



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

REKONSTRUKCE MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY ALBRECHTICE

THE RECONSTRUCTION OF SMALL HYDRO POWER ALBRECHTICE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marek Tuhý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Miloslav Haluza, CSc.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Marek Tuhý**
Studijní program: Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor: Fluidní inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Miloslav Haluza, CSc.**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Rekonstrukce malé vodní elektrárny Albrechtice

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Malá vodní elektrárna Albrechtice byla uvedena do provozu před více než devadesáti lety. Je osazena rychloběžnými Francisovými turbínami. V současné době stojí před rekonstrukcí. Došlo ke změně parametrů lokality (jak průtoku, tak spádu) oproti návrhovým parametrům z roku 1920. K dispozici je řada dokumentů, měření i fotografií. Přístup na lokalitu je zajištěn.

Cíle diplomové práce:

Nalezení charakteristik záměru rekonstrukce MVE Albrechtice s přihlédnutím na nové přírodní parametry a nové provozní podmínky lokality Albrechtice.

Seznam doporučené literatury:

MASIAR, E., KAMENSKÝ, J.: Hydraulika II, skripta SVŠT Bratislava 1986

HALUZA, M.: Přednášky z předmětu Projektování a provoz tekutinových zařízení, VUT v Brně, zimní semestr 2021

LENGYEL, J.: Projektovanie vodných elektrární, skripta SVŠT Bratislava, 1963

HALUZA, M.: Přednášky z předmětu Tekutinové stroje, VUT v Brně, zimní semestr 2021

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je nalezení univerzální charakteristiky rychloběžné Francisovy turbíny malé vodní elektrárny Albrechtice na Orlici. K dispozici byly dochované historické materiály a soubor měření provedený současným majitelem. V další části byla vypočtena roční výroba energie touto elektrárnou.

Klíčová slova

Francisova turbína, univerzální charakteristika, malá vodní elektrárna, roční výroba energie

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to find the universal characteristics of the high-speed Francis turbine of the small hydroelectric power plant Albrechtice on Orlice. Preserved historical materials and a set of measurements made by the current owner were used. In the next part, the annual energy production of this power plant was calculated.

Key words

Francis turbine, universal characteristics, small hydroelectric power plant, annual electricity production

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TUHÝ, Marek. Rekonstrukce malé vodní elektrárny Albrechtice. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140632>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Miloslav Haluza.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Rekonstrukce malé vodní elektrárny Albrechtice vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Miloslavovi Haluzovi CSc. za cenné rady a připomínky, jakož i za celkově vstřícný přístup a čas, který mi věnoval při vedení této diplomové práce. Taktéž děkuji majiteli elektrárny Ing. Jiřímu Čápkovi za umožnění realizace této práce i za jeho cenné rady, kterých se mi po celou dobu dostávalo.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Vodní elektrárny	12
1.1 Rozdělení vodních elektráren (1).....	12
1.2 MVE (2).....	12
1.2.1 Problematika malých spádů (3).....	13
1.3 Vodní turbíny (4)	13
1.3.1 Výkon a účinnost VT	13
1.3.2 Základní rozdělení turbín:	13
2 Charakteristické znaky vodních turbín (5)	15
2.1 Jednotkové parametry	15
2.2 Měrné otáčky	16
2.3 Závislost změny účinnosti na rozměrech stroje	17
2.4 Univerzální charakteristika Francisovy turbíny (5)	17
2.4.1 Měření charakteristiky s jedním stupněm regulace na zkušebně (7)	18
3 Malá vodní elektrárna Albrechtice	21
3.1 Popis lokality (8).....	21
3.2 Hydrologické poměry	21
3.3 Popis vodního díla (8).....	23
3.3.1 Válcový jez.....	23
3.3.2 Vorová propust.....	23
3.3.3 Štěrková propust.....	23
3.3.4 MVE.....	24
3.4 Historie vodní elektrárny (9).....	25
4 Rekonstrukce MVE Albrechtice.....	28
4.1 Uspořádání	28
4.2 Budoucí rekonstrukce	29
4.3 Nalezení charakteristiky $Q_{11-n_{11}}$	29
4.3.1 Srovnání s existujícími charakteristikami	31
4.3.2 Vytvoření nové charakteristiky	34
4.3.3 Odhadnutí křivek otevření RK	36
4.3.4 Vykreslení provozní oblasti	37
5 Roční výroba energie.....	38
5.1 Výpočet varianty č. 1	39
5.2 Varianta č. 2	40
5.3 Varianta č. 3	41
5.4 Varianta č. 4.....	42
5.5 Varianta č. 5.....	42
5.6 Tabulky s výpočty pro variantu 1 až 5.....	44
5.7 Celková vyrobená energie.....	48
ZÁVĚR.....	50
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	51

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	52
SEZNAM OBRÁZKŮ	53
SEZNAM GRAFŮ.....	54
SEZNAM TABULEK.....	55

ÚVOD

Obnovitelné zdroje energie jsou budoucností energetiky. Jejich význam spočívá nejen v šetrném přístupu k životnímu prostředí, ale rovněž v rozšíření jejich budoucího využití. Své nezastupitelné místo v portfoliu obnovitelných zdrojů má právě vodní energetika.

Vzhledem k tomu, že v současné době je hydroenergetický potenciál vodních toků v ČR pro stavbu větších vodních děl vyčerpán, budoucnost vodní energetiky v spočívá právě v budování malých vodních elektráren (instalovaný výkon do 10 MW). Jejich přínos spočívá nejen v tom, že jejich výstavba nevyžaduje tak velké zásahy do krajiny, ale vyznačuje se i nižšími investičními náklady na jejich pořízení.

Vzhledem k tomu, že malá vodní elektrárna Albrechtice současně stojí před rekonstrukcí, je cílem této diplomové práce nalezení univerzální charakteristiky rychloběžné Francisovy turbíny k jejímu správnému zhotovení.

Na začátek diplomové práce se pokusím shrnout teorii k dané problematice. První kapitola je věnována vodním elektrárnám a jejich dělení, v další kapitole pak budou uvedeny charakteristické znaky vodních turbín a hrubý popis získání univerzální charakteristiky vodní turbíny.

Ve třetí kapitole je uveden popis vodního díla Albrechtice na Orlici, přičemž pozornost je věnována jak hydrologickým poměrům dané lokality, tak také historii a současnému stavu. Vycházeno přitom bylo z manipulačního řádu poskytnutého majitelem elektrárny Ing. Jiřím Čápem.

Čtvrtá kapitola se věnuje zjištění univerzální charakteristiky Francisovy turbíny, která se nachází na malé vodní elektrárně Albrechtice. Vzhledem k tomu, že měření na díle je finančně i časově náročné, bylo přistoupeno k odhadu charakteristiky na základě námi dostupných měření a dochovaných historických podkladů.

V poslední kapitole je proveden výpočet roční výroby elektrické energie s přihlédnutím k současným hydrologickým poměrům řeky Orlice, včetně vymezení doby provozu jednotlivých turbín k dosažení maximálního možného výkonu.

1 Vodní elektrárny

Vodní elektrárny jsou zdroje elektrické energie využívající přeměnu energie vody na energii elektrickou. Voda odevzdává svou energii turbíně, a ta elektrickému generátoru, který vyrábí elektřinu. Řadí se mezi nejvýznamnější obnovitelné zdroje energie.

1.1 Rozdělení vodních elektráren (1)

Vodní elektrárny lze rozdělit podle několika kritérií.

