelem je zabezpečit dostatečný přítok vody z toku, s co nejmenšími hydraulickými ztrátami. Tyto objekty přivádějí vodu na turbínu a proto je třeba při navrhování dodržet určité zásady (Gabriel a kol. 1998, Štoll a kol. 1977).

#### **Zásady:**

- Zajistit potřebný přítok vody na turbíny.
- Vtokové objekty musí být vhodně situovány a řešeny, aby docházelo co k nejmenším hydraulickým ztrátám, také musí svojí konstrukcí a vertikálním řešením zabránit vnikání vzduchu do hydraulického systému vodních turbín a tvoření vodních vírů na vtoku.
- Zamezení vniku větších splavenin do přivaděče, například kmeny stromů, ledy, různé odpady, ale i listí a dlouhé trávy mohou turbínu ucpat tím, že se namotají na lopatky, proto je třeba vtokový objekt usadit česlemi a

hrabačkou, která vyhrábne odpad z česel pryč a tím zamezí jejich zanesení. Nebezpečné jsou i usazeniny na dně. Tyto usazeniny se mohou dostat až k vodní turbíně a mohou způsobit silnou abrazi lopatek, proto je třeba navrhnout před vtokem do objektu MVE usazovací nádrž s proplachováním pomocí stavidla.

- Vtokový objekt musí mít provozní uzávěr, který umožňuje ovládat velikost přítoku vody do přivaděče. Ovládá se pomocí stavidla, které se buď spouští dolu anebo vytahuje nahoru.
- Konstrukční prvky vtokového objektu nesmí namrzat. Jde o obtékané části vodou, jsou to zejména česle, hrabačka, drážky uzávěrů a podobně. Namrzání zamezíme tak, že pokud možno navrhujeme, aby tyto prvky byly umístěny přímo v budově MVE, kde se udržuje stálá teplota dost vysoko nad nulou, protože při výrobě elektrické energie na turbínách dochází ke vzniku tepla. Pokud jsou mimo budovu MVE musí se zabezpečit jejich vyhřívání.

#### **Rozeznáváme dva typy vtokových objektů: (Štoll a kol. 1977)**

- Beztlakové s volnou hladinou. Tyto vtokové objekty jsou upravené pro odběr vody z jezových zdrží. Kde je výhodou, že hladina vody nekolísá vůbec nebo jen trochu.
- Tlakové, jsou upravené pro odběr vody z jezů, nebo z přehradních nádrží, kde hladina vody při regulovaném odběru významně kolísá.

#### **Přivaděče**

Mají za úkol dovést vodu k turbínám. Navíc soustřeďují spád do místa, kde se nachází vodní turbína. Je potřeba je navrhovat tak, aby docházelo co k nejmenší ztrátě energie. Z pravidla se navrhují co nejkratší, vzhledem k ekonomické stránce, pokud to neovlivní nepříznivě výšku spádu. Čím delší náhon, tím se výška spádu zvyšuje, ale musí se dobře ekonomicky propočítat, jestli se vyplatí postavit delší náhon kvůli pár kilowattům (Štoll a kol. 1977).

### Dělení přivaděčů: (Dušička a kol. 2003)

- Beztlakové, jsou to otevřené kanály a náhony, které se využívají pro přívod vody k elektrárně. Nejčastěji se navrhují s lichoběžníkovým nebo obdélníkovým profilem. Jejich výstavba většinou probíhá výkopem v terénu.
- Tlakové přivaděče se staví tam, kde je větší spád, jedná se o tlaková potrubí a tlakové štoly. Štoly se razí přímo v hornině. Tlaková potrubí mají kruhový profil. Materiál, který se používá na výrobu potrubí je ocel, litina, železobeton a plastová potrubí z polyetylenu, z polypropylenu, z PVC atd. Proudění vody v tlakových přivaděčích může být ustálené nebo neustálené z hlediska závislosti na čase. U těchto přivaděčů je nutno vypracovat hydraulický návrh a posoudit statické a dynamické zatížení. Výpočty se počítají vždy za předpokladu pro ustálené proudění. Tlakový přivaděč je dražší než beztlakový, ale u mnohých MVE se vyplatí.

Tlakové i beztlakové přivaděče se mohou kombinovat. Výhoda je získání maximálně využitelného spádu za nižší náklady než u tlakového přivaděče.

### Česle

Zhotovují se jako mříž z ocelové pásoviny. Jejich účel je zabránit nečistotám vniknutí do vodní turbíny. Nejčastěji se používají dvoje česle a to hrubé a jemné. Nečistoty, které se na česlích přichytí, jsou vyhrábnuty ven pomocí hrabačky (Gabriel a kol. 1998).

- **Hrubé česle** se nejčastěji umísťují na vtokovém objektu do náhonu. Zabraňují vniknutí velkých předmětů do náhonu. Jedná se zejména o kmeny, větve stromu a ledové kry, které by mohly ucpat celý přivaděč. Česle jsou postaveny tak, aby předměty, které jimi neprošly, byly strženy proudem zpět do vodního koryta a odpluly přes jez dál. U hrubých česlí je velikost průlin 100 – 500 mm (Gabriel a kol 1998).
- **Jemné česle** slouží k zachycení veškerých nečistot, které prošly hrubými česli. Tyto nečistoty by mohly poškodit nebo ucpat vodní turbíny. Jedná se zejména o trávy a listí. Zachycené nečistoty jsou pomocí hrabačky vyhrábnuty ven. Jemné česle jsou zhotovovány jako velice hustá mříž. Z železných nebo ocelových tyčí. Velikost průlin je v rozmezí 50 x 4 mm až 100 x 500 mm. Aby se snížil odpor při obtékání vody česlic, navrhují se tyto česlice ve tvaru kapky. Česle se navrhují tak husté i z důvodu ekologického,

je tu dán důraz na to, aby nemohly ryby a jiní živočichové vniknout do vodní turbíny (Dušička a kol. 2003).

### **Výrobní objekty**

Hlavním výrobním objektem vodní elektrárny je strojovna doprovázená zařízením, jako je rozvodna. Ve strojovně jsou umístěné turbíny, generátory, transformátory a jiné technologické zařízení, které je nutné pro správný chod MVE. Strojovna se z pravidla dělí na vrchní a spodní část. Spodní část se nachází pod úrovní podlahy strojovny MVE. Je to železobetonová stavba, která se musí posuzovat na namáhání typické pro vodní stavby. Jde o vodní tlak, průsak a vztlak. Tato část stavby je technologicky nejnáročnější. Jsou zde navrženy prostory pro soustrojí a jeho příslušenství. Je zde uložena turbína, odkud pak odvádí odpadní kanál nebo savka vodu, ze které už její energie byla použita, zpátky do vodního toku. Ve vrchní části jsou pak generátory, transformátory a jiné technologické zařízení. Avšak každá vodní elektrárna je víceméně unikátní a i strojovna se liší, záleží hodně na tom, jaké turbíny jsou tam použity, jestli horizontální nebo vertikální a samozřejmě i na spádu a okolí (Dušička a kol. 2003, Štoll a kol. 1977).

### **Odpadní kanály a jalová výpust**

**Odpadní kanál** odvádí od turbíny vodu, poté co jí předala svojí energii, zpět do původního vodního toku. Z ekonomického hlediska se staví co nejkratší. Pro odvod vody od turbíny je nejlépe využít savku. Ta zvýší rychlost odvodu vody a tím i zvýší tlak. Savka dokáže zvýšit účinnost MVE až o 30 - 40 % (Broža a kol. 1993).

**Jalová výpust** se umísťuje na přivaděči před budovu MVE. Pomocí ní se dá náhon úplně vypustit, anebo regulovat množství vody v přivaděči. Jalová výpust se také používá pro vyčištění přivaděče od usazenin a naplavenin (Broža a kol. 1993).

## 7. Vodní turbíny

Vodní turbína je rotační vodní motor, kde dochází k přeměně energie vody v mechanickou energii rotující hřídele.

Hlavní částí vodní turbíny je oběžné kolo, zařízení pro přívod a odvod vody od oběžného kola (Gabriel a kol. 1998).

### Zařízení pro přívod vody na oběžné kolo:

V zařízení, které vodu přivádí na oběžné kolo, dochází k úplné či částečné přeměně tlakové měrné energie vody v kinetickou měrnou energii. Často je přívod vody k oběžnému kolu usměrňován a regulován, tak aby proudění vody bylo po celém obvodu oběžného kola rovnoměrně rozložené.

### Oběžné kolo:

Oběžné kolo je vlastní pracovní část vodní turbíny, kruhové konstrukce, kde se nachází lopatková mříž. Při rotaci mříže dochází k přeměně energie vody v mechanickou energii (Bednář 2013).

### Zařízení pro odvod vody:

Je podstatě difuzor, kde dochází k postupnému snižování rychlosti proudění vody. Jeho důležitá část je savka, která snižuje tlak vody pod oběžným kolem.

Výběr vhodné vodní turbíny do určité lokality a příslušného spádu, je stěžejní pro celou účinnost MVE. Nevhodně zvolená turbína může předpokládanou účinnost snížit až o desítky procent. V ČR se používá celkem velké množství různých typů vodních turbín, které jsou různě konstrukčně a projekčně řešeny (Bednář 2013).

### 7.1. Základní Rozdělení vodních turbín

#### Dle způsobu přenosu energie vody na oběžné kolo:

- Rovnotlaké – akční turbíny
- Přetlakové – reakční turbíny

#### Rovnotlaké – akční turbíny:

Tlak vody před a za oběžným kolem turbíny je stejný. V rozváděcích kanálech se mění polohová energie vody na kinetickou, která se dále využívá na oběžném kole. Je nutno, aby oběžné kolo turbíny bylo umístěno nad spodní hladinou. Z toho důvodu, aby nedocházelo k brodění. Při brodění se snižuje spád a

zároveň se citelně snižuje výkon turbíny. Rovnotlaké turbíny se často označují jako akční. Patří sem zejména turbíny Peltonova a Banki (bez savky). Rovnotlaké turbíny mají nevýhodu, že u nich dochází ke snížení spádu a to z důvodu toho, že oběžné kolo musí být umístěno nad spodní hladinou. Proto se tyto turbíny používají do míst s velkými spády, kde je snížení spádu zanedbatelné (Arndt a Gulliver 1991, Bednář 1989).

#### **Přetlakové – reakční turbíny:**

V kanálech rozváděcího kola dochází jen z části k přeměně polohové energie na kinetickou, zbývající (zpravidla) větší část energie se mění až při průchodu vody oběžným kolem (lopatkovým prostorem). Tlak vody se od vstupu do oběžného kola zmenšuje a nejmenší je na výstupu. Tzn., že zde dochází k přetlaku. K zvýšení rychlosti proudící vody u výstupu oběžného kola slouží savka. Savka podstatně zvětšuje účinnost turbíny. Tento druh turbín se nazývá reakční a patří sem zejména turbíny Kaplan a Francis. Tyto turbíny se zejména využívají na menší spády a větší průtoky (Bednář 1989, Gulliver a Arndt 1991).

#### **Dle polohy hřídele oběžného kola (Bednář 1989)**

- Horizontální – vodorovné uložení
- Vertikální – svislá osa turbíny
- Šikmé – šikmá osa turbíny

**Dle orientace proudění** (záleží zde, jakým směrem přitéká a odtéká voda na oběžné kolo vzhledem k hřídeli) (Bednář 1989).

- Axiální – voda protéká rovnoměrně oběžným kolem s osou běžného kola
- Radiální – voda protéká kolmo k ose oběžného kola
- Radiálně-axiální – v oběžném kole mění proud směr z radiálního na axiální (Francisova turbína)
- Diagonální – voda protéká diagonálně vodní turbínou
- Tangenciální – proud vody působí na oběžné kolo tangenciálně

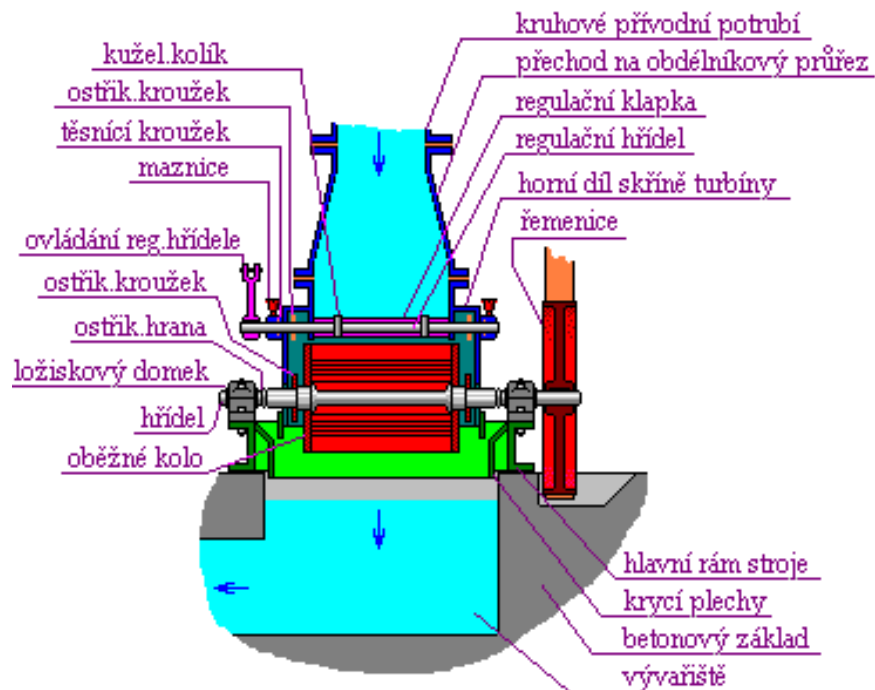
## 7.2. Nejčastěji využívané vodní turbíny v České republice

Zde popíšeme jen základní typy, protože existuje spousta jejich modifikací.

- Bánkiho turbína
- Francisova turbína
- Kaplanova turbína
- Peltonova turbína

### 7.2.1. Bánkiho turbína (obr. č. 1)

Jedná se o jednoduchou rovnotlakou, radiální vodní turbínu s dvojnásobným průtokem. Její přednosti jsou, že je nenáročná na údržbu. Nezanášá se listím a jinými naplaveninami. Využívá se na malých vodních elektrárnách. Účinnost u ní dosahuje 70 – 85%. Má všestranné využití. Zvládne bez problému větší i menší spády a průtoky. Instaluje se do míst se spádem 2 – 60 m, maximálně 200 m. Optimální průtok je 0,01 – 0,9 m<sup>3</sup>/s. Její použití je výhodnější zejména na menších tocích s větším spádem (Bednář 1989, Bednář 2013).

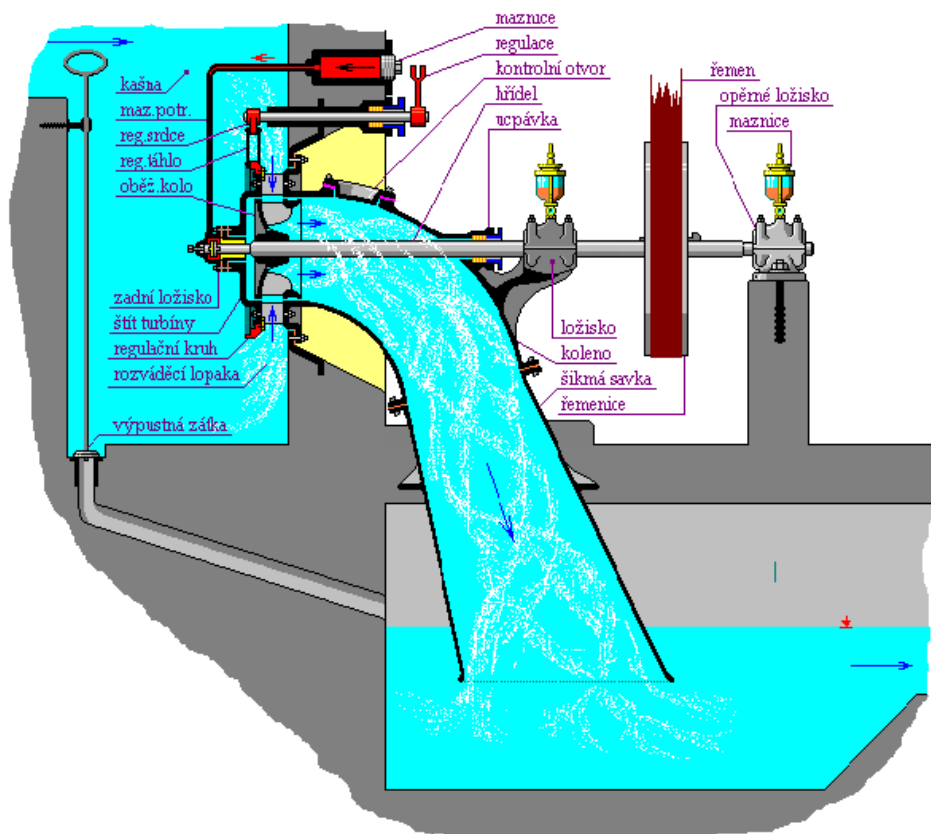


Obr. č. 1 Bánkiho turbína

Zdroj: Malá voda

### 7.2.2. Francisova turbína (obr. č. 2)

Přetlaková turbína radiálně-axiální. Tzn., že voda během své cesty strojem mění svůj tlak a přitom odevzdává svoji energii. Vyrábí se ve dvou variantách uložení hřídele a to vertikální a horizontální. Tyto turbíny u nás v minulosti patřily k nejpoužívanějším pro celou oblast průtoků a spádů a to především z hlediska poměru cena výkon. Efektivita turbíny dosahuje až 90%. Lze zde regulovat pouze rozváděcí lopatky. Lopatky oběžného kola jsou pevné. Nevýhoda je, že je náchylná na nečistoty ve vodě. Snadno se ucpe na rozdíl od Bánkiho turbíny. Využívá se zejména pro střední až vyšší spády a větší průtoky nejlépe konstantní. Dříve se instalovala na spády už od 0,8 m, ale nyní kvůli účinnosti je doporučeno ji instalovat na spády vyšší než 10 m. Ideální průtok je 0,18 – 10 m<sup>3</sup>/s (Bednář 1989, Noyes 1980).