Z hlediska využití vodního toku lze elektrárny rozdělit na:

- **Průtočné vodní elektrárny** – využívají přirozený průtok řeky, který nelze ovlivňovat. Při překročení průtoku, na který je elektrárna dimenzována (závislý na hltnosti turbín) je přebytečné množství vody odvedeno bez využití. Průtočné vodní elektrárny se dále dělí na:
 - Jezové – využívají jezu pro vzednutí vodní hladiny
 - Derivační – využívají derivačního přivaděče (potrubí, kanálu, štoly), který přivádí vodu z koryta řeky k turbíně vodní elektrárny.
- **Akumulační vodní elektrárny** – akumulace vody a spád je zajištěn přehrazením řeky přehradní hrází. Bývají umístěny ihned pod přehradou (přehradní vodní elektrárny), případně jsou s přehradou spojeny tlakovým přivaděčem (přehradní derivační vodní elektrárny). Mimo akumulace elektrické energie stabilizují vodní toky a chrání tak před povodněmi. Nádrže jsou také v mnoha případech zdrojem pitné vody pro vodárny, či technologické vody pro průmysl a zemědělství.
- **Přečerpávací vodní elektrárny** – slouží k akumulaci elektrické energie. Princip spočívá ve využití dvou různě výškově položených nádrží a akumulace energie v podobě potenciální energie vody. Ta je čerpána pomocí čerpadel do výše položené nádrže. Při potřebě elektrické energie voda protéká přes turbínu a vodní elektrárna dodává energii do elektrizační soustavy.
- **Slapové vodní elektrárny** – využívá kinetickou energii vody při přílivu a odlivu. V současné době nejsou využívány ve větším měřítku

Z hlediska využívaného spádu lze dělit na:

- **Nízkotlaké** – spád do 20 m
- **Středotlaké** – spád od 20 do 100 m
- **Vysokotlaké** – spád nad 100 m

Z hlediska instalovaného výkonu:

- **Malé vodní elektrárny** (dále jen „MVE“) – do 10 MW
- **Střední vodní elektrárny** – do 100 MW
- **Velké vodní elektrárny** – nad 100 MW

1.2 MVE (2)

MVE využívají energetický potenciál menších vodních zdrojů. Jak již bylo více uvedeno, jedná se o elektrárny, jejichž instalovaný výkon nepřesahuje 10 MW. Přestože vyrobí méně než 10 % elektřiny z výkonu všech vodních elektráren, řadíme je k

nejekologičtějším a nejekonomičtějším energetickým zdrojům. K jejich výstavbě dochází většinou v místech bývalých mlýnů a jezů, kde to klimatické podmínky umožňují.

1.2.1 Problematika malých spádů (3)

Vzhledem k tomu, že průtok vody v menších tocích v průběhu roku značně kolísá, je třeba tuto skutečnost při návrhu MVE uvažovat. Při nárůstu vodní hladiny se spád snižuje, je proto nutné počítat s tím, že elektrárna může být po určitou dobu odstavena v důsledku ztráty spádu. Dále je nezbytné počítat s manipulačním řádem dané elektrárny, neboť v zájmu ochrany přírody musí být část vody ponechána v původním řečišti a nelze ji tak využít pro výrobu elektrické energie v MVE.

1.3 Vodní turbíny (4)

Základem každé vodní elektrárny je vodní turbína (dále jen „VT“). VT je stroj, který přeměňuje kinetickou a potenciální energii vody na energii mechanickou.

1.3.1 Výkon a účinnost VT

Teoretický výkon P_{th} :

$$P_{th} = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \text{ [W]} \quad (1.1)$$

Kde: ρ ... je hustota kapaliny
 g ... je tíhové zrychlení
 H ... je spád turbíny
 Q ... je průtok turbínou

Efektivní výkony P_{ef} :

$$P_{ef} = \eta \cdot P_{th} \text{ [W]} \quad (1.2)$$

Kde: η ... je účinnost turbíny

Účinnost η : určuje se na základě měření, většinou na modelu. Pro turbínu se určuje jako:

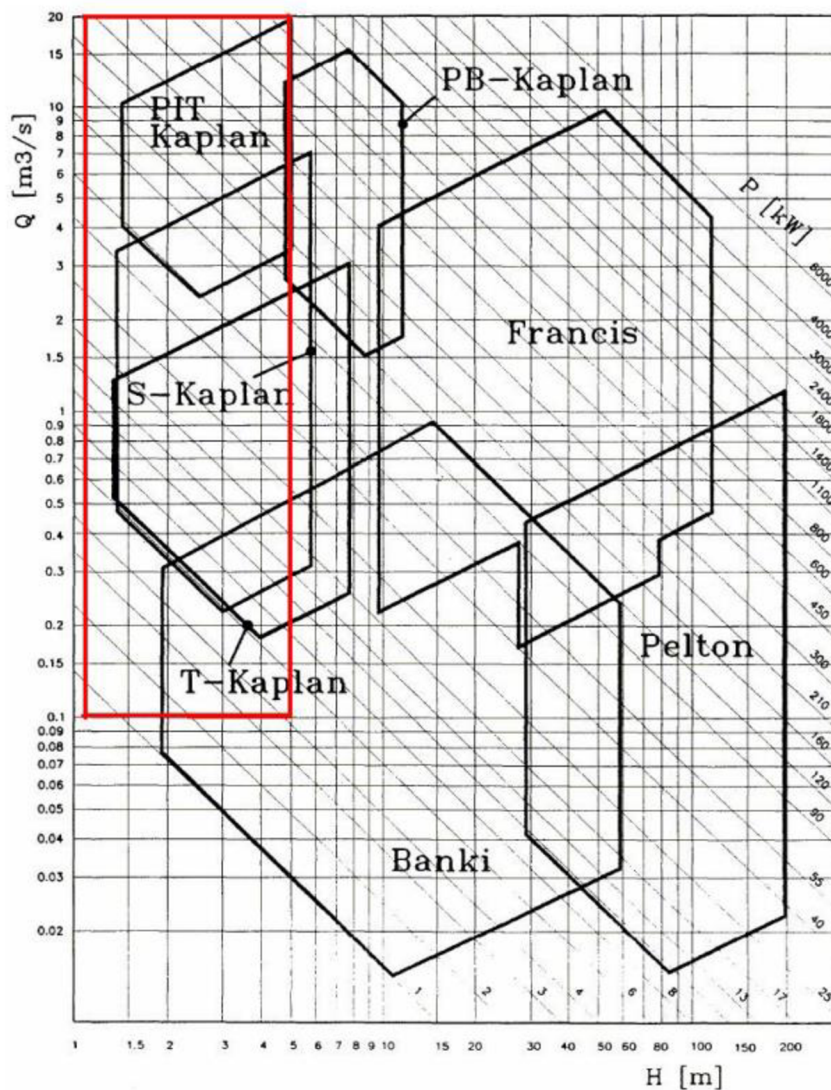
$$\eta = \frac{M \cdot \omega}{P_{th}} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (1.3)$$

Kde: M ... je kroutící moment
 ω ... je úhlová rychlost

1.3.2 Základní rozdělení turbín:

- **Rovnotlaké:** tlak vody na vstupu do oběžného kola (dále jen „OK“) a na jeho výstupu je stejný. To znamená, že potenciální energie vody se na konci přivaděče mění na energii kinetickou, takže voda proudí v atmosférickém prostředí za nulového přetlaku v OK. Mezi rovnotlaké turbíny patří např.:
 - **Peltonova turbína:** vhodná pro malé průtoky a velké spády. Má dva stupně regulace, a to dýzou s regulační jehlou a deflektorem.
 - **Bánkiho turbína**

- **Přetlakové:** tlak vody na vstupu do OK je větší než na jeho výstupu. Základní druhy přetlakových turbín jsou:
 - **Kaplanova turbína:** vhodná pro malé spády a velké průtoky, a to v rozsahu měrných energií $E = 10$ až $700 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$. Spádový světový rekord drží VE Orlík a to $H = 70,5 \text{ m}$. Průtokový světový rekord má KT na Saratovské VE, a to $806 \text{ m}^3/\text{s}$. KT má dva stupně regulace, prvním stupněm je regulace lopatkami rozváděcího kola (dále jen „RK“), druhým stupněm je regulace lopatkami OK.
 - **Francisova turbína** (dále jen „FT“): má jeden stupeň regulace, a to pomocí RK. Vhodné pro střední spády a průtoky.