Obr. č. 2 Francisova turbína

Zdroj: Malá voda



### 7.2.3. Kaplanova turbína (obr. č. 4)

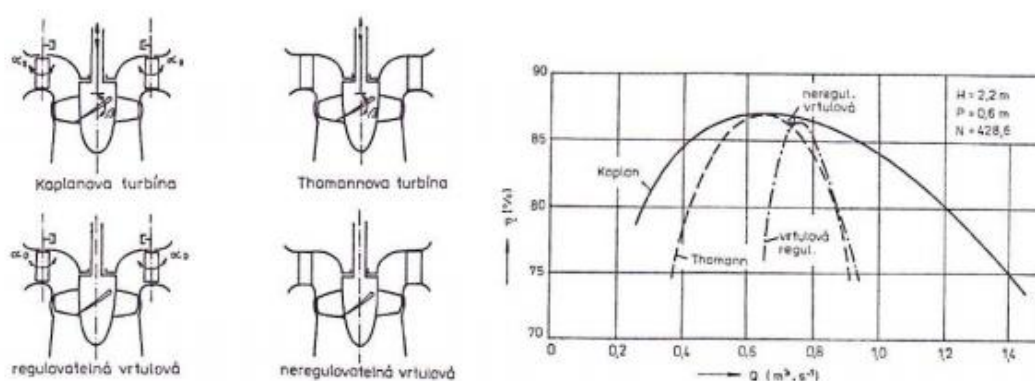
Patří mezi přetlakové, axiální turbíny. Její přednost spočívá ve velmi dobré možnosti regulace. Regulovat se dá díky natáčivým oběžným i rozváděcím lopatkám. Uplatňuje se zejména v místech, kde není průtok a spád konstantní, proto je vhodná pro jezové a říční elektrárny. Při velkém kolísání spádu a průtoku nedochází v turbíně k velkým změnám hydraulické účinnosti. Tato turbína se vyrábí s horizontálním i vertikálním uložením hřídele. Díky regulovatelným lopatkám má vyšší účinnost než Francisova turbína. Využívá se pro spády malé od 1 m, optimálně do 20 m, ale lze jí využít až pro spády do 70,5 m. Hltnost turbíny se pohybuje od 0,15 až do několika desítek  $\text{m}^3/\text{s}$ . Zpravidla se tyto turbíny instalují na malých spádech při velkých průtocích, které nejsou konstantní (Bednář 1989, Mathur a Wagner 2011).

Kaplanova turbína, má několik základních modifikací dle možnosti regulace rozlišujeme (obr. č. 3):

- Klasická kaplanova turbína, S-turbína – oběžné i rozváděcí lopatky jsou natáčivé
- Neregulovatelná vrtulová – oběžné i rozváděcí lopatky jsou pevné
- Regulovatelná vrtulová – pevné oběžné a natáčivé rozváděcí lopatky
- Thomasova, Semi-Kaplan – natáčivé oběžné a pevné rozváděcí lopatky

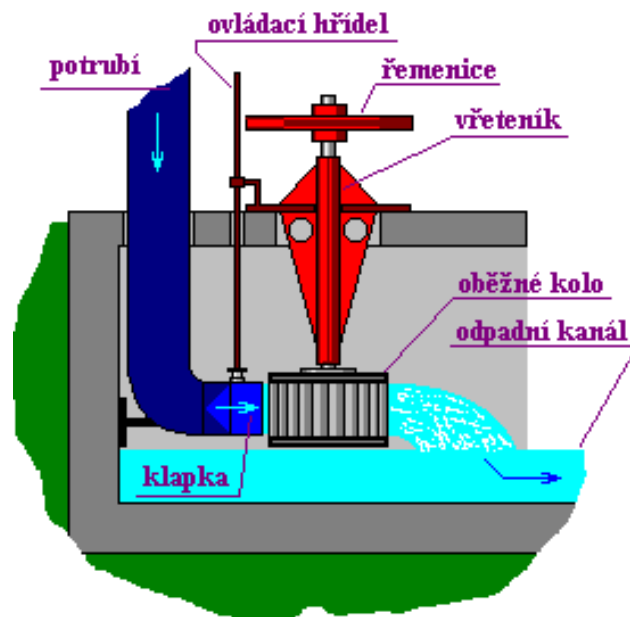
Účinnost kaplanovy turbíny se pohybuje u menších okolo 88 %, větší dosahují více než 90%.

#### Způsob regulace kaplanovy turbíny



Obr. č. 3 Způsob regulace Kaplanovy turbíny

Zdroj: ČEZ

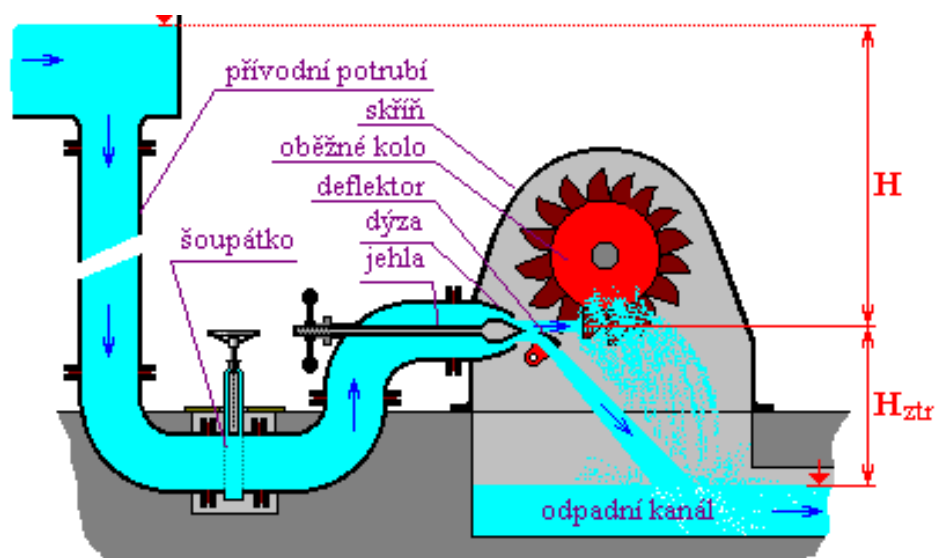


Obr. č. 4 Kaplanova turbína

Zdroj: Malá voda

#### 7.2.4. Peltonova turbína (obr. č. 5)

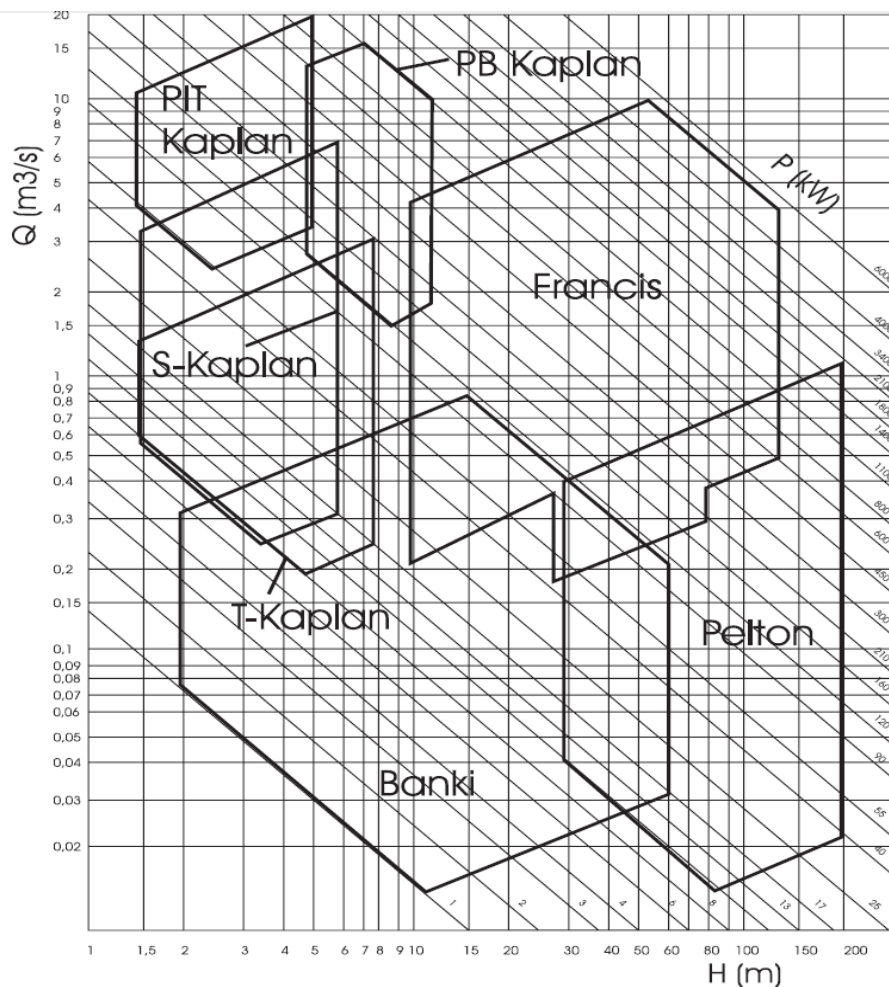
Je rovnotlaká. Podobá se zdokonalenému vodnímu kolu, avšak účinnost má celkem vysokou u malé turbíny je 80 – 85 % a u velké 85 – 95 %. Peltonova turbína se využívá na velkých spádech a nižších průtocích. Je nenáročná na údržbu nezanáší se nečistotami. Vyrábí se pouze s vertikální hřídelí. Tato turbína pracuje na základě vysokého vodního tlaku. Voda proudí na obvod rotoru pomocí trysek. Z přívodního potrubí voda vystupuje kruhovým paprskem a dopadá na lopatky lžičkovitého tvaru, vzniklou silou se rozpožbuje rotor turbíny. Největší turbíny dosahují výkonu až 200 MW. Je ideální pro spád 15 – 200 m, ale zvládne i daleko vyšší spády až do 1800 m. její hlnost se pohybuje od 0,01 – 1,2 m<sup>3</sup>/s, což odpovídá nižším průtokům (Bednář 2013, Mathur a Wagner 2011).



Obr. č. 5 Peltonova Turbína

Zdroj: Malá voda

Obrázek č. 6 zobrazuje základní charakteristiku vodních turbín, které jsou u nás nejčastěji využívány. Je zde znázorněn jejich dosažitelný výkon  $P$ , který je závislý na průtoku  $Q$  a spádu  $H$  vodního zdroje.



Obr. č. 6. Základní charakteristika vodních turbín

Zdroj: ČEZ

## 8. Výpočet roční výroby elektřiny

Roční výroba elektřiny se dá spočítat až po té, kdy bylo navrhnuo, jak bude MVE řešena, kolik bude mít soustrojí, jaké turbíny budou osazeny a jaký bude instalovaný výkon. Po tomto kroku lze výpočty zpřesnit. Tento výpočet je velice důležitý a slouží k zjištění ekonomické efektivity MVE (Holata 2002, SPVEZ 2010).

**Výroba elektřiny se určí ze vztahu (2):** (SPVE 2010)

Výkon MVE kW:  $P_{el} = \rho * g * Q_T * H * \eta_T * \eta_G * \eta_P$  (2)

Měrná hmotnost vody:  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

Tíhové zrychlení:  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Průtok turbínou  $\text{m}^3/\text{s}$ :  $Q_T$  = je ovlivněn maximální hltností a minimálním průtokem, který je schopna turbína zpracovat.

Užitečný spád [m]:  $H$

Účinnost turbíny:  $\eta_T$

Účinnost generatoru:  $\eta_G$

Účinnost převodu:  $\eta_P$

**Roční výroba elektřiny  $E_G$  v kWh se určí ze vztahu (3):** (SPVEZ 2010)

Roční výroba kWh:  $E_G = P_{el} * 24 * M$

Počet dní (doba provozu):  $M$

Tabulka č. 2 zobrazuje účinnost turbín, generátorů a převodů

$\eta$ turbíny	$\eta$ generátoru	$\eta$ převodů
0,85 – 0,92	0,88 – 0,94	0,94 – 1,0

Tabulka č. 2 účinnosti

Zdroj SPVEZ

(upraveno autorem)

## 9. Účinnost MVE:

Při výrobě elektrické energie vždy dochází ke ztrátám. Které vznikají prouděním, třením i magnetickou indukcí. Celková účinnost MVE se skládá z více částí a to:

- Účinnost vodního díla
- Účinnost turbíny
- Účinnost převodů a generátoru

### Účinnost vodního díla

Určuje se jako poměr mechanické energie na hřídeli turbíny k teoretické energii (potenciálu), která se získává mezi odběrem vody z toku a vyústěním zpět do původního koryta. Tato účinnost zahrnuje ztráty spojené průtokem vody celou MVE. Jedná se o ztráty na přivaděči, odpadního kanálu, hrubých a jemných česlí. (Holata 2002)

### Účinnost turbíny

Zahrnuje ztráty spojené s přeměnou na mechanickou energii v turbíně. Pro dosažení vhodné účinnosti turbíny je nutné zvolit správný typ turbíny pro danou lokalitu a instalovaný výkon. (Bednář 1989)

### Účinnost převodů a generátorů.

Pohání generátor prostřednictvím převodů a pak jako elektrická energie vystupuje z MVE. I tyto přeměny jsou samozřejmě spojeny se ztrátami. (Bednář 2013)

Sečtením všech těchto ztrát lze získat celkovou účinnost MVE. Účinnost MVE se dá ještě posoudit z hydrologického hlediska, kde se posuzuje vzájemná analogie výkonu MVE a průtoku.

## 10. Malá vodní elektrárna Semily

Na toto vodní dílo se nadále zaměřím. V této práci mám posoudit celkovou účinnost MVE. Získala jsem naměřená data za rok 2012. Nutno podotknout, že tento rok byl spíše suchý.

MVE se nachází v Libereckém kraji ve městě Semily na řece Olešce. Elektrárna je postavena na místě bývalého mlýnu.

### 10.1. Historie vodního díla

Na řece Olešce kousek před soutokem s řekou Jizerou byl postavený v roce 1864 mlýn s pilou, tento mlýn patřil mlynáři Strnádkovi až do roku 1936. Po roce 1936 v něm sídlila továrna pro výrobu křišťálových lustrů až do roku 1954, kdy došlo k znárodnění. Od té doby budova postupně chátrala i náhon mlýnu byl zcela zničen. Budova mlýnu se zrekonstruovala a teď v ní sídlí východočeská energetika. Obnova jezu a náhonu přišla až v roce 2005 za účelem postavení nové MVE. Výrobní objekt se nemohl postavit na místě budovy bývalého mlýnu, proto byla vystavená zcela nová budova. (Vodní mlýny 2012)

### 10.2. Parametry vodního díla MVE Semily

Jedná se o derivační nízkotlakou MVE. Podle dosaženého výkonu spadá do třetí kategorie mikroelektrárny (od 35 až do 100 kW). Instalovaný výkon je zde 95 kW. Soustrojí tvoří dvě turbíny Kaplanova a Francisova turbína.

Výška hrubého spádu	4,0 m
Hltnost turbín: Francisova turbína:	0,70 – 0,15 m <sup>3</sup> /s
Kaplanova turbína:	2,50 – 0,70 m <sup>3</sup> /s
Instalovaný výkon:	1 x 20 kW, 1 x 75 kW
Roční výroba elektrické energie:	254 813 kWh
Délka náhonu:	301 m

### 10.3. Popis vodního díla

**Vzdouvací objekt:** (obr. č. 1, přílohy)

Pevný jez na řece Olešce v ř. km 1,017 se nachází na konci levotočivého oblouku. Jez má betonovou spodní stavbu, která je obložena z lomového kamene. Výška jezu činí 2,45 m, jez má zaoblený tvar s délkou přelivné hrany 14,30 m.

**Základní parametry jezové zdrže:**

- Celkový objem vody je 3 300 m<sup>3</sup>
- Plocha jezové zdrže činí 3 900 m<sup>2</sup>
- Délka jezové zdrže sahá až do vzdálenosti 280 m

Těsně nad jezem po pravém břehu se nachází vtokový objekt do přivaděče MVE Semily.

Pod jezem se nachází kamenný vývar, který je ukončen betonovým prahem. Vývar slouží k tlumení kinetické energie vodního skoku.

Mezi pravým kamenným pilířem jezu a rámu vtokových stavidel do náhonu je zřízen výstup z komůrkového rybího přechodu.

**Rybí přechod:** (obr. č. 2, přílohy)

Je situován mezi levou kamennou zdí náhonu a pravou opěrnou zdí v podjezí. Vstup do rybochodu se nachází v prostoru vývařiště. Rybí přechod je postaven ze žulových kvádrů.

**Vtokový objekt:** (obr. č. 3, přílohy)

Vtok do přivaděče se nachází na pravém břehu těsně nad jezem. Je hrazen dvěma dřevěnými uzavíracími stavidly, které se pohybují v ocelovém rámu. Každé stavidlo má rozměry na šířku 2,88 m a na výšku 1,64 m. ke stavidlům je postavena lávka pro jejich obsluhu. Před stavidly se nachází norná stěna pro odklonění plovoucích nečistot zpět do vodního toku.

**Přivaděč vody (náhon):** (obr. č. 4, přílohy)

Otevřený náhon má celkovou délku 421 m s lichoběžníkovým průtočným profilem. Šířka u dna je 3,10 m se sklony svahů 1:1. Hned na začátku je přivaděč opatřen proplachovací propustí. Ve druhé třetině přivaděče je na levém břehu koryta



zřízen bezpečnostní přeliv a těsně u strojovny je vybudovaná jalová propust. (obr. č. 5, přílohy)

### **Strojovna MVE:**

Objekt strojovny má železobetonovou spodní stavbu se dvěma otevřenými turbínovými kašnami a zděnou nadzemní částí se sedlovou střechou. Budova je celkem malá, její rozměry jsou 5,10 x 9,65 m. V budově jsou nainstalovány stavidla pro uzavření vtoku do strojovny (obr. č. 6, přílohy).

Samotný vtok do turbínových kašen je chráněn jemnými ocelovými česlemi, které brání vniku nečistot do vodních turbín, česla jsou čištěna hrabačkou, která je plně automatizovaná (obr. č. 8, přílohy). V levé turbínové kašně je osazena Kaplanova turbína s vertikální hřídelí, tato turbína je přetlaková axiální. Jedná se o typ S-turbíny. Vyznačuje se tím, že má natáčivé oběžné i rozváděcí lopatky. A v pravé kašně je umístěna Francisova turbína, přetlaková, radiálně-axiální se svislou hřídelí.

Turbosoustrojí s Francisovou turbínou je opatřeno řemenovým převodem (vícenásobné klínové řemeny), jež pohání asynchronní elektromotor. Turbína má výkon 20 kW. Kaplanova turbína je spojena řemenovým převodem s asynchronním generátorem o výkonu 75 kW. (obr. č. 7, přílohy). Všechny turbíny pracují s návrhovým spádem 4,05 m. Francisova turbína o hltnosti 0,70 m<sup>3</sup>/s využívá i minimální průtok vody 0,150 m<sup>3</sup>/s. Kaplanova turbína má hltnost 2,50 m<sup>3</sup>/s a zpracovává průtok už od 0,700 m<sup>3</sup>/s. Regulace všech turbín je zajištěna pomocí hydraulických agregátů, které řídí obsluha nebo automatika. (obr. č. 9, přílohy).

### **Odpadní kanál: (obr. č. 10, přílohy)**

Je tvořen dvěma savkami. Které odvádí vodu od turbín. Pomocí savek se zvýší rychlost odvodu vody a tím se zvýší i tlak vody na turbíny. Savky zde zvýšily účinnost turbín o 30 – 40 %. Savky jsou v délce 2 m a ústí do otevřeného kanálu 6, 5 m dlouhého, který je spojen s korytem řeky Oleška v ř. km. 0,675.

Provoz MVE ovlivňuje průtok řeky v délce 342 m. A proto byl nařízen minimální průtok vody řekou na 0,155 m<sup>3</sup>/s. MVE zpracovává průtoky vody od 0,150 m<sup>3</sup>/s až do 3,200 m<sup>3</sup>/s. pokud je průtok v řece Olešce nižší než 0,330 m<sup>3</sup>/s. Provoz MVE se musí zastavit.

**Žabí tůň:** (obr. č. 11, 12, přílohy)

Majitel nechal zhotovit žabí tůň. Má rozměry 4 x 5 m a je hluboká od deseti cm po 70 cm.

#### 10.4. Hydrologické údaje:

Základní hydrologická data pro vodní tok Oleška – profil pevného jezu v Semilech byla zaslána od Povodí Labe – pobočka Hradec Králové

Plocha povodí: 170,12 km<sup>2</sup>

Průměrné roční srážky: 795 mm

Průměrný roční průtok: 1,517 m<sup>3</sup>/s

Hydrologické číslo povodí: 1-05-01-053

Důležitá data pro návrh vodní elektrárny jsou M – denní průtoky a N – leté průtoky

#### Hodnoty průměrného překročení průtoku po dobu (M – denní průtoky):

M    30    60    90    120    150    180    210    dní v roce

QM   3,66   2,40   1,77   1,40   1,12   0,92   0,75   m<sup>3</sup>/s

M    240    270    300    330    355    364    dní v roce

QM   0,61   0,49   0,39   0,28   0,18   0,13   m<sup>3</sup>/s

#### Velké vody opakující se jednou za (N – leté průtoky):

N    1    2    5    10    20    50    100    let

QN   24,3   36,1   54,7   71,0   89,0   115   138   m<sup>3</sup>/s

#### 10.5. Stanovení hygienického průtoku: (Holata 2002)

$$Q_H = (Q_{355} + Q_{364}) / 2$$

$$Q_H = (0,18 + 0,13) / 2$$

$$Q_H = 0,155 \text{ m}^3/\text{s}$$

Hygienický průtok, jest minimální průtok, který v řece musí být zachován a nelze ho užít pro výrobu elektrické energie. Pro MVE Semily byl hygienický průtok stanovený na  $0,155 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## **11. Metodika**

### **11.1. Data**

Od povodí Labe jsem získala naměřená data o průtoku a výšce hladiny na řece Olešce pro říční kilometr 1,017. Data jsou měřena v pravidelném intervalu po 15 minutách. Dále jsem získala data o výrobě elektřiny na MVE Semily od ČEZ a. s. tyto data jsou také v 15 minutových krocích. Navíc jsou všechny naměřeny pro celý rok 2012.

Z těchto dat budu zjišťovat, při jakém průtoku řeky byla největší účinnost MVE Semily.

#### **Kontrola naměřených dat**

Nejprve jsem musela vizuálně zkontrolovat naměřená data, která jsou v hydrologických časových řadách. Protože při měření dat občas došlo k poruchám. Zejména při výpadku proudu, některá data chyběla, anebo byla naměřena jako nulový průtok či výkon. Tyto chybná data jsem neopravovala, pouze je vymazala, aby nedošlo ke zkreslení výsledků. Další nulové hodnoty u výkonu, které vznikly tím, že elektrárna nevyráběla elektrický proud zejména při nízké hladině vody v řece anebo naopak při vysoké hladině. Budou zpracovány a posouzeny zvlášť.

#### **Hydrologické časové řady**

Popisují hydrologické procesy, které se udály v zaznamenaném čase a kvantitativně vyjadřují vlastnost zájmového hydrologického procesu (Loučková 1992).

#### **Analýza hydrologických časových řad**

Zkontrolované časové řady zbavené chyb a nulových hodnot. Bylo nutno nejprve zpracovat pomocí agregace.

### **11.2. Agregace**

Je sloučení dat v časové řadě, při kterém dochází ke zkrácení časového kroku. U průtoku se provádí agregace zprůměrováním hodnot za určitý čas. Při agregaci většího časového úseku dochází ke snížení extrémních hodnot (maximum, minimum). Tyto hodnoty jsou menší např. u 6 hodinového časového kroku než u 30 minutového. Dochází zde ke snížení rozptylu. Z toho vyplývá, že rozpětí mezi extrémními hodnotami klesá. Při agregaci dochází k určitému vyhlazování dat (Loučková 1992, Kožíšek a Stieberová 2014, Máca 2014).

Mnou zpracované časové řady jsem agregovala do 10 časových kroků (tabulka č. 3):

minuty	minuty
15	240 (4 hod.)
30	360 (6 hod.)
45	720 (12 hod.)
60	1440 (24 hod.)
120 (2 hod.)	10080 (168 hod. – 1 týden)

Tabulka č. 3 Agregace časových řad

### 11.3. Zpracování dat v Microsoft Excel

Veškeré agregace časových řad jsem prováděla v Microsoft Excel a to pomocí funkce PRŮMĚR. U všech 10 zmíněných časových kroků jsem provedla agregaci klouzavým aritmetickým průměrem. Agregace byla provedena pro průtok Q [ $\text{m}^3/\text{s}$ ], výkon turbíny P [kWh] a výšku vodní hladiny H [m].

Ukázka klouzavého aritmetického průměru v Excelu pro agregaci 30 minutového kroku: (Obr č. 7 a 8)

Krok 1:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1								agregace	Q
2		datum	čas	H	Q	P		30 minut	45 minut
3		01.01.2012	00:00	54,638	2,375	49		=PRŮMĚR(E	2,373
4		01.01.2012	00:15	54,546	2,366	49		2,373	2,374
5		01.01.2012	00:30	54,638	2,375	49		2,377	2,377
6		01.01.2012	00:45	54,654	2,377	48		2,378	2,378
7		01.01.2012	01:00	54,669	2,378	49		2,379	2,381

Obr. č. 7 Agregace

Krok 2:

PRŮMĚR		=PRŮMĚR(E4:E6)							
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1								agregace	Q
2		datum	čas	H	Q	P		30 minut	45 minut
3		01.01.2012	00:00	54,638	2,375	49		2,372	2,373
4		01.01.2012	00:15	54,546	2,366	49		=PRŮMĚR(E	2,374
5		01.01.2012	00:30	54,638	2,375	49		2,377	2,377
6		01.01.2012	00:45	54,654	2,377	48		2,378	2,378
7		01.01.2012	01:00	54,669	2,378	49		2,379	2,381

Obr. č. 8 Agregace

Tímto způsobem jsem postupně agregovala celé časové řady ve všech krocích.

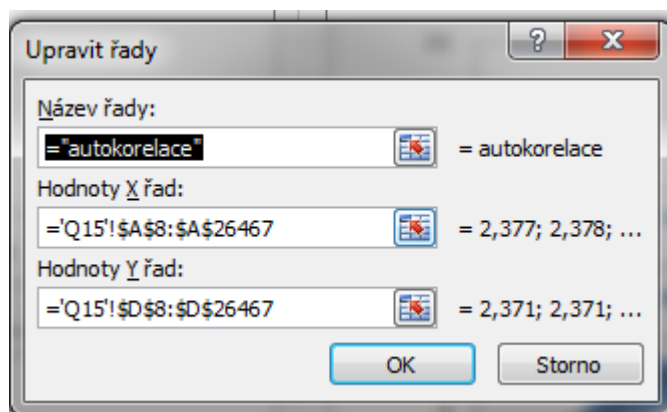
Veškeré agregace po všech časových krocích bylo nutno uložit do textových souborů. Textové soubory jsem využila při dalším zpracování dat, které jsem prováděla v **R Studiu**.

Dále jsem v Excelu vytvořila graf, kde je znázorněn vývoj průtoku, výkonu a výšky hladiny za celý rok 2012 (Graf 2). A zpracovala grafy, které znázorňují pomocí autokorelace závislost časově blízkých hodnot pro hodnoty naměřené v čase (t) k hodnotě (t-1), (t-2) až po posun do (t-4). Těmito grafy jsem proložila lineární spojnici trendů. A zjistila hodnotu koeficientu spolehlivosti  $R^2$ . (Graf 3 a, b, c, d).

Ukázka zpracování časové řady pomocí posunu Lag (obr. č. 10). Na obrázku jsem zobrazila začátek a konec časové řady i posunutých časových řad. Na konci časových řad je zobrazen řádek modře zbarvený. Po který se hodnoty užívají do grafu. Zbylé hodnoty pod řádkem se pro grafické zpracování již nepoužívají. Nepoužívané hodnoty vznikly posunutím časové řady.

Hodnoty, jež jsou vybrané naznačující posun Lag Q [t-3].

Obrázek č. 9 popisuje, jaké hodnoty se zadávaly do grafu za osu x a osu y (opět zde popisují Lag Q [t-3]).



Obr. č. 9 Hodnoty osy x a y

	A	B	C	D	E
1	AUTOKORELACE ČASOVÝCH ŘAD				
2	PRO PRŮTOK Q (15 MINUT)				
3					
4	Q (t)	Lag			
5	2,371	Q (t-1)	Lag		
6	2,371	2,371	Q (t-2)	Lag	
7	2,376	2,371	2,371	Q (t-3)	Lag
8	2,377	2,376	2,371	2,371	Q (t-4)
9	2,378	2,377	2,376	2,371	2,371
10	2,379	2,378	2,377	2,376	2,371
11	2,383	2,379	2,378	2,377	2,376
12	2,373	2,383	2,379	2,378	2,377
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
462	2,86	2,854	2,86	2,872	2,878
463	2,854	2,86	2,854	2,86	2,872
464	2,842	2,854	2,86	2,854	2,86
465	2,83	2,842	2,854	2,86	2,854
466	2,824	2,83	2,842	2,854	2,86
467	2,83	2,824	2,83	2,842	2,854
468		2,83	2,824	2,83	2,842
469			2,83	2,824	2,83
470				2,83	2,824
471					2,83

Obr. č. 10 Posun časových řad

### 11.3.1 Koeficient spolehlivosti $R^2$

vyjadřuje hodnotu spolehlivosti, kde se koeficient determinace  $R^2$  nachází mezi 0 a 1. To znamená, že popisná míra vhodnosti použití regresní rovnice pro predikování je vhodná a spolehlivá v případě, když se hodnota blíží 1, pokud se blíží k nule, není vhodná ( Meloun a Miličák 1994).

## 11.4. R Software

R je programovací jazyk a software určený speciálně pro statistické výpočty a grafy. Nabízí širokou škálu statistických (lineární a nelineární modelování, klasické statistické testy, analýza časových řad, třídění a seskupování dat, atd.) a grafických technik. Je to prostředí, které je vhodné pro zpracování dat pro statistické účely a další jejich výzkum. Výhoda R softwaru spočívá v tom, že je snadno pochopitelný, umí dobře zpracovat matematické symboly a vzorce. Další jeho výhodou jsou kvalitně zpracované grafy (Trosset 2009).

### R Studio

je integrované prostředí pro R. Obsahuje konzole a nástroje pro vykreslování, ladění, historii a správu pracovní plochy. Dále pak podporuje přímé spuštění kódu (Trosset 2009).

## 11.5. Zpracování dat v R Studiu

Nejprve jsem do R Studia nahrála agregovanou hydrologickou časovou řadu průtoků Q, ve všech 10 časových krocích a dále jsem nahrála časovou řadu výkonů P v téže krocích. S výškou hladiny H jsem nadále nepracovala. Tu jsem brala pouze jako orientační. A je znázorněná v grafovém výstupu z Excelu (Graf 2).

### Příkaz pro nahrání časových řad (dat):

```
Q=read.table("C:/R/agr15min/15minQ.txt", quote="\"")
```

Tímto příkazem jsem nahrála do R Studia časovou řadu průtoků Q agregovaných po 15 minutách z úložiště.

Nejvíce jsem pracovala s agregovanými daty po 15 minutách, protože tyto data jsou méně zatížené zkrácením časové řady a extrémních hodnot.

### Vytvoření grafu autokorelační funkce (acf)

U těchto dat pro průtoky Q i pro výkony P jsem pomocí autokorelační funkce vytvořila graf, kde je znázorněn posun na ose x o určitý čas (t), tento posun se nazývá Lag. graf jsem vytvořila pro celou časovou řadu (graf 4a, b). Pro bližší zkoumání dat bylo nutno provést zkrácení časové řady do místa prvního většího zlomu, který byl v grafu patrný.

Již u zkrácené řady jsem vytvořila tabulku, kde je Lag i se zkrácenou časovou řadou popsán ( tab. č. 4, 5) a graficky jí znázornila.



Abych lépe popsala problematiku autokorelací vytvořila jsem ještě dva grafy pomocí autokorelační funkce po všech deseti časových krocích. První graf (7a, 8a) je znázorněn v 5 časových krocích od 15 minut až po 120 minut (2 hodiny) a druhý graf (7b, 8b) od 240 minut (4 hodiny) po 10080 minut (168 hodin).

#### **Příkaz pro vytvoření grafu autokorelační funkce (acf):**

*Plot (acf (Q))*

#### **11.5.1. Autokorelační funkce**

je základní způsob, kterým lze popsat vlastnosti hydrologických řad. Hlavní podstatou autokorelační funkce je popis lineární závislosti časových řad, jedná se zde o závislosti aktuálních hodnot na minulých. Dále pak lze vyjádřit závislost časově blízkých hodnot. Mezi naměřenou hodnotou (průtoku Q, výkonu P) v čase (t) k hodnotě v čase (t – 1) nebo (t – 2) až po libovolný posun (t- Lag). (t) – představuje libovolný časový krok, v mém případě se jedná o 15 minut (Kožíšek 2000, Liebelt 1967, Máca 2014, Meloun a Militký 2002).

Závislosti je možné popsat korelačním koeficientem. Autokorelační funkce také umožňuje spočítat sled hodnot korelačních koeficientů pro časové řady, které jsou vzájemně posunuty o časový interval Lag (Everitt 1998).

Závislost časově blízkých hodnot bylo také již zpracováno v Excelu i s lineární spojnicí trendů (graf 3a, b, c, d).

#### **Definice Korelačního koeficientu $\rho$ [Lag] (4):**

$$\rho[\text{Lag}] = \frac{\text{cov}(Q_t, Q_{\text{Lag}})}{\sqrt{\text{cov}(Q_t, Q_t)\text{cov}(Q_{\text{Lag}}, Q_{\text{Lag}})}} \quad \text{Lag} = 1, 2, 3, \dots, \quad (4)$$

Zdroj (Máca 2014)

$Q_t$  = vektor průtoků

$Q_{\text{Lag}}$  = vektor posunutých průtoků o časový posun Lag oproti  $Q_t$

$\text{Cov}()$  = příslušné kovariance, lze nahradit směrodatnou odchylkou zpracovávaných dat.

### Vytvoření histogramu:

dalším krokem ve zpracování dat bylo vytvořit histogram z naměřených hodnot. Opět jsem použila hodnoty v 15 minutovém kroku. (Graf 9a, b) Histogram jsem použila pro zjištění četnosti naměřených veličin o různé velikosti.

### Příkaz pro vykreslení histogramu:

```
hist(Q,breaks=50,freq=TRUE,col="green",xlab="Q[m3/s]",main="", xlim=range(0:70))
```

### 11.5.2. Histogram

Histogram graficky znázorňuje naměřená data v časových řadách. Pomocí sloupcového grafu vyjadřuje četnost měřené veličiny za daný časový interval. Rozpětí histogramu se v datovém souboru určuje dle minimální a maximální hodnoty. (Cyhelský 1993, Máca 2014)

### 11.5.3. Empirická kumulativní distribuční funkce (ecdf)

pro další znázornění rozdělení četností jsem použila metodu empirické kumulativní distribuční funkce, která je vykreslena graficky (Graf 10a, b) Tato funkce umožňuje stanovit předpokládaný model pro analyzované časové řady (Neubauer 2014).

### Příkaz pro vykreslení grafu:

```
plot(ecdf(Q))
```

### Popis empirické kumulativní distribuční funkce (ecdf):

jak už bylo zmíněno, pomocí této funkce je možné znázornění rozdělení četností.

Definice funkce (5):

$$F_n(x) = \frac{N(x_i \leq x)}{n}, \quad (5)$$

Zdroj ( Neubauer 2014)

$N$  = počet prvků náhodného výběru, u něhož je hodnota menší nebo rovna  $x$ .

$x$  = součet četností všech pozorování, které mají hodnotu  $x_i$

$x_i$  = tato hodnota je menší nebo rovná  $x$

$n$  = celkový rozsah souboru

Jedná se o funkci neklesající s hodnotami, které se nacházejí v rozmezí od 0 do 1.