Obr. 1 Oblast použití základních typů turbín (červeně vřívá turbína) (3)

2 Charakteristické znaky vodních turbín (5)

Aby měl každý podnik vyrábějící vodní turbíny předem jistotu, že turbína jím vyrobená bude vyhovovat maximálním průtokem (hltností) i účinností, provádí tzv. modelovou zkoušku. Zhotoví se menší turbína (modelová), na které proběhne zkouška na zkušební stanici. Ve stanici je čerpadlo, které čerpá vodu do výše položené nádrže, odkud vede potrubí k modelové turbíně. Stanice má přístroje, kterými je možno přesně měřit spád, průtok a otáčky turbíny. Brzděním se zjistí při různých otáčkách a průtocích, účinnosti, průběžné otáčky a záběrné momenty, které se pak přepočtou na skutečný průměr a spád objednané turbíny. Výsledky těchto zkoušek se sestavují do přehledného diagramu, tzv. univerzální charakteristiky. Souřadnicemi takovýchto charakteristik jsou různá podobnostní kritéria.

2.1 Jednotkové parametry

Mezi jednotkové parametry patří:

- **Jednotkové otáčky, označené n_{ED}** (vycházejí ze Sh-čísla):

$$n_{ED} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{H}} \quad (2.1)$$

Kde: n ...otáčky turbíny
 D ...průměr turbíny
 H ...spád na turbínu

- **Jednotkový průtok Q_{ED}** (vychází z podobnosti Eu-čísla):

$$Q_{ED} = \frac{Q}{(D^2 \cdot \sqrt{H})} \quad (2.2)$$

Kde: Q ...průtok turbínou

- **Jednotkový výkon P_{ED} :**

$$P_{ED} = \frac{P}{\rho \cdot D^2 \cdot E^{\frac{3}{2}}} \quad (2.3)$$

Kde: P ...výkon
 ρ ...hustota kapaliny
 E ...měrná energie

- **Jednotkový kroučící moment M_{ED} :**

$$M_{ED} = \frac{M}{\rho \cdot D^3 \cdot E} \quad (2.4)$$

Kde: M ...kroučící moment

Často se používají podobnostní kritéria vodních turbín pro spád $H = 1$ m a průměr oběžného kola $D = 1$ m, takovými parametry se říká jednotkové otáčky n_{11} (dále jen „ n_{11} “) a jednotkový průtok Q_{11} (dále jen „ Q_{11} “). V současné době se jednotkové parametry definují jako bezrozměrné.

$$Q_{11} = \frac{Q}{(D^2 * \sqrt{H})} \quad (2.5)$$

$$n_{11} = \frac{n * D}{\sqrt{H}} \quad (2.6)$$

Jednotkové parametry slouží k porovnání turbín (model a dílo). Víše uvedené vztahy by byly přesné, kdyby hydraulická účinnost modelu a díla byla stejná, ale větší stroje mají větší účinnosti. Jednotkové vztahy jsou tedy ještě dány přepočtem přes účinnost:

$$\frac{Q_{11D}}{Q_{11M}} = \frac{n_{11D}}{n_{11M}} = \sqrt{\frac{\eta_{hD}}{\eta_{hM}}} \cong \sqrt{\frac{\eta_D}{\eta_M}} \quad (2.7)$$

Takže:

$$Q_{11M} = Q_{11D} \cdot \sqrt{\frac{\eta_M}{\eta_D}} \quad (2.8)$$

$$n_{11M} = n_{11D} \cdot \sqrt{\frac{\eta_M}{\eta_D}} \quad (2.9)$$

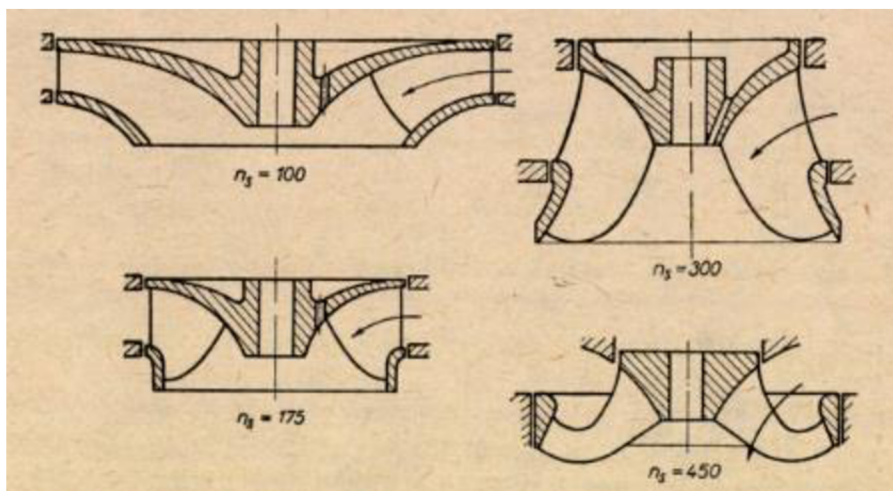
2.2 Měrné otáčky

Měrné (specifické) otáčky n_s jsou měřítkem rychlosti chodu turbín za určitých poměrů (H , Q) a určují nám konstrukční hodnoty turbíny a tím i její tvar (rov. 2.10).

$$n_s = 3,65 \cdot \frac{n \cdot \sqrt{Q \cdot \eta}}{H^{0,75}} [\text{min}^{-1}] \quad (2.10)$$

Druhy turbín podle n_s :

n_s	Druh turbíny
4÷35	Peltonova turbína s 1 dýzou
17÷50	Peltonova turbína s 2 dýzami
24÷70	Peltonova turbína se 4 dýzami
60÷120	Francisova turbína volnoběžná
120÷220	Francisova turbína normální
220÷350	Francisova turbína rychloběžná
350÷450	Francisova turbína expresní
300÷1000	propelerová a Kaplanova turbína



Obr. 2 Tvar Francisova kola pro různé měrné otáčky (6)

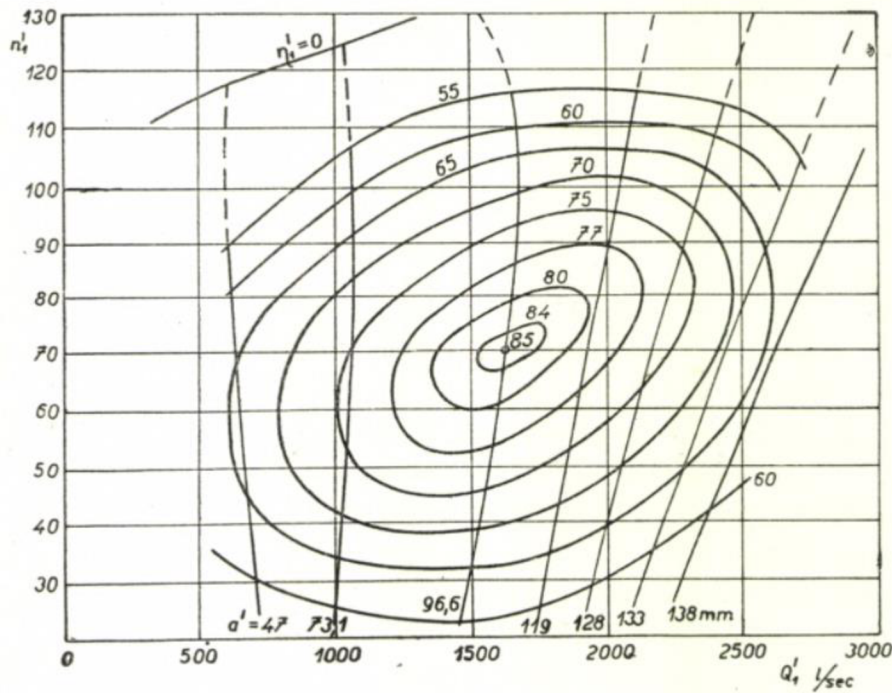
2.3 Závislost změny účinnosti na rozměrech stroje

Účinnost naměřená na modelu neodpovídá účinnosti díla. Účinnosti se zvětšuje s větším rozměrem. K přepočtu pro účinnosti Francisovy turbíny slouží vztah podle Moodyho:

$$\eta_D = 1 - (1 - \eta_M) \cdot \left(\frac{D_M}{D_D}\right)^{0,2} \quad (2.11)$$

2.4 Univerzální charakteristika Francisovy turbíny (5)

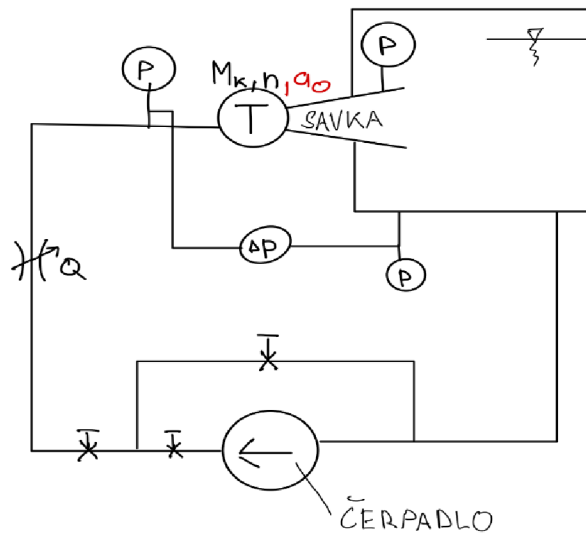
Francisovy turbíny mají jeden stupeň regulace, kterým jsou lopatky RK. Lopatky RK jsou charakterizovány otevřením a_0 , což je ortogonální šířka mezi sousedními lopatkami. Významným bodem v charakteristice je optimální bod s maximální účinností, který udává optimální jednotkové parametry průtoku a otáček. Do charakteristiky je možné zakreslit provozní oblast, tato oblast zahrnuje spádový rozsah, který je vymezen rozsahem n_{11} a jednak požadovaným výkonovým rozsahem, který je vymezen rozsahem Q_{11} . Celá oblast je omezena křivkou průběžných otáček, na které je $\eta = 0 \%$, $M_{ED} = 0$. Na této křivce dosahuje turbína maximálních otáček.



Obr. 3 Univerzální charakteristika Francisovy turbíny (5)

2.4.1 Měření charakteristiky s jedním stupněm regulace na zkušebně (7)

V této podkapitole není popsán návod ke změření charakteristiky Francisovy turbíny. Jedná se o nastínění dané problematiky, aby si čtenář udělal představu o tom, jak se daná charakteristika získá. Na obrázku 4 je znázorněno schéma měřicí tratě. Na této trati je měřen průtok Q , rozdíl tlaku před a za turbínou, kroučící moment a otáčky turbíny. Dále je ukázka zpracování naměřených dat do známé podoby charakteristiky. Data byla vzata z projektu zpracovaného v předmětu Měření tekutinových mechanismů na VUT v zimním semestru roku 2021/2022. Jedná se o blíže nespecifikovanou Francisovu turbínu.