#### 11.5.4. Rozptyl (variance)

pro zjištění míry rozptýlenosti okolo střední hodnoty jsem použila funkci rozptylu. Rozptyl se vykresluje do grafu pomocí funkce (var):

```
plot(t, Qvar, col="red", type="p", xlab="cas [h]", ylab="var", main="rozptyl")
```

```
t <-c(0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 4, 6, 12, 24)
```

Bylo nutno načíst všechny časové kroky agregovaných dat pro průtok a výkon. Pro každý zvlášť vykreslit graf rozptylu (graf 11a, b). Všechny časové kroky jsem vykreslila do grafu, kromě týdenního kroku. Tento časový krok již byl od všech natolik vzdálen, že celý graf znehodnocoval.

#### Definice rozptylu:

Rozptyl nám ukazuje rozptýlení jednotlivých hodnot okolo střední hodnoty. A je definován, jako průměrná kvadratická odchylka od střední hodnoty. (Cyhelský 1993, Máca 2014)

Rozptyl se využívá především v inferenční statistice pro výpočet různých statistických hodnot. Rozptyl se vypočítává ze vzorce (6):

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (6)$$

Zdroj (Máca 2014)

Kde:

$s^2$ = rozptyl

$x_i$ = jednotlivé hodnoty

$\bar{x}$ = aritmetický průměr

$(n - 1)$ = počet stupňů volnosti rozptylu

### 11.5.5. Směrodatná odchylka

S rozptylem úzce souvisí směrodatná odchylka (ukazatel variability), která se určuje jako druhá odmocnina z rozptylu (7).

$$s = \sqrt{s^2} \quad (7)$$

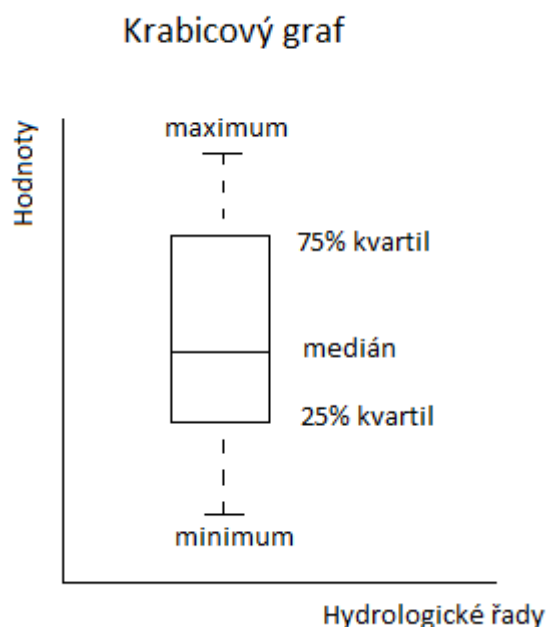
Zdroj (Pavelka 1983)

Směrodatná odchylka odhaluje, jak moc se hodnoty liší od střední hodnoty. Často se využívá jako ukazatel rizika. Protože může působit kladně i záporně. Její použití je praktické zejména ve světě financí. (Máca 2014, Pavelka 1983)

### 11.5.6. Krabicový graf (boxplot)

Metodu krabicového grafu, jsem si vybrala pro znázornění informace o poloze a variabilitě datového souboru (Dudek 2004). Tento graf znázorňuje data pomocí jejich kvartilů, mediánu, minimálních a maximálních hodnot. Krabicový graf je vhodný pro zobrazení a porovnání více časových řad do jednoho grafu.

Obrázek č. 11 popisuje krabicový diagram (graf)



Obr. č. 11 Krabicový graf

Krabicový graf jsem vytvořila opět pro všech deset časových kroků (graf 12a, b). Tyto grafy jsou bez extrémních hodnot (max.). S extrémními hodnotami jsou grafy vykresleny zvlášť (graf 13a, b).

Abych byla schopna zjistit medián, kvartily, maximum a minimum časových řad. Použila jsem v R Studiu příkaz:

```
summary(Q)
```

tento příkaz mně všechny hodnoty vypsal a já je zpracovala do tabulky (8).

### **Jedná se o základní charakteristiku časových řad:**

*min* = nejmenší hodnota nacházející se ve zkoumané časové řadě

*max* = největší hodnota

*1 st Qu* = hodnota 25% kvartilu (platí, že 25% hodnot v časové řadě je menších nebo rovno výslednému číslu *1 st Qu*).

*3 st Qu* = hodnota 75% kvartilu (platí, že 75% hodnot v časové řadě je menších nebo rovno výslednému číslu *3 st Qu*) (Kožíšek a Stibingerová 2014).

*Medián* = hodnota, která rozděluje řadu seřazenou podle velikosti na dvě stejně velké poloviny. Pokud je počet hodnot lichý, tak se vezme prostřední hodnota a pokud sudý, tak se dvě prostřední hodnoty zprůměrují (Loučková 1992).

*Mean* = aritmetický průměr všech dat ve zkoumané časové řadě. Průměr vypočteme tak, že se sečtou všechny hodnoty ve výběru a vydělí se rozsahem výběru (*n*). (Kožíšek a Stibingerová 2014)

### **Výpočet průměru:**

Sečtení všech hodnot (8):

$$\sum_{i=1}^n x_i = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n. \quad (8)$$

Zdroj: (Neubauer 2014)

Výpočet průměru (9):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (9)$$

Zdroj: (Neubauer 2014)

$n$  = počet všech hodnot (rozsah výběru)

**krabicový graf byl vykreslen pomocí příkazů:**

```
cas <-c(15, 30, 45,60, 120, 240, 360, 720, 1140, 1080)
```

```
boxplot(names=cas,Q,outline=FALSE, main="", ylab="prutok [m3/s]",xlab="cas [min]")
```

outline=FALSE znamená, že graf je vykreslený bez podezřelých hodnot, v mém případě jde o maximální hodnoty.

Výhoda tohoto grafu je, že umožňuje získat rychlou informaci o datech a jejich rozptýlenosti.

### 11.5.7. Shlukový graf

V neposlední řadě jsem vykreslila pomocí R Studia shlukový graf, jenž znázorňuje závislost agregovaných hodnot výkonu (P) na průtoku (Q). (graf 14a, b)

V grafu jsou na ose x vykreslené průtoky Q [m<sup>3</sup>/s] a na ose y výkony P [kWh]. Graf je proložen regresní přímkou.

**Příkazy pro vytvoření shlukového grafu a regresní přímky:**

Načtení dat:

```
QQ15=read.table("C:/R/agr15min/15minQ.txt", quote="\"")
```

```
PP15=read.table("C:/R/agr15min/15minkW.txt", quote="\"")
```

Vytvoření grafu:

```
plot(Q15,P15,main="shlukový graf", xlab=" Q [m3/s] ", ylab=" P [kWh]. ")
```

proložení regresní přímkou:

```
abline(lm(P15~Q15), col="red")
```

### 11.5.8. Lineární regrese

je matematická metoda používaná pro vyjádření vztahu (závislostí) dvou kvantitativních proměnných  $x$  a  $y$ , jež jsou definovány pomocí regresní přímky. U hodnot zobrazených bodově v grafu se předpokládá, že jejich  $x$ -ové souřadnice jsou přesné, kdežto  $y$ -ové souřadnice někdy bývají zatížené náhodnou chybou. Přičemž regresní přímka vyznačuje průběh závislosti  $y$  na  $x$ . Tedy, že  $y$  je závislá proměnná a  $x$  je nezávislá (Kožíšek a Stiebergová 2014).

Podstatou lineární regrese je nalezení vhodné regresní přímky, u které bude součet druhých mocnin odchylek co nejmenší (Řezanková 2013, Trosset 2009).

#### Vztah pro regresní přímku:

$$Y = a + b X$$

Kde:

$a$  = konstanta určující vzdálenost průsečíků regresní přímky k ose  $y$

$b$  = konstanta určující sklon úhlu regresní přímky s osou  $x$

#### Parametry lineární regrese jsem zjistila pomocí příkazu:

```
summary(lm(P15~Q15))
```

tento příkaz jsem použila pro všech deset časových kroků a výsledky lineární regrese jsem vložila do tabulky č. 10.

### 11.5.9. Chyby

Do této doby byly zpracovány, jen nenulové hodnoty výkonu  $P$ . Nulové hodnoty jsem z časové řady vyloučila a vytvořila úplně novou časovou řadu, kde výkony byly nulové a přiřazeny k nim průtoky  $Q$ , které k nim časově náležely. Nulové výkony se vyskytovaly zejména při nízkém a vysokém průtoku.

Tyto časové řady jsem zpracovala pomocí histogramů. Pro zobrazení histogramu bylo nutno si nejprve nahrát data časové řady průtoku  $Q1$ , kdy elektrárna normálně fungovala a časovou řadu průtoku  $Q2$ , kdy byla elektrárna vypnutá. Časovou řadu výkonu jsem nenahrávala, protože obsahuje pouze hodnoty 0 a pro zpracování není k ničemu.

#### Nahrání dat:

```
Q2=read.table("C:/R/nulaQ.txt", quote="\")$V1
```

```
Q1=read.table("C:/R/zakl/Q.txt", quote="\")$V1
```

Pro zlepšení názornosti jsem vytvořila dva histogramy, první histogram znázorňuje průtoky od 0 do 10 m<sup>3</sup>/s a druhý od 10 m<sup>3</sup>/s a výš.

#### **Vytvoření histogramu Q do 10 m<sup>3</sup>/s (graf 15a)**

```
#-histogram prutoku, kdy P=0
```

```
Q1 <- hist(Q0,breaks=2*ceiling(max(Q0)),freq=TRUE,col="green",xlab="Q  
[m3/s]",main="S Q=<0,1>")
```

```
#-histogram prutoku, kdy P>0
```

```
Q2 <- hist(Q,breaks=2*ceiling(max(Q)),freq=TRUE,col="green",xlab="Q  
[m3/s]",main="S Q=<0,1>")
```

```
plot( Q2, col=rgb(0,0,1,1/4), xlim=c(0,do), xlab="Q [m3/s]")
```

```
plot( Q1, col=rgb(1,0,0,1/4), xlim=c(0,do), add=T)
```

#### **Vytvoření histogramu Q nad 10 m<sup>3</sup>/s (graf 15b)**

```
Q1b <- hist(Q0[Q0>10],breaks=2*ceiling(max(Q0)-od),freq=TRUE)
```

```
Q2b <- hist(Q[Q>10],breaks=2*ceiling(max(Q)-od),freq=TRUE)
```

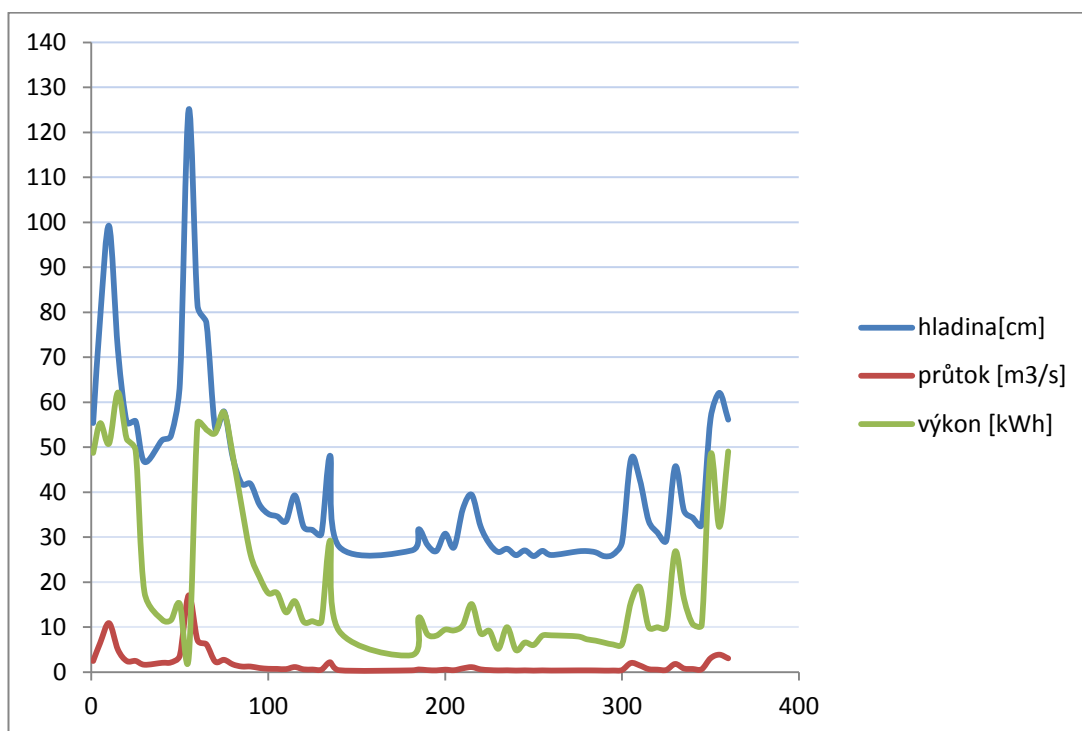
```
plot( Q2b, col=rgb(0,0,1,1/4), xlim=c(od,40), xlab="Q [m3/s]")
```

```
plot( Q1b, col=rgb(1,0,0,1/4) , add=T)
```



## 12. Výsledky

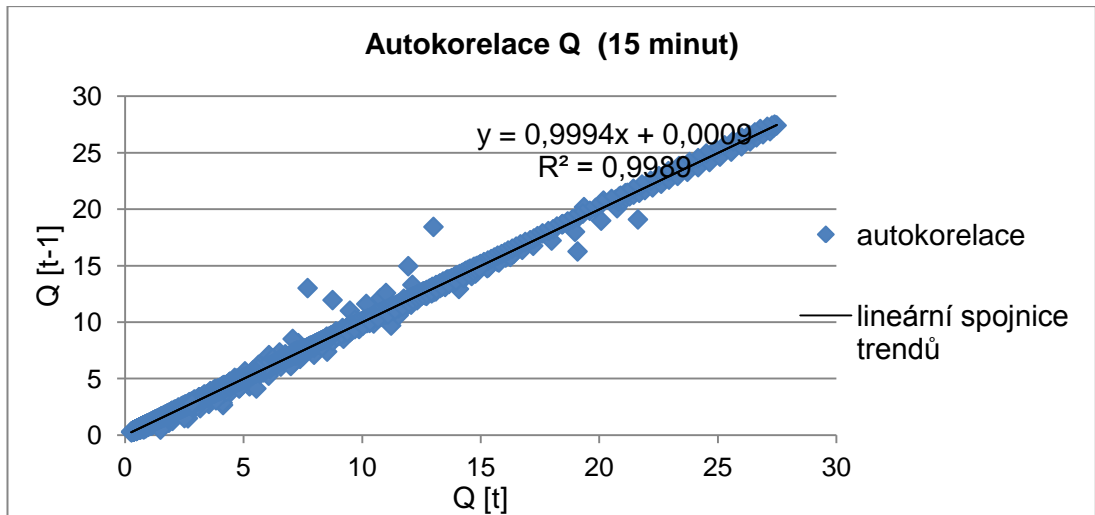
Graf 2 znázorňuje vývoj časových řad výkonu, průtoků a výšky hladiny za celý rok 2012. Je zde dobře znázorněná závislost mezi nimi. Avšak u výkonu je křivka hladší, protože vodní elektrárna není schopna reagovat na všechny výkyvy průtoku vody.



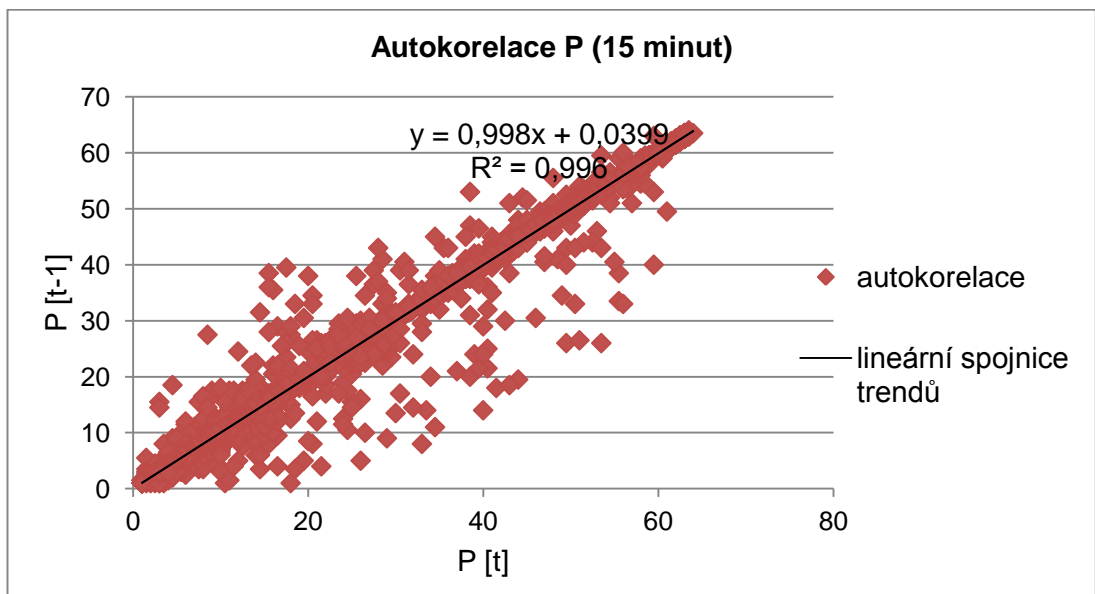
Graf č. 2 Hydrogram

Grafy (3a, 3b, 3c, 3d) autokorelace vystihují posun Lag [t-1], [t-4] pro průtok Q a výkon P. Je na nich zobrazená lineární spojnice trendů, rovnice regrese a hodnota spolehlivosti  $R^2$ .

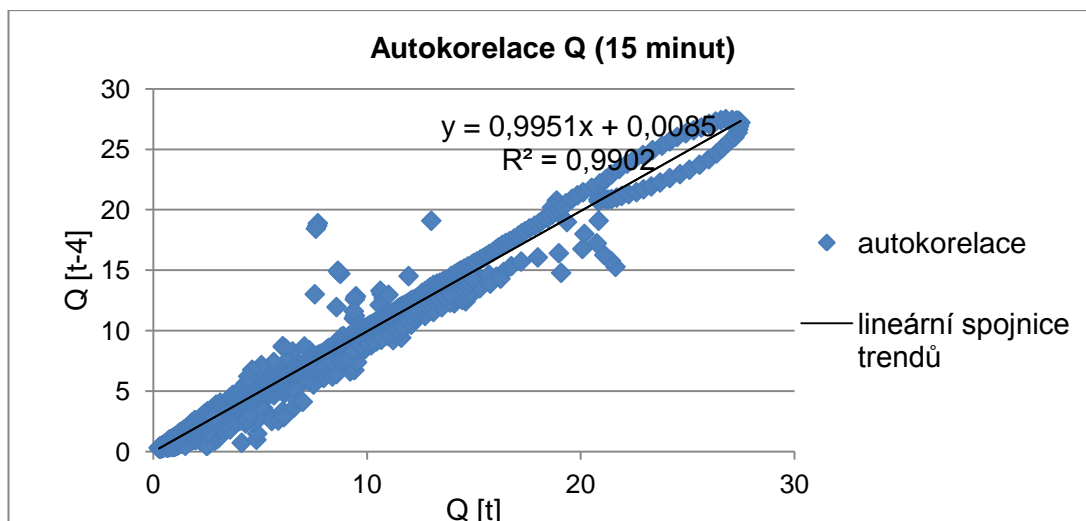
U těch to čtyř grafů je vidět, závislost časově blízkých hodnot na hodnotách minulých a také, jak se mění hodnota spolehlivosti s časovým posunem. Hodnota se postupně pomalu zmenšuje, přesto se stále blíží k hodnotě 1 a tím jsem zjistila, že data jsou spolehlivá a vhodná pro další zpracování například predikce.



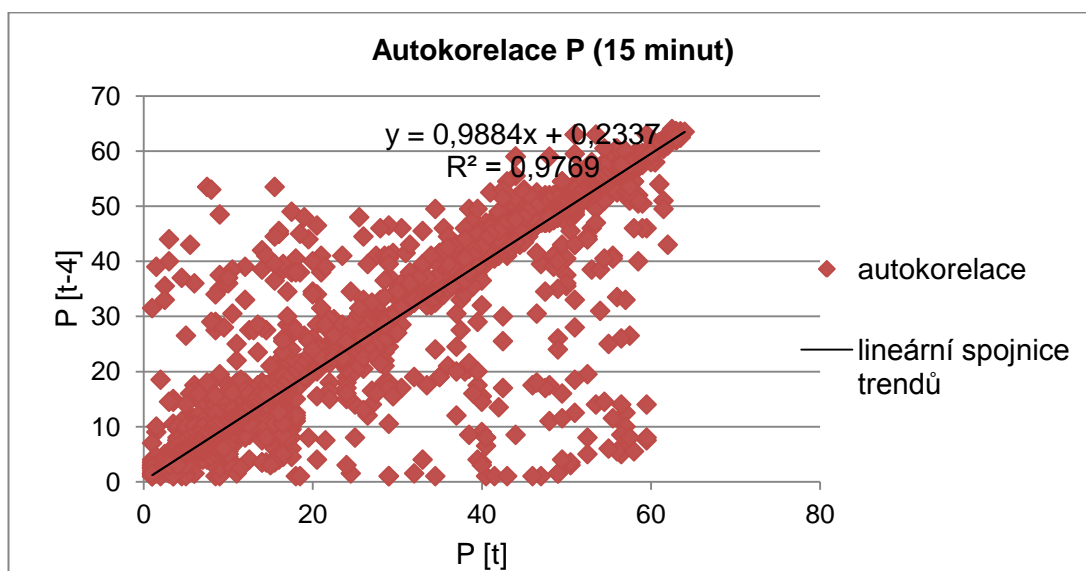
Graf 3a Autokorelace – Lag Q [t-1]



Graf 3b Autokorelace– Lag P [t-1]



Graf 3c Autokorelace – Lag Q [t-4]

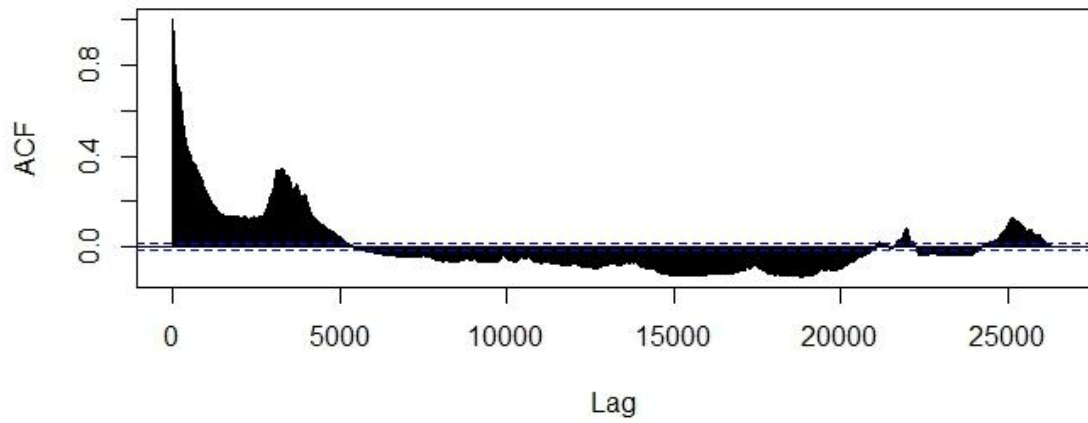


Graf 3d Autokorelace – Lag P [t-4]

Grafy (4a, b) autokorelační funkce pro celé časové řady průtoků a výkonů, které byly agregované po 15 minutách a posunuté o Lag.

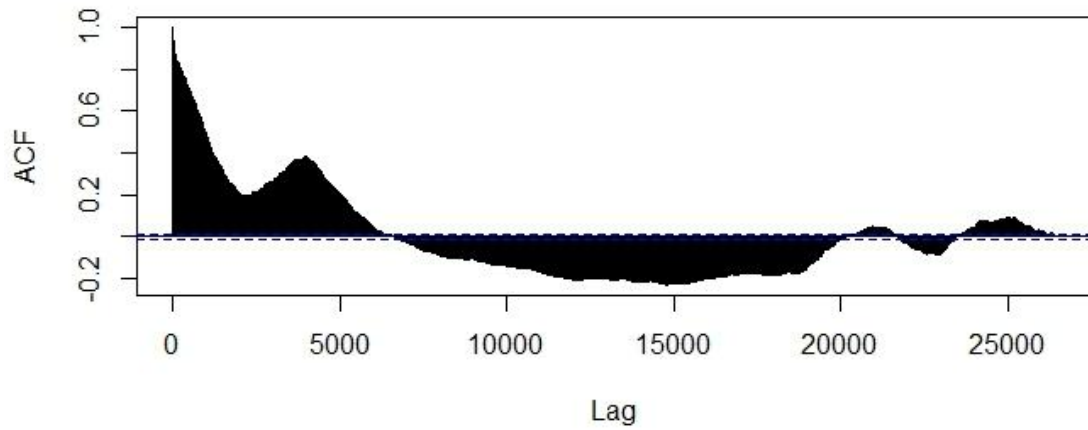
Tyto dva grafy jsou znázorněné pomocí autokorelační funkcí za celou časovou řadu. Na ose x je znázorněn posun Lag. Dá se říct, že čím větší je posun, tím méně se hodnota blíží 1. Hodnota naznačuje velikost podobnosti dat při posunu.

### Autokorelace Q15



Graf 4a – Průtok Q

### Autokorelace P15



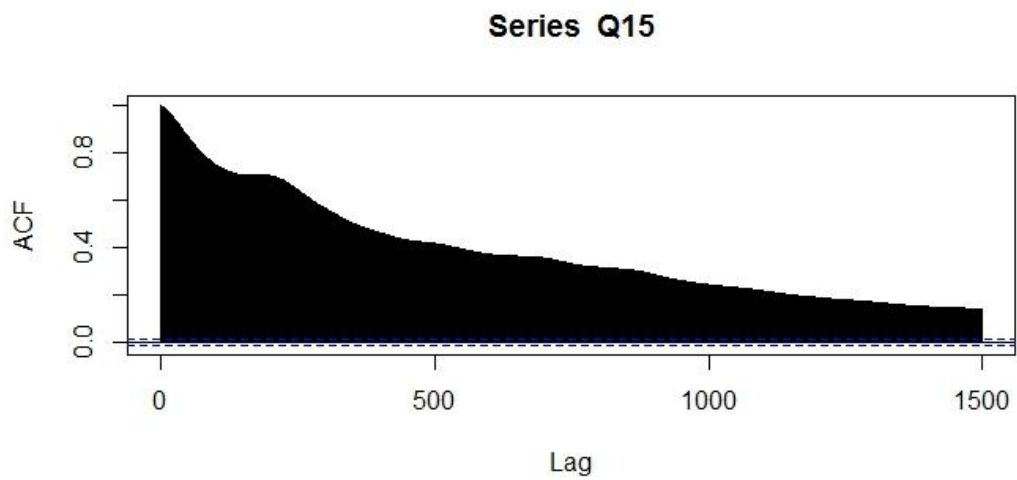
Graf 4b – Výkon P

Pro lepší znázornění autokorelační funkce, jsem vytvořila tabulku č. 4 s grafem 5, kde je časový posun zkrácen do prvního většího zlomu. Protože hodnoty Q 15 je možno popsat autokorelačním modelem.

Lag	podobnost
1	0,99944
100	0,75136
200	0,71307
300	0,58080
400	0,48336
500	0,44447
600	0,39834
700	0,38893
800	0,35139
900	0,32786
1000	0,28870
1100	0,27080
1200	0,23736
1300	0,21373
1400	0,18885
1500	0,17457

Tabulka č. 4 Autokorelace pro průtoky Q

Graf 5 pro tabulku č. 4 byl vytvořený pomocí autokorelační funkce. Pro popis grafu je dostačující Lag 1500, tedy do prvního většího zlomu, který byl vidět na grafu 4a.



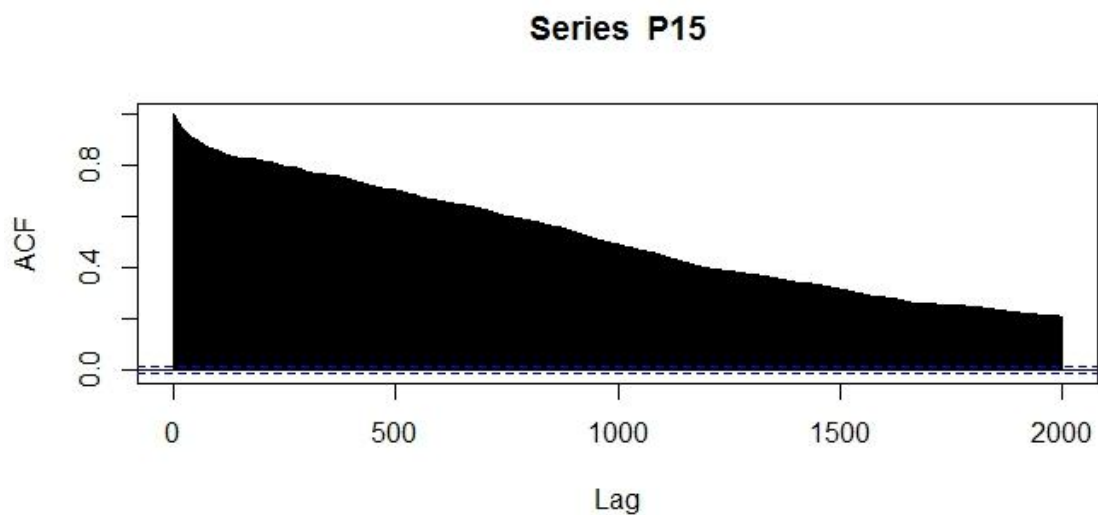
Graf 5 – Zkrácený časový krok pro Q

Tabulka č. 5 Autokorelace pro výkony P 15, které se dají popsat autokorelačním modelem.

Lag	podobnost
1	0,99801
100	0,86687
200	0,83219
300	0,79631
400	0,77402
500	0,73962
600	0,70318
700	0,67384
800	0,63542
900	0,59270
1000	0,54424
1100	0,49882
1200	0,45156
1300	0,42773
1400	0,39791
1500	0,37080
1600	0,33500
1700	0,30777
1800	0,29749
1900	0,27152
2000	0,25492

Tabulka č. 5 Autokorelace výkony

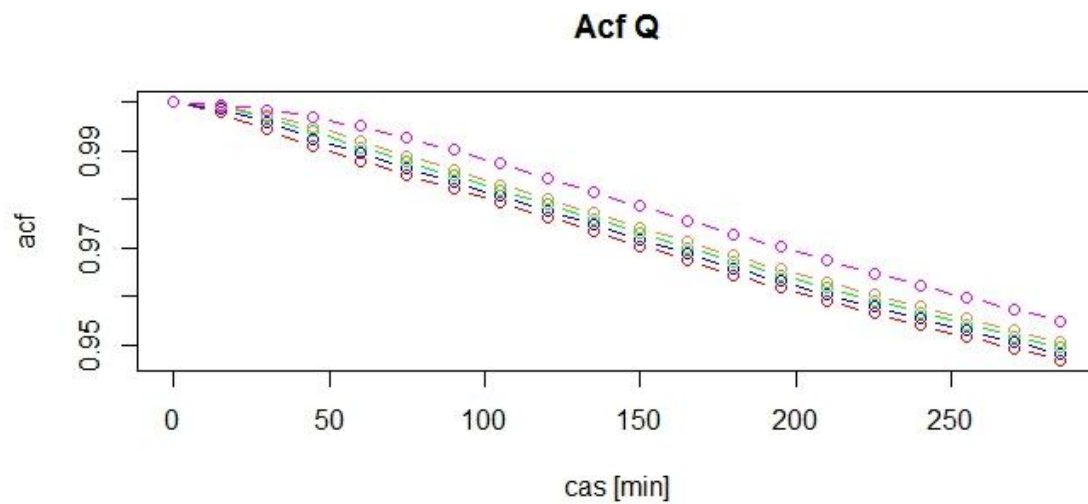
Graf č. 6 pro tabulku č. 5 byl vytvořený autokorelační funkcí. Pro popis grafu je dostačující Lag 2000, tedy do prvního většího zlomu, který byl vidět na grafu 4b. V tabulkách i grafech je patrné, jak podobnost dat klesá.



Graf 6 – zkrácený časový krok pro P

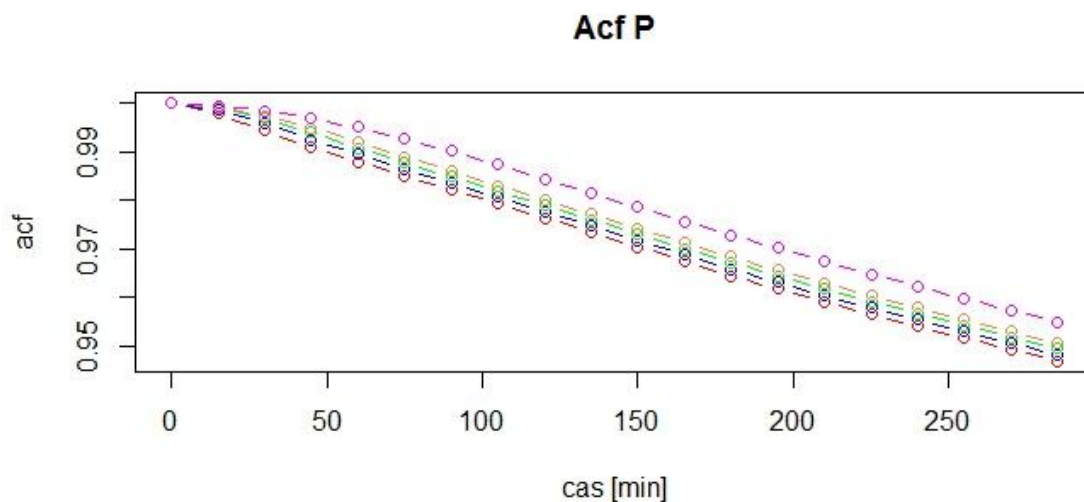
U grafů 7a, 7b byla použita autokorelační funkce pro průtoky Q a výkony P pro agregovaná data v 5 časech

Na těchto grafech je vidět, že čím jsou data agregována po větším časovém kroku, tím je hodnota autokorelace větší. Tzn., že tím více se autokorelace blíží k 1.