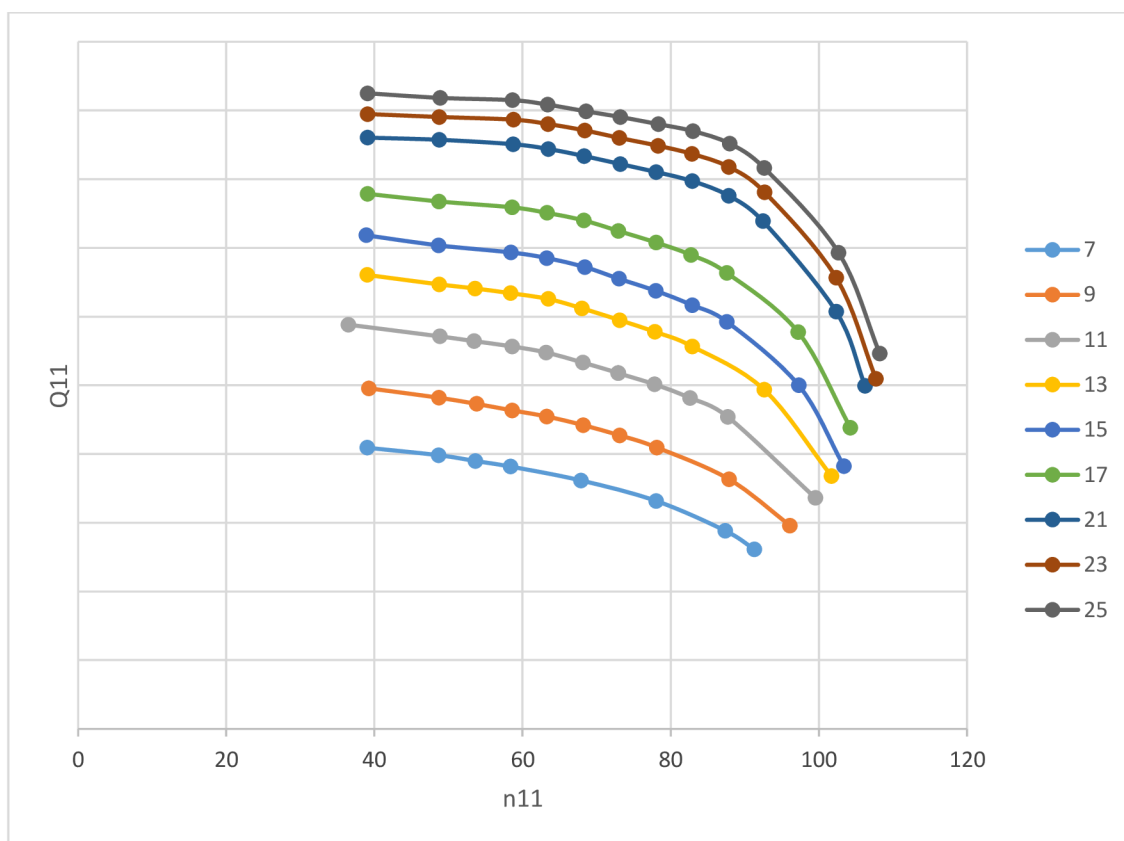


Obr. 4 Schéma měřicí tratě

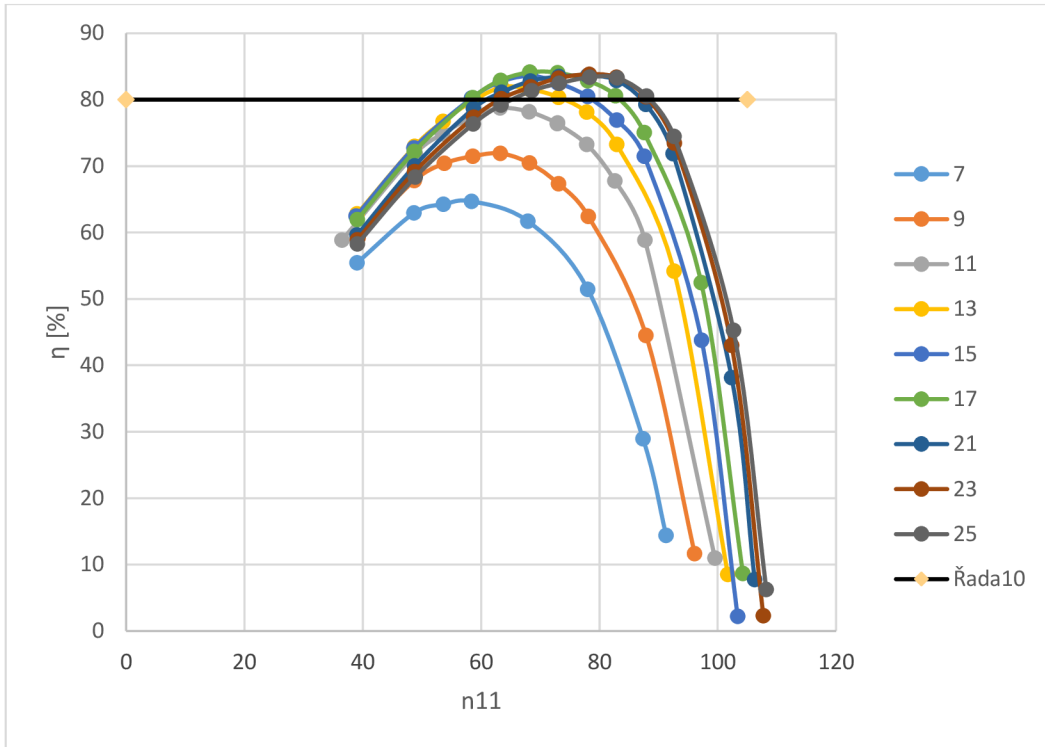
Postup měření:

1. Odvzdušnění
2. Nastavení otevření RK (a_0)
3. Nastavení n_{\min}
4. Nastavení H
5. Nastavení n , $H > n_{11}$
6. Měření
7. Zpět do body 5 (až změříme dostatečný počet bodů)
8. Zpět do bodu 2 (dokud neproměříme celý rozsah otevření rozvaděče tubíny)

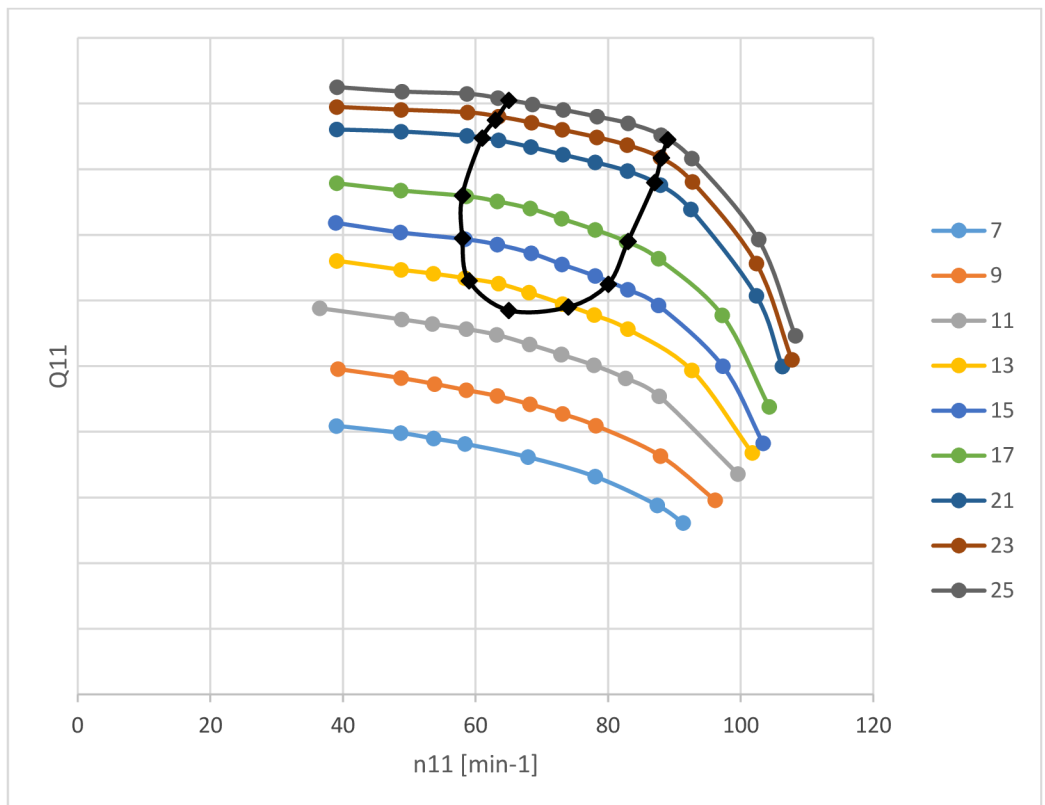
V grafu 1 jsou vykresleny Q_{11} a n_{11} bodů měření při různém otevření rozvaděče. V grafu 2 jsou vykresleny průběhy dosažených účinností při jednotlivých otevření RK v závislosti na n_{11} . Spolu s těmito křivka je vykreslena křivka účinnosti 80 %. Průsečíky těchto dvou křivek nám udávají hodnotu n_{11} daného otevření pro dosažení této účinnosti. Spojením těchto bodů nám vznikne křivka konstantní účinnosti 80 % (graf 3).



Graf 1 Vykreslení naměřených bodů při různém otevření rozvaděče



Graf 2 Vykreslení účinností na n_{11}



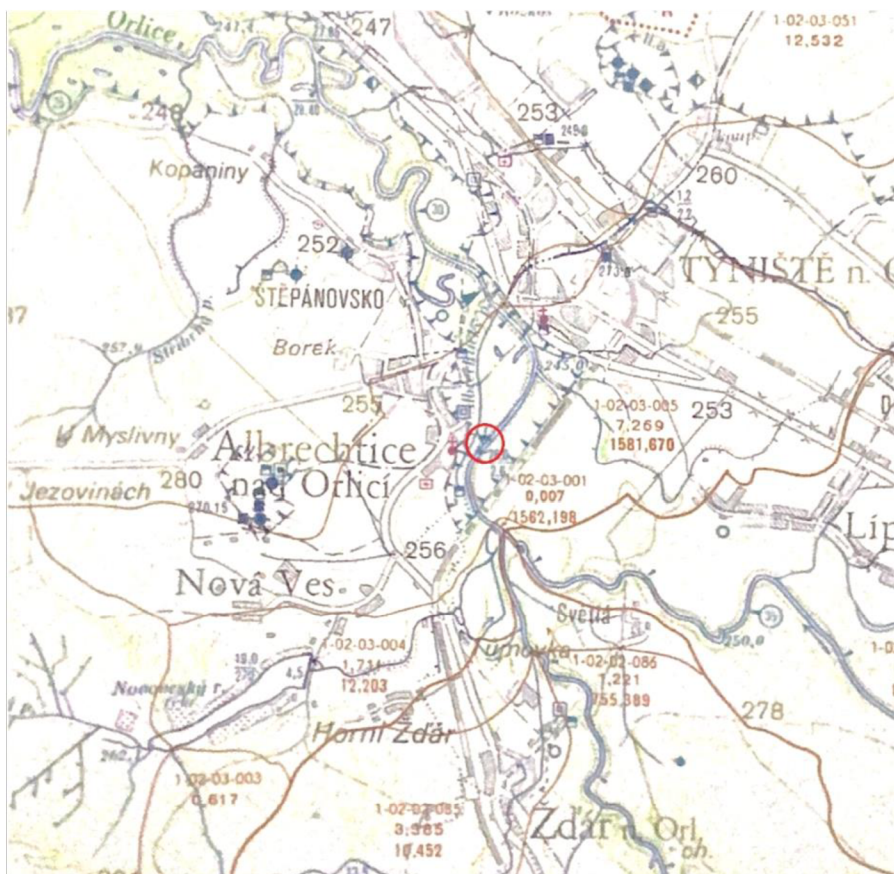
Graf 3 Vykreslení křivky účinnosti 80 %

Takto proběhne vykreslení jednotlivých čar konstantních účinností, až dostaneme charakteristiku podobnou té na obr. 3.

3 Malá vodní elektrárna Albrechtice

3.1 Popis lokality (8)

Malá vodní elektrárna Albrechtice se nachází na řece Orlici v říčním kilometru 31,967. Vodní elektrárna využívá spád přilehlého jezu. Ve strojovně elektrárny jsou umístěny tři Francisovy turbíny, které dosahují celkového instalovaného výkonu 425 kW. MVE ročně vyrobí průměrně kolem 1,753 GWh elektrické energie, což stačí k zásobení asi 600 domácností.



Obr. 5 Vodohospodářská mapa s vyznačením polohy MVE

3.2 Hydrologické poměry

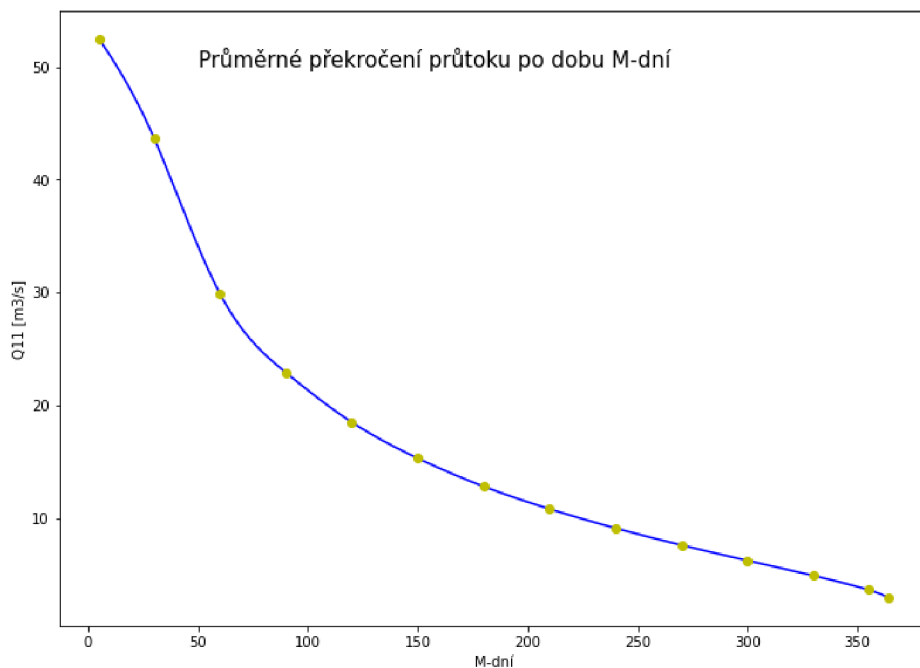
Hydrologická data poskytl Český hydrometeorologický ústav v Hradci Králové dne 9.2.2009.

Hydrologická data:

Tok:	Orlice
Stanice:	Týniště nad Orlicí
Hydrologické číslo povodí:	1-02-03-005
Staničení:	30,9 km
Plocha povodí:	1554,166 km ²
Nula vodočtu:	244,52 m n. m.
Průměrná dlouhodobá roční výška srážek:	876 mm
Průměrný dlouhodobý roční průtok:	19,15 m ³ *s ⁻¹

Tab. 1 Průměrné překročení průtoků po dobu M-dní

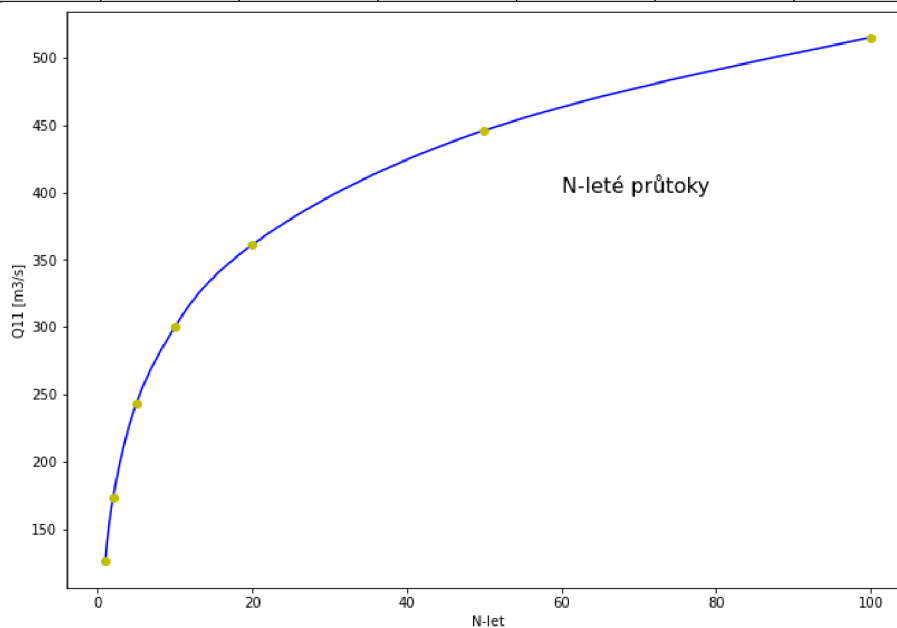
M-dní	5	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
Q [m ³ *s ⁻¹]	52,5	43,7	29,9	22,9	18,5	15,3	12,8	10,8	9,1	7,6	6,23	4,9	3,64	2,93