Graf 7a – autokorelace pro Q v 5 časových krocích





Graf 7b – autokorelace pro P v 5 časových krocích

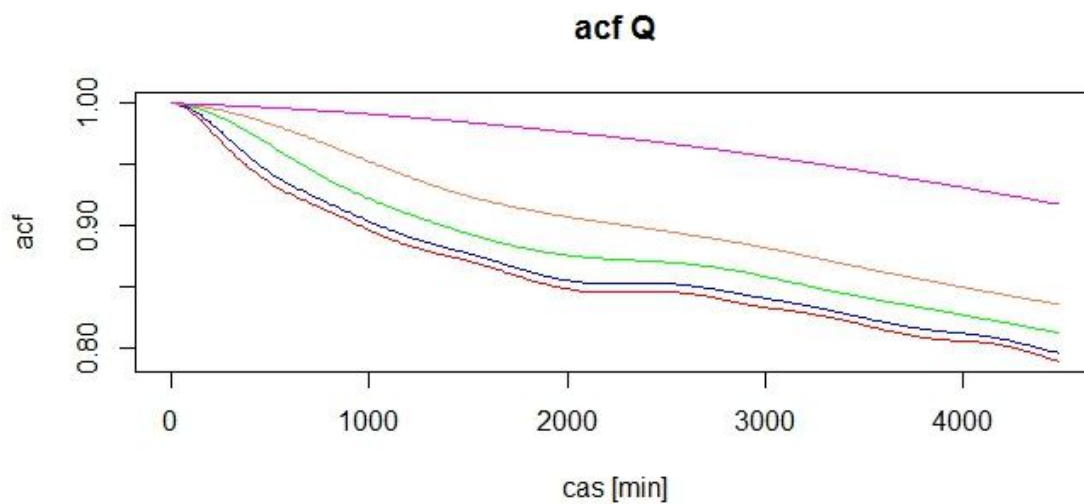
Legenda

Čas (minuty)	barva
15	červená
30	modrá
45	zelená
60	žlutá
120	fialová

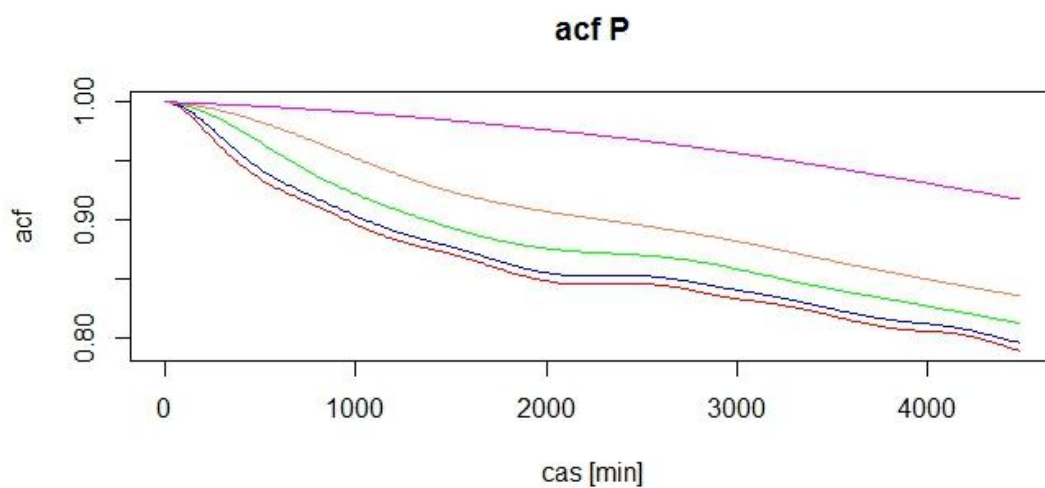
Tabulka č. 6 Legenda

Graf 8a, 8b autokorelační funkce vytvořená pro agregované řady od 2 hodin až po 1 týden.

U těchto grafů je ještě patrnější, jak moc velký vliv má agregace různě velkých časových kroků na hodnotu autokorelační funkce. Je zde patrné, že agregovaná data po 168 hodinách se ze všech nejvíce přibližují k 1.



Graf 8a – autokorelace pro Q v 5 časových krocích



Graf 8b – autokorelace pro P v 5 časových krocích

Legenda

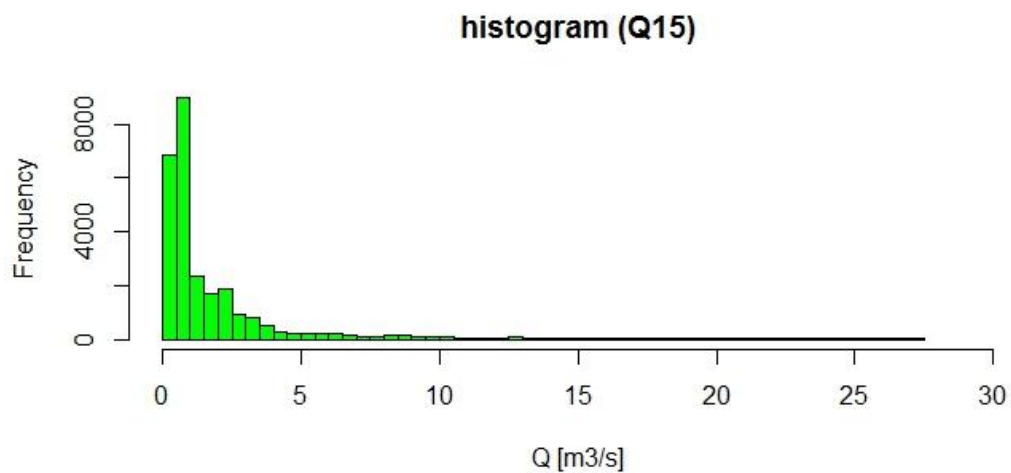
Čas (minuty)	barva
240 (2h)	červená
360 (6h)	modrá
720 (12h)	zelená
1440 (24h)	žlutá
10080 (168 h)	fialová

Tabulka č. 7 Legenda

## Histogramy:.

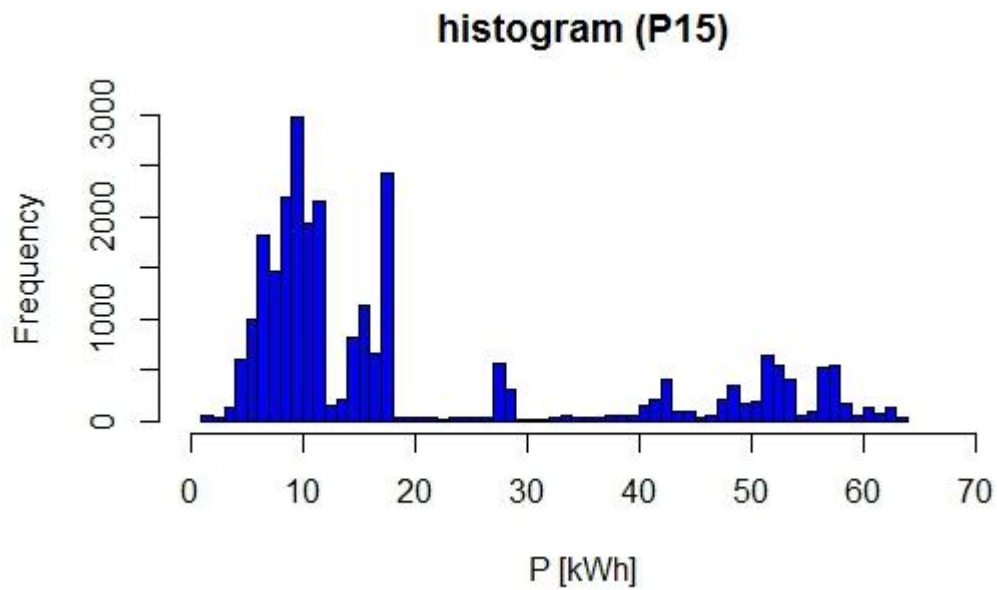
Histogramy (9a, 9b) vytvořené z agregovaných dat po 15 minutách pro průtoky a výkony.

U histogramu (graf 9a) pro průtok, lze snadno vyčíst míru četností určitých dat za celou časovou řadu, tedy rok. Je zde patrné, že nejvíce se objevoval průtok mezi 0,5 – 1 m<sup>3</sup>/s na druhém místě, co se týče četnosti, byl průtok od 0,262 – 0,5 m<sup>3</sup>/s. od 10 m<sup>3</sup>/s až po maximum tedy 27, 48 m<sup>3</sup>/s se průtoky objevovaly zřídka.



Graf 9a – histogram průtok Q

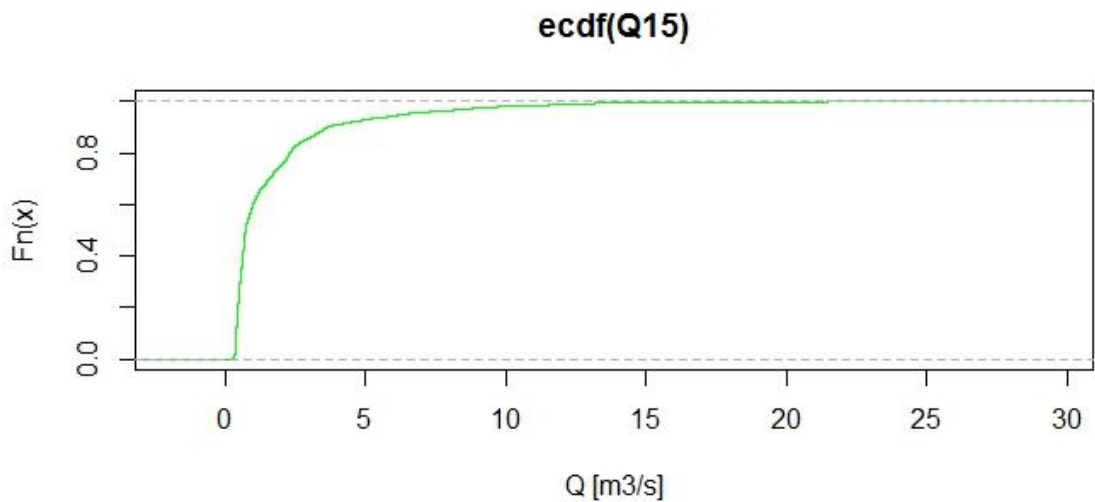
Histogram (graf 9b) pro výkony vykazuje, jak často a kolik kWh vyráběla elektrárna. Maximální výkon byl 64 kWh. Ale jak je vidět z grafu, tento výkon nebyl příliš častý. Nejčastější výkon MVE byl okolo 10 kWh.



Graf 9b – histogram výkon P

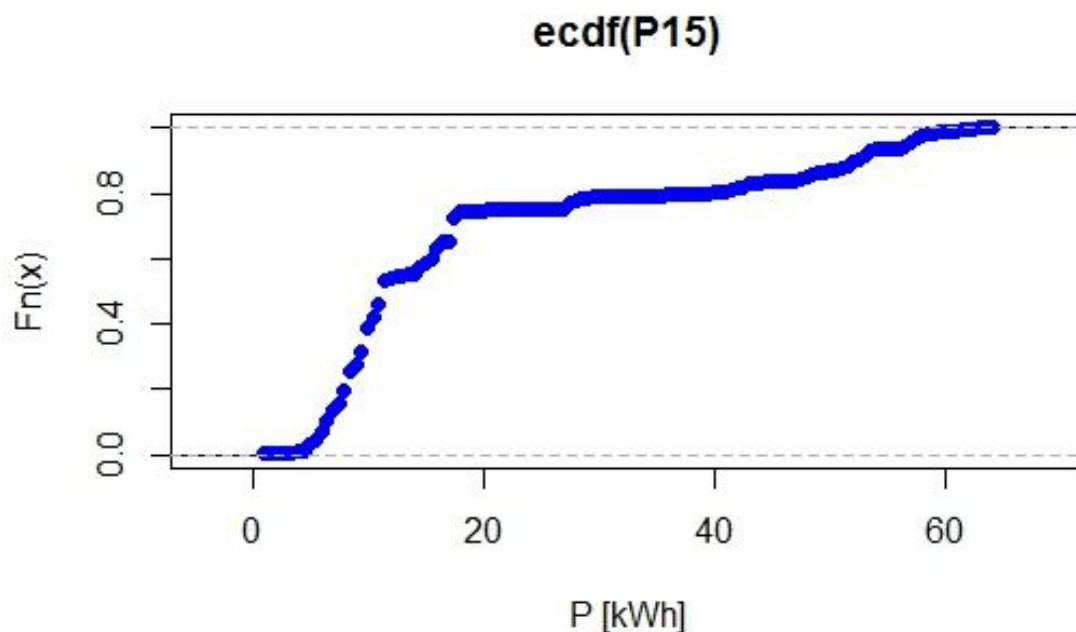
### Graf 10a, 10 b Empirická kumulativní distribuční funkce (ecdf)

Graf 10a Empirické kumulativní distribuční funkce nám zobrazuje velikost pravděpodobnosti, jak průtok bude velký. Zde je znázorněno, že je 80% šance, že průtok bude od 0,262 do 2 m<sup>3</sup>/s. Naopak je téměř 100% pravděpodobnost, že průtok bude menší než 23 m<sup>3</sup>/s.



Graf 10a ecdf- průtok Q

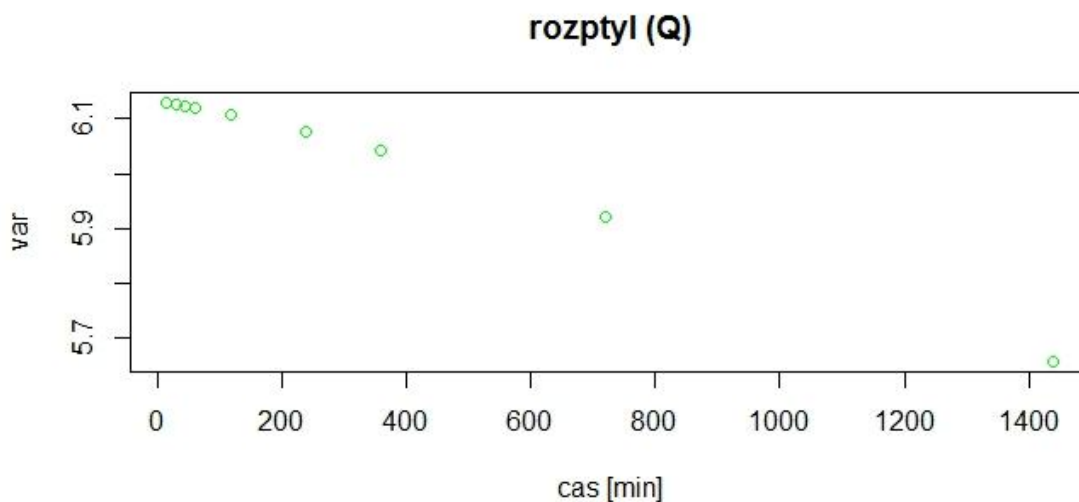
Na grafu 10b ecdf pro výkon P. je možno přečíst, že je 80% šance, že výroba bude menší než 20 kWh a téměř 100 % šance, že bude vyrábět méně než 64 kWh.



Graf 10b ecdf- výkon P

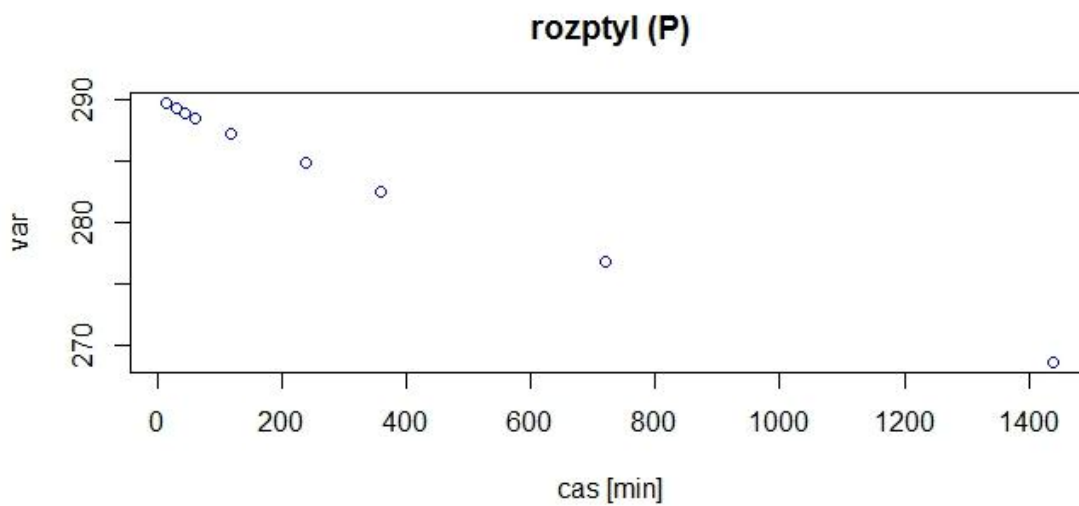
### Rozptyl

Graf 11a funkce rozptylu u průtoku nám dobře zobrazuje vliv agregace dat na rozptyl. Zde je vidět, že čím víc data agreguji, tím víc se rozptyl snižuje. Vlastně to znamená, že data se s větším časovým krokem agregace se víc vyhlazují. A je zde patrné, že agregovaná data po 15 minutách mají větší rozptyl, než- li data agregovaná 24 hodinách (1440 minut).



Graf 11a rozptyl Q

Graf 11b opět zobrazuje vliv agregace na rozptyl u výkonu P. I zde platí, že agregovaná data po 15 minutách mají daleko větší rozptyl, než data agregovaná po 24 hodinách (1440 minut).



Graf 11b rozptyl P

## Summary

Tabulka č. 8. znázorňuje pro agregovanou 15 minutovou časovou řadu. Jak velké jsou hodnoty průtoků a výkonů. Pro vysvětlení, 1 st Qu je 25 % kvartil a to znamená, že 25% hodnot v časové řadě je menších nebo rovno 0,493 (pro průtok) a u výkonu je to hodnota 8,5. Dále pak 3. rd Qu znamená, že 75% hodnot je menších nebo rovno.

Summary	Průtok Q [m <sup>3</sup> /s]	Výkon kWh
Min	0,262	1
1 st Qu	0,493	8,5
Medián	0,729	11,5
Mean	1,723	20,13
3 rd Qu	1,974	23,50
Max	27.480	64

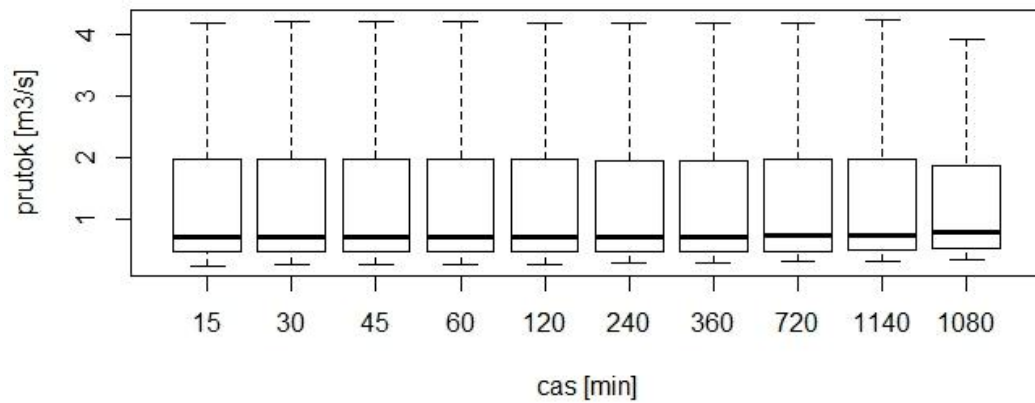
Tabulka č. 8

## Krabicový graf (boxplot)

Krabicový graf box plot, zde jsou zobrazené hodnoty pro všech deset agregovaných řad (Graf 12a, 12b). Jak je patrné z grafu, chybí nám zde maximální hodnoty, ty jsou zobrazeny v grafu 13a, 13b, protože jsou vedeny jako podezřelé hodnoty.