Graf 4 Grafické znázornění tab. 1

Tab. 2 Velké vody opakující se jednou za N-let

N-let	1	2	5	10	20	50	100
Q [m ³ *s ⁻¹]	126	173	243	300	361	446	515



Graf 5 Grafické znázornění N-letých průtoků

3.3 Popis vodního díla (8)

3.3.1 Válcový jez

Původní válcová konstrukce měla hradící výšku 1,3 m nad pevným prahem. Dodatečně byl válec opatřen 20 cm vysokým nástavcem (stejně jako vorová a štěrková propust). Od roku 2006 byl válec znovu navýšen dalším nástavcem přesahujícím nástavec stávající o 23 cm. Celková hradící výška válce je 1,73 m. Světlá šířka válce je 22 m. Kóta přelivné hrany zahrazeného válce je 248,63 m n. m. Válec je ovládán elektromechanicky z levého pilíře. Zvednout jej lze o 3,9 m nad pevný práh a jeho úplné zdvižení trvá asi 10 minut.

Pevnou část jezu tvoří betonové těleso v exponovaných částech obložené kamenem. Dno před jezem je cca na kótě 245,94 m n. m. Betonové těleso je spolu s vývarem provedeno jako jeden celek. Proti vodě i po vodě je objekt zajištěn štětovou stěnou a kamenným záhozem. Koruna pevné části jezu (dosedací práh válce) je osazena na kótě 246,90 m n. m. Dno vývaru pod pevnou částí je na kótě 244,59 m n. m. Vývar má celkovou délku 6 m a je ukončen pevným kolmým stupněm na kótě 245,40 m n. m.

Betonové pilíře jsou ve zhlaví obložené kamennými kvádry a slouží k vedení válce při jeho zdvihání. Pochůzné plochy obou pilířů jsou opatřeny zábradlím a na levém z nich je umístěn pohybovací mechanismus krytý železnou budkou.

3.3.2 Vorová propust

Propust je 6 m široká, hrazená 75 cm vysokým segmentem s 20 cm vysokou klapkou. Na klapce je nově nasazen nástavec výšky 23 cm, takže celková hradící výška je 1,18 m. Kóta přelivné hrany zdvižného segmentu je 248,63 m n. m. Se segmentem se manipuluje elektromotorem pomocí mechanismu umístěného na levém pilíři. Manipulace probíhá tak, že se nejprve sklopí klapka s nástavcem zavěšená na článkových řetězech a potom se spustí segment.

Spodní stavba vorové propusti je z betonu se základem na kótě 244,20 m n. m., který je vybudován z lomového kamene na cementovou maltu. Stavba propusti je proti vodě i po vodě ukončena štětovou stěnou a kamenným záhozem. Koruna pevného prahu vorové propusti je na kótě 247,45 m n. m. Od propusti vede do podjezí 20,5 m dlouhý skluz o spádu 10 %, který je ukončen štětovou stěnou na kótě 245,40 m n. m. Propust je překlenuta 1,1 m širokou lávkou, opatřenou 1,1 m vysokým zábradlím. Kóta spodní hrany lávky je 251,40 m n. m.

3.3.3 Štěrková propust

Propust je 2 m široká, hrazená 2,60 m vysokým dřevěným stavidlem s náplatkem výšky 43 cm (20 cm původní + 23 cm nový). Celková hradící výška stavidla je tedy 3,03 m. Kóta přelivné hrany zahrazeného stavidla je 248,63 m n. m. Stavidlo je ovládáno pomocí elektromotoru z manipulační lávky 1,15 m široké, opatřené zábradlím. Kóta spodní hrany lávky je osazena na úrovni 251,40 m n. m. Kromě této lávky je na kótě 250,10 m n. m. (o 1,6 m níže) otvor štěrkové propusti překlenut další lávkou o šířce 0,8 m se zábradlím. Spodní hrana této lávky je osazena na kótě 249,80 m n. m.

Spodní stavba štěrkové propusti je provedena jako betonová deska 0,9 – 1,5 m silná ukončená proti vodě i po vodě štětovou stěnou a záhozem. Levý pilíř propusti navazuje na pravou zeď vodní elektrárny a zároveň slouží jako podpěra jemných česlí před elektrárnou. Pravý pilíř je 2,5 m široký a odděluje štěrkovou a vorovou propust. Pilíř je betonový se zhlavím opevněným kamennými kvádry.

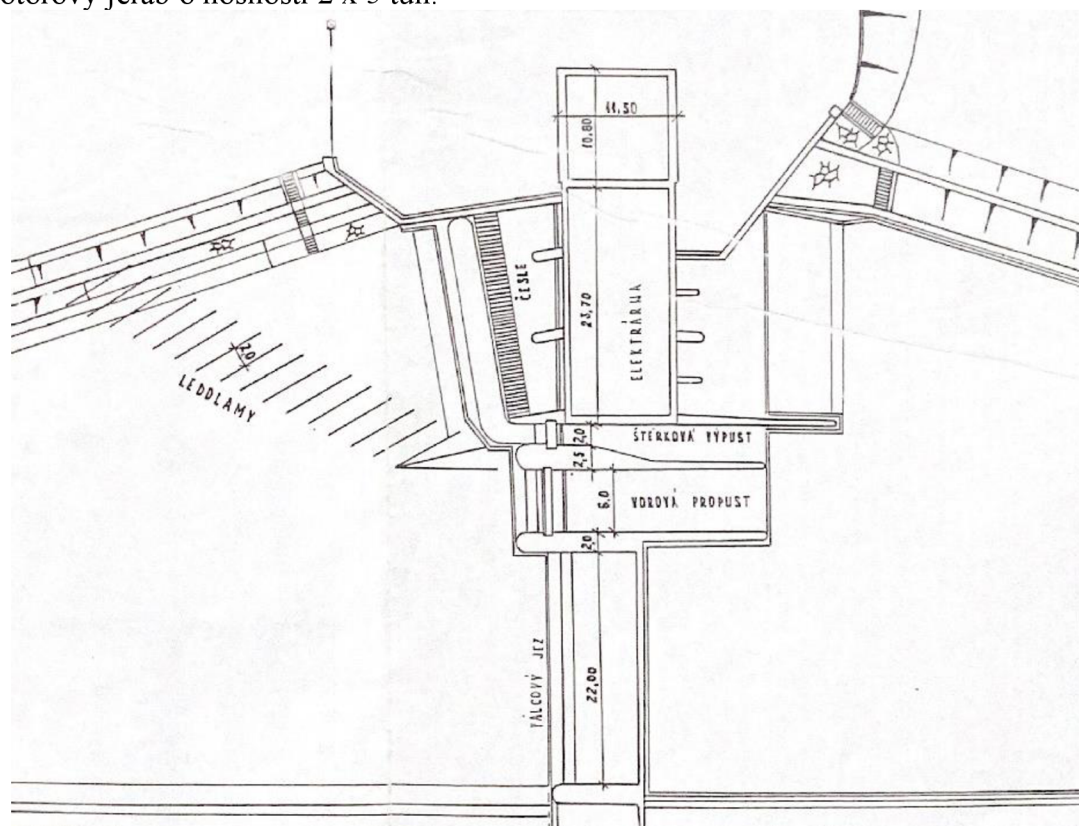
3.3.4 MVE

Vodní elektrárna je umístěna při levém břehu přímo v rozšířeném korytě a navazuje na jezu na Orlici, od kterého je oddělena šterkovou a vorovou propustí. Vtok na vodní elektrárnu je chráněn 18 ocelovými ledolamy L 20/20 opatřenými lávkou. Jemné česle před vtokem na turbíny jsou zhotoveny z páskové oceli a mají rozteč 3 cm. Čištění česlí probíhá strojně stíracím vozíkem. Prostor mezi česlicemi a elektrárnou je krytá dřevěnou podlahou. Vtok na každou turbínu je hrazen dvojicí elektricky ovládaných stavidel (hlavní a pomocné). Výška všech stavidel je 2,55 m. Šířka stavidel u levé (první) turbíny je 1,25 m a 3 m a šířka dvojic stavidel u turbín 2. a 3. je 2,8 m a 4,2 m.