Na grafu 12a vidíme zobrazen minimální průtok, ten zobrazuje čárka dole. Spodní hrana krabičky zobrazuje 1. kvartil, tučná čára uprostřed krabičky vyznačuje medián a vrchní hrana krabičky vyznačuje 3. kvartil. Na grafu je patrné, že hodnoty mediánů a jiných již zmíněných se agregací, příliš nemění, protože zde nemáme zobrazené extrémní hodnoty.

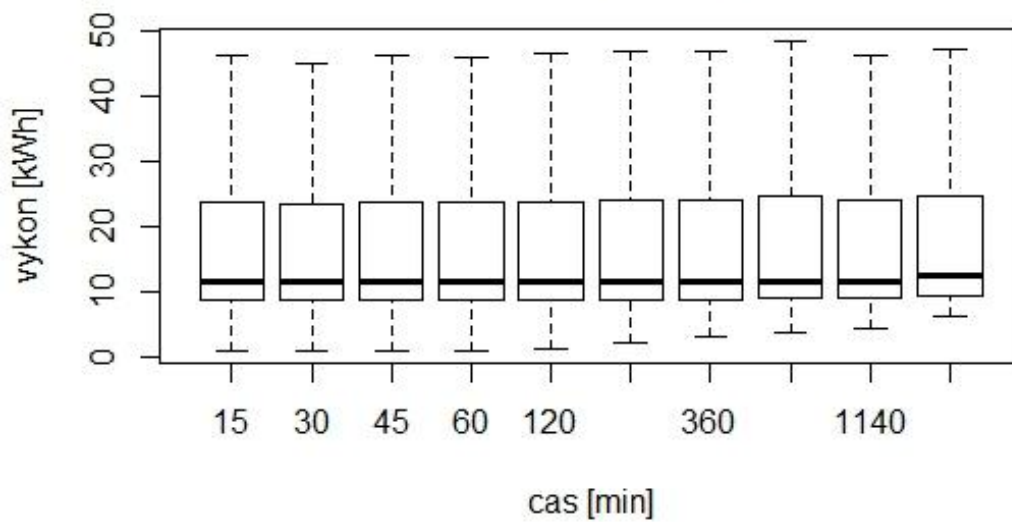
**krabicovy graf (Q)**



Graf 12a Boxplot – průtoky Q

Tento krabicový graf 12b vypovídá více méně to samé, jako u průtoků graf 12a. Opět je znát, že agregované hodnoty se skoro vůbec nemění.

**krabicovy graf (P)**

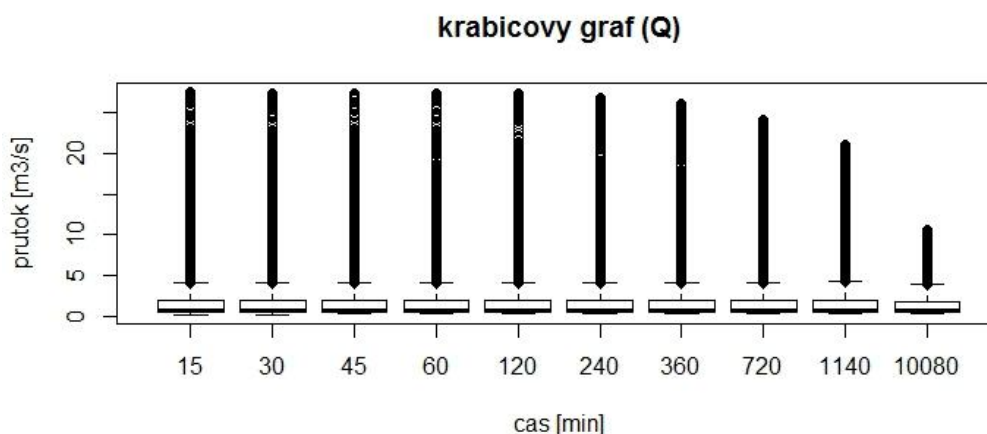


Graf 12b Boxplot – výkon P



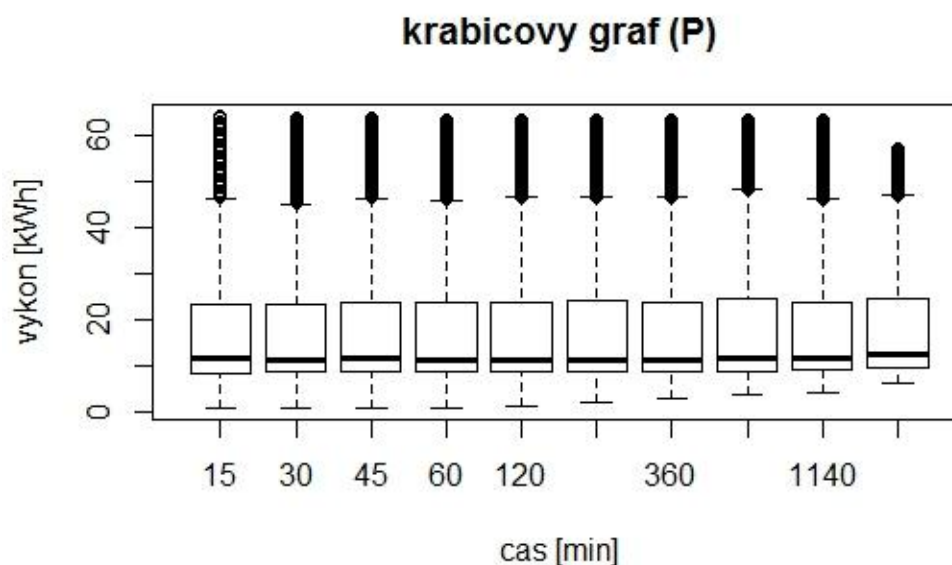
### Graf krabicový graf s „podezřelými hodnotami“

Krabicový graf 13a pro průtoky s extrémními (podezřelými) hodnotami (vykreslené tučně). Zde už je krásně patrný vliv agregace. Maximální hodnoty se postupem zkracují a tím se data „vyhlazují“. Na počátku je vidět, že pro agregovanou 15 minutovou řadu je maximální průtok něco přes 27 m<sup>3</sup>/s. A na konci u 1 týdenní (10080 minut) už je maximální průtok jen 10 m<sup>3</sup>/s.



Graf 13 a krabicový s podezřelými hodnotami pro průtok Q

Na grafu 13b lze opět spatřit pomocí tučných svislých čar extrémní (podezřelé) hodnoty. Je zde znovu patrné, že největší vliv agregace nastává až při 1 týdenní agregaci

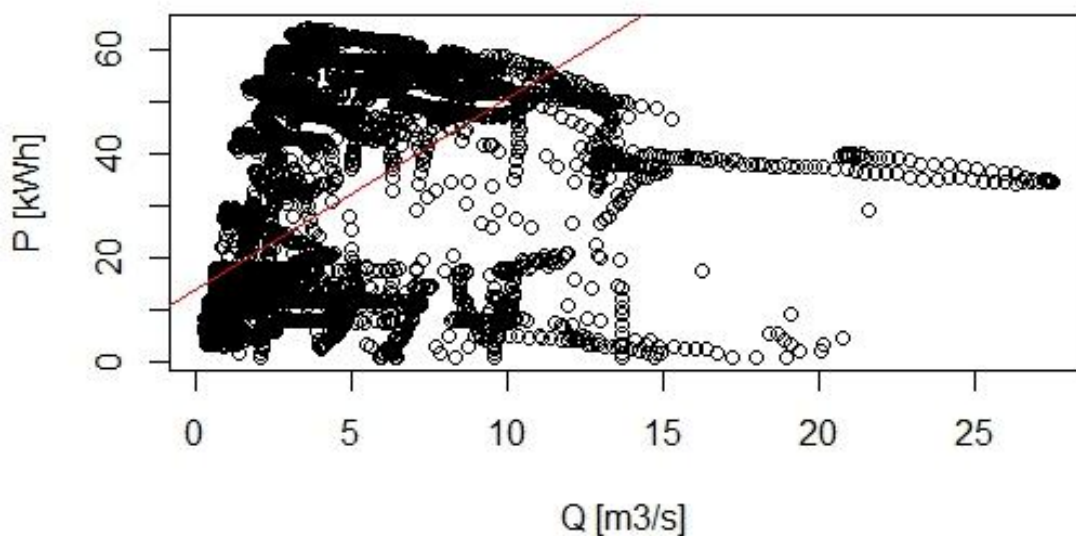


Graf 13b krabicový s podezřelými hodnotami pro výkon P

## Shlukový graf

Graf 14a je proložený regresní přímkou, která vyjadřuje vztah mezi výkonem na průtoku. Nejtmavšími místy na grafu jsou znázorněné nejčastější výkony při určitém průtoku. Je tedy z grafu znatelné, že největší účinnost malé vodní elektrárny je při průtoku  $Q$  3,2  $m^3/s$ , kde vodní elektrárna dosahuje maxima a to 64 kWh. Dále je patrné, že při průtoku 0,15 – 0,7  $m^3/s$  běžela především první turbína, která má výkon do 20 kWh. Od 0,7 – a výš  $m^3/s$  se přidala i druhá turbína a bylo možno dosáhnout maxima. Dobrý byl ještě průtok  $Q$  3,2 – 10  $m^3/s$ , při této hodnotě se výroba elektrické energie pomalu snižuje, až se pohybuje okolo 50 kWh. Se vzrůstajícím průtokem se výkon snižuje. Z grafu je také patrné, že velice často od průtoku 0,15 – 0,5  $m^3/s$  běžela sama turbína, která má výkon jen do 20 kWh.

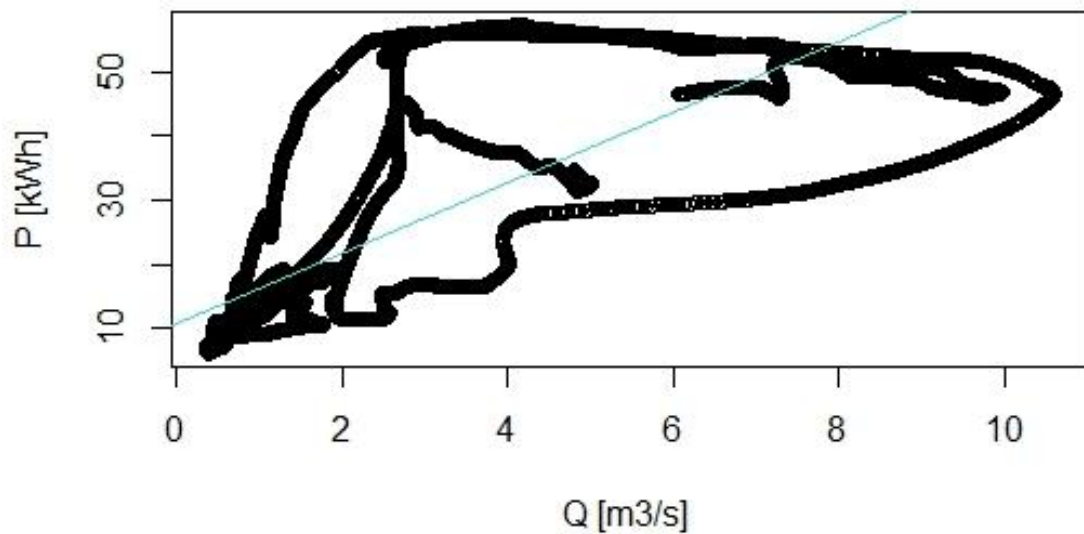
shlukovy graf [15 minut]



Graf 14a shlukový graf pro agregaci 15 minut

Graf 14 b je zde vložen jen pro zajímavost, lze na něm dobře vidět, jak moc vyhlazuje data agregace po velkém kroku. Je dost rozdílný oproti předchozímu grafu agregace po 15 minutách, tento graf zobrazuje výstup pro agregaci časové řady 1 týdne. Pro vyjádření účinnosti MVE, je pro nás stěžejní předchozí graf (14 a).

### shlukový graf [10080 minut]



Graf 14 b shlukový graf pro agregaci 10080 minut (1 týden)

### Lineární regrese

Tabulka č. 9. Výsledky lineární regrese pro 15 minutovou agregaci

```
call:
lm(formula = P15 ~ Q15)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-85.791  -7.410  -5.114   1.099  37.869

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  13.77755    0.10763   128.0  <2e-16 ***
Q15          3.68503    0.03568   103.3  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 14.37 on 26461 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.2872, Adjusted R-squared:  0.2872
F-statistic: 1.066e+04 on 1 and 26461 DF, p-value: < 2.2e-16
```

Tabulka č. 9 Lineární regrese

Rovnice lineární regrese:  $Pa = bQ15 + a$

,Kde hodnoty:  $b = Q15$ ,  $a = \text{intercept}$

tabulka č. 10. Výsledky lineární regrese pro všech 10 agregovaných časových kroků

minuty	b	a	p - value	R <sup>2</sup>
15	3,6850	13,7775	$<2,2 * 10^{-16}$	0,2872
30	3,6868	13,7730	$<2,2 * 10^{-16}$	0,2878
45	3,6894	13,7676	$<2,2 * 10^{-16}$	0,2885
60	3,6924	13,7618	$<2,2 * 10^{-16}$	0,2892
120	3,7071	13,7337	$<2,2 * 10^{-16}$	0,2922
240	3,7390	13,6712	$<2,2 * 10^{-16}$	0,2982
360	3,7747	13,6020	$<2,2 * 10^{-16}$	0,3046
720	3,8967	13,3695	$<2,2 * 10^{-16}$	0,3247
1440	4,1621	12,8662	$<2,2 * 10^{-16}$	0,3647
10080	5,4896	10,6280	$<2,2 * 10^{-16}$	0,5242

Tabulka č. 10 Výsledky lineární regrese

V tabulce 9:  $a$  = vyjadřuje průsečík (místo kde přímka začíná na ose y)

$b$  = konstanta určující sklon úhlu přímky s osou x

$R^2$  = koeficient determinace nabývá hodnotu od 0 do 1

$p\text{-value}$  = hladina významnosti

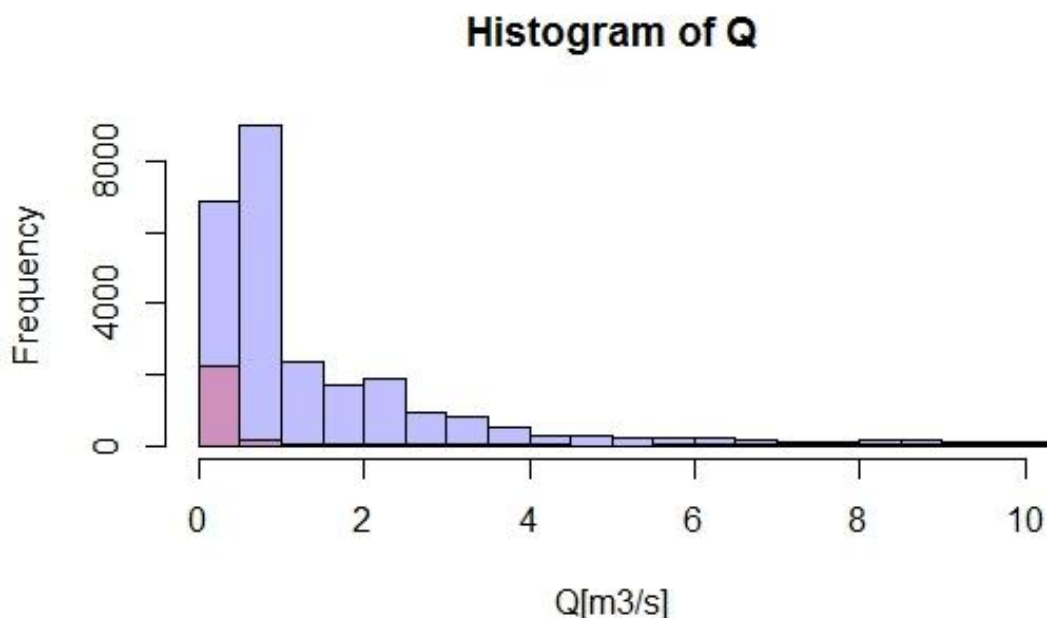
$a$ ,  $b$  vyjadřuje, jak bude regresní přímka vypadat,  $p\text{-value}$  zhodnocuje, kdy nulovou hodnotu zamítnout a kdy ne. Když  $p\text{-value} \leq \alpha$  nulová hypotéza  $H_0$  se zamítne a to i v tomto případě. (Everitt 1998)

$H_0$  (nulová hypotéza) vyjadřuje, že mezi testovanými soubory není žádný rozdíl a nevyjadřuje žádnou závislost, proto se nulová hypotéza zamítla a když se zamítne nulová hypotéza, přijde na řadu alternativní hypotéza ( $H_1$ ), která nám říká, že mezi proměnnými existuje závislost. A to je případ i mých dat, nejenže existuje závislost, ale i podle tří hvězdiček ve výsledku jsem zjistila, že jde o dost velkou závislost (Everitt 1998).

Koeficient determinace je vždy nezáporný a vyskytuje se v hodnotách od 0 do 1. Pokud je roven jedné, znamená to, že přesně vystihuje všechny body a všemi prochází. Z tabulky 5 lze vyčíst, že lineární regrese pro 15 minut vysvětluje jen necelých 29 %, to znamená, že jen 29% rozptylu je vysvětleno regresí. Pro 10080 minut (1 týden) je to už přes 52%. (Meloun a Militký 1994)

### Graf chyby

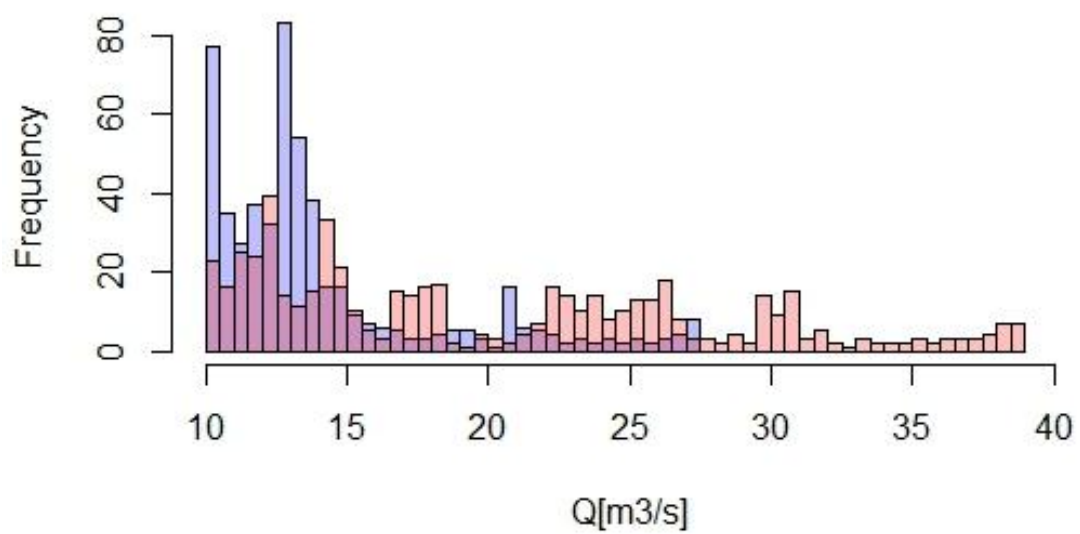
Graf 15 zobrazuje chyby při průtoku od 0 do 10 m<sup>3</sup>/s, kdy nejela elektrárna, ať už z důvodu sucha nebo jiné technické závady. Proto jsou nazývány jako chyby. Modrá část grafu znamená, kdy elektrárna jela a fialová, kdy ne. Když tyto parametry porovnáme, zjistíme, že nejčastěji byla elektrárna vypnutá při průtoku do 0,5 m<sup>3</sup>/s.



Graf 15 a chyby při průtoku do 10 m<sup>3</sup>/s

Graf 15 b. Zde je znázorněn průtok, kdy elektrárna vyráběla opět modře a růžově, kdy stála a byl výkon P nulový. Je zde patrné, že mezi 10 – 15 m<sup>3</sup>/s výroba elektrické energie byla o něco častější, než když při tomhle průtoku byla elektrárna zastavena. Ovšem s přibývajícím průtokem byla elektrárna, čím dál tím častěji odstavena. A od 27 m<sup>3</sup>/s a výš, elektrárna byla odstavena vždy.

### Histogram of Q[Q > 10]



Graf 15 b chyby při průtoku nad 10 m³/s.

### 13. Diskuse

Dle vyhodnocených dat jsem zjistila, že účinnost vodní elektrárny je daleko menší než se předpokládalo. Zjistila jsem, že maximální výkon je 64 kWh, místo 95 kWh, což je pořádný rozdíl. Proto jsem se rozhodla zjistit, proč tomu tak je a co by pomohlo většímu výkonu.

Největší problém u této elektrárny je nízký spád. Který se projevuje neblaze zejména při velké vodě. Stává se, že voda v řece stopne na tolik, že brání odtoku vody z turbín a turbíny se tzv. brodí, což vede nejdříve k rapidnímu poklesu výkonu a dále pak až k vypnutí vodního díla. Proto vodní elektrárna byla při průtoku nad 27 m<sup>3</sup>/s zastavena. Ke snižování výkonu, také dost napomáhají plovoucí nečistoty v řece, ty dokážou i při funkční hrabačce, dokonale ucpat česla a turbína tak nemá dostatek vody. Dalším hlavním činitelem je osazení špatnou vodní turbínou. Na tomto díle je špatně osazena Kaplanova turbína, protože tato turbína byla původně stavěna na větší spády. Má méně široké lopatky a mezi nimi jsou větší mezery, kde voda protéká zcela bez užitku. Je pravda, že Kaplanova turbína je v hodná pro nižší spády, ale existuje mnoho variant těchto turbín a často se stavěly přímo pro danou lokalitu. Pro zvýšení výkonu, je třeba vyměnit turbínu, za vodní turbínu, která je stavěna na menší spád a má širší lopatky a tudíž síla vody působí na větší plochu. Dále by bylo vhodné, přidat třetí malou turbínu, s výkonem do 10 kW, aby se zužitkovala všechna voda, kterou zpracovat lze, zejména při nízkých průtocích.

## 14. Závěr

Malé vodní elektrárny se řadí mezi nejekologičtější obnovitelné zdroje. Mají výhodu, že jsou stálým zdrojem výroby elektrické energie a jsou i k distribuční soustavě šetrné. Česká republika má hydroenergetický potenciál využít jen z části. Přestože, momentální podíl výroby elektrické energie z celkového podílu vyrobené energie je zanedbatelný, je velice důležité podpořit vznik nových MVE, které mohou z části nahradit výrobu energie z tepelných elektráren a tím přispět k zlepšení životnímu prostředí.

V této práci jsem zpracovala časové řady průtoků, výšky hladiny a výkonů naměřených pro malou vodní elektrárnu Semily na řece Olešce po 15 minutových krocích pro celý rok 2012. Ze zpracovaných časových řad, pomocí agregace jsem zjišťovala míru závislosti dat mezi sebou. Časové řady (data) byly zpracované v programu Microsoft Excel a v R Studiu, které je integrované prostředí pro software R. Závislost a chování časových řad, jsem dále zpracovávala a posuzovala pomocí výstupů z grafů pro autokorelaci, rozptyl, histogram, hydrograf, krabicový graf, empirickou kumulativní distribuční funkci, shlukový graf a lineární regresi. Hlavním cílem této práce bylo, posoudit účinnost Malé vodní elektrárny, na základě analýzy vztahu výkonu a průtoku.

Shrnutí výsledků pro grafové výstupy. Autokorelace časových řad nám vyjádřila vliv agregace na autokorelaci a vyjadřuje, že čím jsou časové řady agregovány po větším kroku (od 15 minutového až do 1 týdne), tím je hodnota autokorelace větší a blíží se více ke své maximální hodnotě 1. Hlavní vliv agregace je „vyhlazování“ dat, u kterých se snižují jejich extrémní hodnoty. U grafu rozptylu pro výkon i pro průtok byl zjištěn vliv agregace a graf nám vyjádřil, že čím jsou data agregována po větších krocích, tím se jejich rozptyl snižuje. Což je naprosto logické, protože, jak bylo již řečeno, snižuje extrémní hodnoty. Dále jsem zpracovala časové řady pomocí histogramu, který vykazuje četnost výskytu hodnot za celou časovou řadu, tedy rok 2012. Pro průtok bylo zjištěno, že nejčastější výskyt průtoku byl mezi 0,5 – 1 m<sup>3</sup>/s a nejčastější výkon vodní elektrárny se pohyboval okolo 10 kWh. Maximální výkon se pak pohyboval do 64 kWh. Nutno dodat, že tento rok byl velice suchý. Proto, tak nízké výkony. Dále jsem časové řady zkoumala pomocí funkce ecdf ( Empirická kumulativní distribuční funkce), ze které jsem vyčetla procentuální šanci, jak velký bude průtok a výkon. U průtoku je 80% šance, že průtok bude od 0,262 do 2 m<sup>3</sup>/s a výkonu je 80% šance, že výkon bude menší než 20 kWh. Z krabicového grafu jsem zjistila hodnoty minimální, maximální, 1 a 3 kvartil a



medián pro časové řady průtoku a výkonu. Zjistila jsem, že minimální hodnota průtoku za celý rok byla 0,262 m<sup>3</sup>/s, maximální 27,480 m<sup>3</sup>/s. Medián je na hodnotě 0,729 m<sup>3</sup>/s. Minimální hodnota výkonu je 1 kWh, protože, zde jsem zpracovávala jen nenulové hodnoty, nulové hodnoty byly zpracovány pomocí histogramu, který je nazván jako chyby. Maximální hodnota výkonu byla 64 kWh a medián byl 11,5 kWh. Vráťím se zpět k histogramu, který zpracovává nulové hodnoty výkonu, zde bylo zjištěno, že nejčastěji vodní elektrárna stála kvůli suchu a to bylo při průtocích do 0,5 m<sup>3</sup>/s. Naopak při velkých průtocích od 27 m<sup>3</sup>/s výš, elektrárna vždy stála, protože, už se jednalo o povodňovou vlnu. Tyto extrémní průtoky, kdy elektrárna nebyla v provozu, nejsou zahrnuty do předešlých grafů. Nejdůležitějším grafovým výstupem je shlukový graf, který vyjadřuje závislost výkonu na průtoku a posuzuje, při jakém průtoku byla účinnost MVE nejlepší. Pomocí lineární regrese jsem zjistila, že jde o dost významnou závislost. Ze shlukového grafu jsem vyčetla, že nejlepší účinnost má vodní elektrárna při průtoku do 3,2 m<sup>3</sup>/s, kdy dosahuje svého maxima a vyrábí 64 kWh, při zvyšující se vodě, výroba elektrické energie pomalu klesá, protože začíná stoupat hladina spodní vody a voda od turbín nestačí odtékat sávkou ven a turbíny se začínají pomalu brodit. Z grafu je také dobře znát, kdy běžela malá turbína s výkonem do 20 kW a kdy i velká s instalovaným výkonem do 75 kW. Při průtoku od 0,15 – 0,7 m<sup>3</sup>/s běžela malá turbína (Francisova) a při průtoku od 0,7 – 2,5 m<sup>3</sup>/s běžela velká (Kaplanova turbína). Při větším průtoku byly spuštěny většinou obě turbíny. Někdy při větším průtoku byla v provozu jen Francisova turbína, protože ve vodě šlo hodně listů a nepořádku, česla se zanášela a hrabačka nestíhala.

Z těchto výsledků je znát, že účinnost MVE zdaleka není taková, jaká se předpokládala. Předpokládalo se, že instalovaný výkon bude 95 kW, ale nyní se ukázalo, že maximální výkon dosahuje jen 64 kWh. Po diskusi s majitelem, jsem zjistila, že hlavním problémem je nízký spád, který se při velké vodě ještě sníží a dochází již k zmiňovanému brodění vodních turbín.

U malých vodních elektráren je pořád spousta práce a i účinnost často nebývá taková, jakou bychom si přáli. Nebo je v řece průtok moc malý, anebo zase moc velký a vodní dílo musí být vypnuté. Proto většinou malé vodní elektrárny provozují nadšenci, kteří to dělají z radosti.

## 15. Zdroje

Přehled literatury a použitých zdrojů:

- Arndt R. E. A., Gulliver J. S., 1991: Hydropower Engineering handbook. McGraw-Hill, USA.
- Bednář J., 1989: Malé vodní elektrárny 2 [turbíny]. SNTL, Praha, 237 s.
- Bednář J., 2013: Turbíny [malé vodní elektrárny]. Marcela Bednářová, Brno, 321 s.
- Broža V., Čihák F., Gabriel P., Kučerová J., Procházka A., 1993: Využití vodní energie. ČVUT, Praha, 251 s.
- Cyhelský L., Hindls R., Likeš J., 1993: Úvod do statistiky a pravděpodobnosti. VŠE, Praha, 170 s.
- Česká společnost pro větrnou energii, 2013. Online: <http://www.csve.cz/clanky/vyvoj-vykupnich-cen-vetrne-energie-a-ostatnich-obnovitelnych-zdroju/278/>. Staženo: 25. 3. 2015
- ČEZ. Obnovitelné zdroje. Online: <https://www.cez.cz/edee/content/file/energie-a-zivotni-prostredi/oze-cr-all-17-01-obalka-in.pdf/>. Staženo: 20. 3. 2015
- Čihák F., Dušička P., Gabriel P., Hodák T., Šulek P., 2003: Malé vodní elektrárny . Jaga group, Bratislava, 175 s.
- Čihák F., Gabriel P., Kalandra P., 1998: Malé vodní elektrárny. ČVUT, Praha, 321 s.
- Čihák F., Gabriel P., Kučerová J., 1992: Malé vodní elektrárny. ČVUT, Praha, 178 s.
- Dudek M., Tošenovský J., 2004: Základy statistického zpracování dat. VŠB – TU Ostrava, Ostrava, 79 s.
- Everitt B. S., 1998: Statistics [third edition].Cambridge university press, Uk, 432 s.
- Gabriel P., Kučerová J., 1995: Navrhování vodních elektráren. ČVUT, Praha, 195 s.
- Holata M., 2002: Malé vodní elektrárny [projektování a provoz]. Akademie věd ČR, Praha, 365 s.

- Holata M., Kratochvil S., Štoll., 1977: Využití vodní energie. Nakladatelství technické literatury (SNTL), Praha, 612 s.
- Kožíšek J., 2000: Statistická analýza [příklady]. ČVUT, Praha, 171 s.
- Kožíšek J., Stieberová B., 2014: Statistická a rozhodovací analýza. ČVUT, Praha, 252 s.
- Liebelt P. B., 1967: An introduction to optimal estimation. Addison – Wesley publishing company, USA, 273 s.
- Löster T., Řezanková H., 2013: Základy statistiky. VŠE, Praha, 95 s.
- Loučková I. 1992: Analýza dat [jednorozměrná rozložení číselného typu]. STK, Praha, 51 s.
- Máca P., 2014: Hydrologie pro bakaláře. ČZU, Praha, 126 s.
- Malá voda. Online: <http://mve.energetika.cz/>. Staženo
- Mathur J., Wagner H. J., 2011: Introduction to Hydro Energy Systems. Spinger, Heidelberg, 129 s.
- Meloun M., Militký J., 1994: Statistické zpracování experimentálních dat. Plus, Praha, 839 s.
- Meloun M., Militký J., 2002: Kompendium statistického zpracování dat. Academia, Praha, 764 s.
- Neubauer J., 2014: Statistika 2.  
Online: <http://k101.unob.cz/~neubauer/ekonometrie.html/>. Staženo: 25. 3. 2015
- Noyes R., 1980: Small and micro hydroelectric power plants. Noyes data corporation, New Jersey, 457 s.
- Pavelka F., 1983: Metody statistické analýzy. SNTL, Praha, 107 s.
- Pažout F., 1990: Malé vodní elektrárny 1 [ekonomika - předpisy]. SNTL, Praha, 502 s.
- Průmysl a energetika, 2014: Výroba elektřiny a tepla. Zdroj ERU, MPO, online: <http://issar.cenia.cz/issar/page.php?id=1560/>. Staženo: 25. 3. 2015
- SPVEZ – Svaz podnikatelů pro využití energetických zdrojů, 2010: Vodní elektrárny. Online: <http://www.spvez.cz/pages/OZE/voda.htm/>. Staženo: 20.

3. 2015

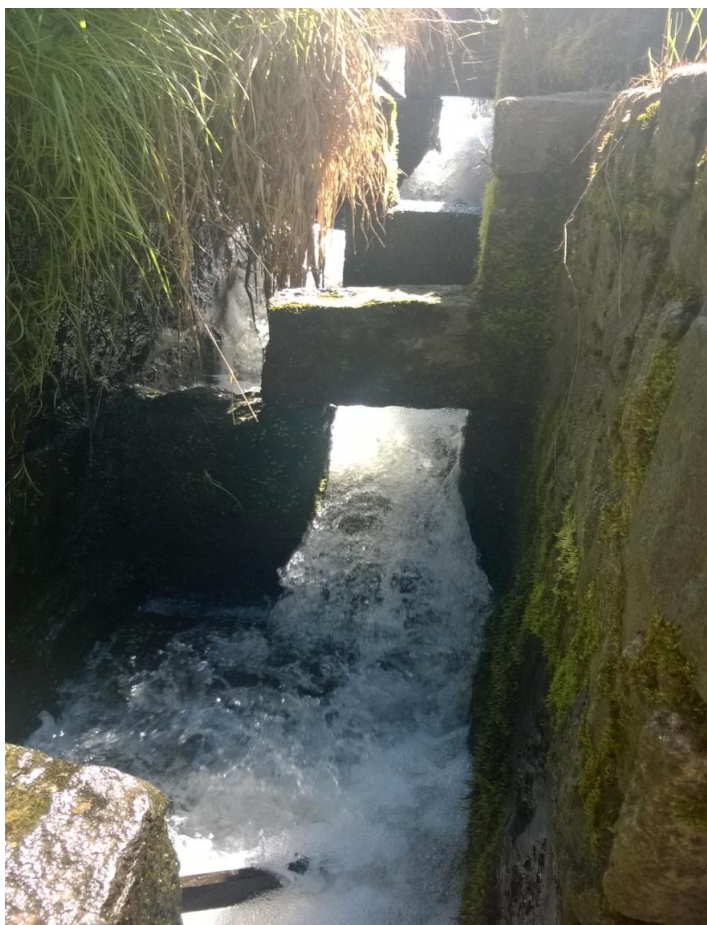
- Trosset M. W., 2009: An Introduction to Statistical Inference and Its Applications with R. CRC Press, USA, 463 s.
- Vodní mlýny, 2012: Impire, online:  
<http://vodnimlyny.cz/mlyny/mlyn/3140?locale=pl/>. Staženo: 23. 3. 2015

## 16. Přílohy

Fotografie vodního díla MVE Semily na řece Olešce.



Obr. č. 1 Vzdouvací objekt



Obr. č. 2 Rybí přechod



Obr. č. 3 Vtokový objekt



Obr. č. 4 Přivaděč vody



Obr. č. 5 Jalová propust a čidla pro automatické řízení





Obr. č. 6 Strojovna MVE



Obr. č. 7. Vnitřek strojovny s turbínami



Obr. č. 8 Vnitřek strojovny se stavidly a hrabáčkami



Obr. č. 9 Mozek strojovny, zde řídí automatika provoz elektrárny



Obr. č. 10 Odpadní kanál i se savkami



Obr. č. 11 Žabí tůň



Obr. č. 12 Detail žabí tůně i s pulci