Ve vodní elektrárně jsou nainstalovány tři Francisovy turbíny:

zleva	1. turbína	2. turbína	3. turbína
Spád	2,4 m	1,6 m	1,6 m
Hltnost	$6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Instalovaný výkon	105 kW	160 kW	160 kW
Průměr kola	1,56 m	2,25 m	2,25 m
Provozní otáčky	72 min^{-1}	$41,8 \text{ min}^{-1}$	$41,8 \text{ min}^{-1}$

Regulace hltnosti turbín je automatická, jejich provoz je možný až do rozdílu hladin 1 m. Savky turbín jsou zakončeny štetovou stěnou na kótě 245,10 m n. m. Dno pod štetovou stěnou je v délce 7 m zpevněno kamenným záhozem a betonovou deskou. Savky lze provizorně zahradit pomocí hradidel (u turbín 2 a 3 štetovnice Larzen upravená na délku 3,5 m). Generátory s horizontální osou jsou instalovány v prostorné strojovně o půdorysném rozměru 10 x 22,5 m. Kóta podlahy strojovny je na kótě 250,90 m n. m. K vybavení strojovny patří motorový jeřáb o nosnosti 2 x 5 tun.



Obr. 6 Přehledná situace

3.4 Historie vodní elektrárny (9)

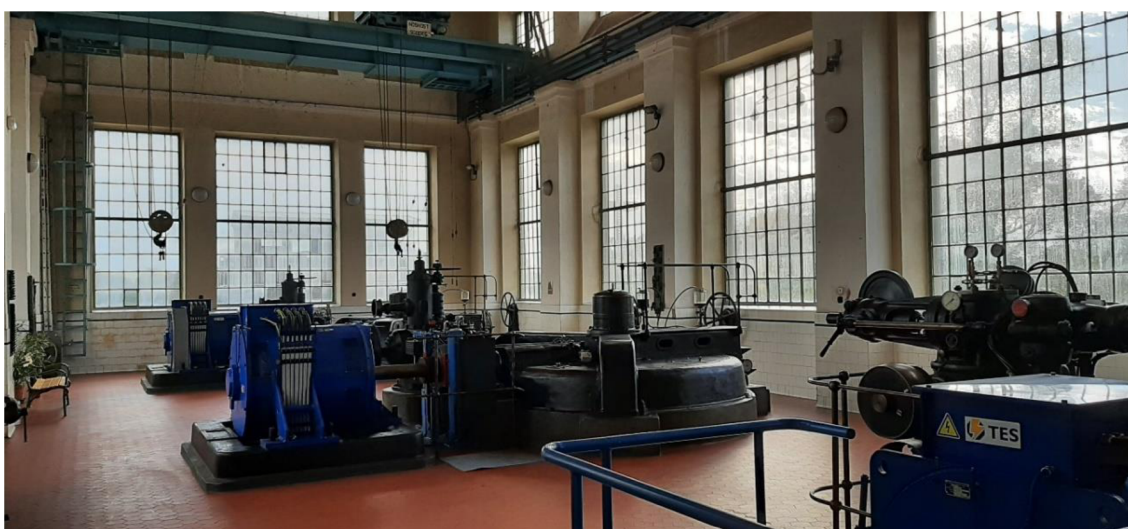
Stavba vodního díla započala v roce 1922, přičemž byla rozdělena do dvou etap. První etapa probíhající v letech 1922-1923 spočívala ve stavbě jezu, který se skládal ze tří částí: válcové konstrukce, vorové propusti a šterkové výpusti. Druhou etapu probíhající v letech 1923-1925 pak představovala stavba vlastní elektrárny. Samotná MVE je přitom v provozu od roku 1925, kdy v červenci toho roku bylo uvedeno do provozu turbosoustrojí č. 1, v srpnu pak turbosoustrojí č. 2 a č. 3. Od této doby je MVE až na relativně krátké přestávky stále v provozu. Do roku 1997 byla provozována Elektrárenským svazem v Hradci Králové, posléze společností VČE. V první vlně kupónové privatizace elektrárnu zakoupil pan Jiří Strnadel z Prahy. V únoru 2005 se vlastníkem stal Ing. Jiří Čáp z Hradce Králové, který elektrárnu vlastní dodnes.

Výroba elektrické energie probíhá přímo v budově vodní elektrárny, kde vodou poháněné tři Francisovy turbíny pracují do výše instalovaného výkonu 400kW/hod. Turbíny využívají energii vody přenášenou přes jednostupňové převodovky s Citroenovým šípovým ozubením do generátorů, které jsou konstruovány jako asynchronní stroje. Generovaný výkon je odebrán ze satorových vinutí generátorů. Generátory byly původně vinuty na napětí 5250 V, se změnou energetické soustavy však došlo k jejich převinutí na napětí 6000 V, se kterým pracují dodnes. Vyrobena energie je přenášena do přilehlé trafostanice, kde se transformuje na napětí 35 kV. Na náklady pana Jiřího Strnadela byly v rozvaděči 35 kV instalovány napěťové a proudové měniče dle požadavků VČE, k nimž byly poté připojeny rovněž obvody předepsaných ochranných a následně i nové měření výroby a dodávky elektrické energie. Uvedeným postupem tak došlo ke splnění požadavků VČE, aby byla možná elektrárnu provozovat dle platných norem.

Turbíny a převodová soukolí jsou původní, jejich výrobcem je firma Breitfeld-Daněk z Blanska. Jedná se o jednostupňové převodovky se šípovým ozubením. Vstupní hřídele spojující převodovky s turbínami jsou vertikální, výstupní pak horizontální. Mazání probíhá pomocí mazacích píšťal, které přistříkují mazivo před pastorek. Nanášení maziva na kompozice je realizováno prostřednictvím litinových, popř. bronzových kroužků. Turbosoustrojí č. 2 bylo z důvodu vysoké hlučnosti převodovky od roku 1988 mimo provoz. Za tímto účelem byla v roce 2001 společností Škoda Ozubená kola s.r.o. provedena oprava, po jejíž realizaci došlo ke snížení hlučnosti a soustrojí tak bylo možno s určitými omezeními provozovat. Od roku 2021 se turbosoustrojí č. 2 neuvádí do provozu, neboť opět nastaly problémy s vibracemi a s tím související hlučností. Na odstranění tohoto problému však současný majitel Ing. Jiří Čáp aktuálně pracuje.



Obr. 7 Pohled na strojovnu



Obr. 8 Pohled na turbosoustrojí č. 2



Obr. 9 Kryt převodovky a regulátor otáček



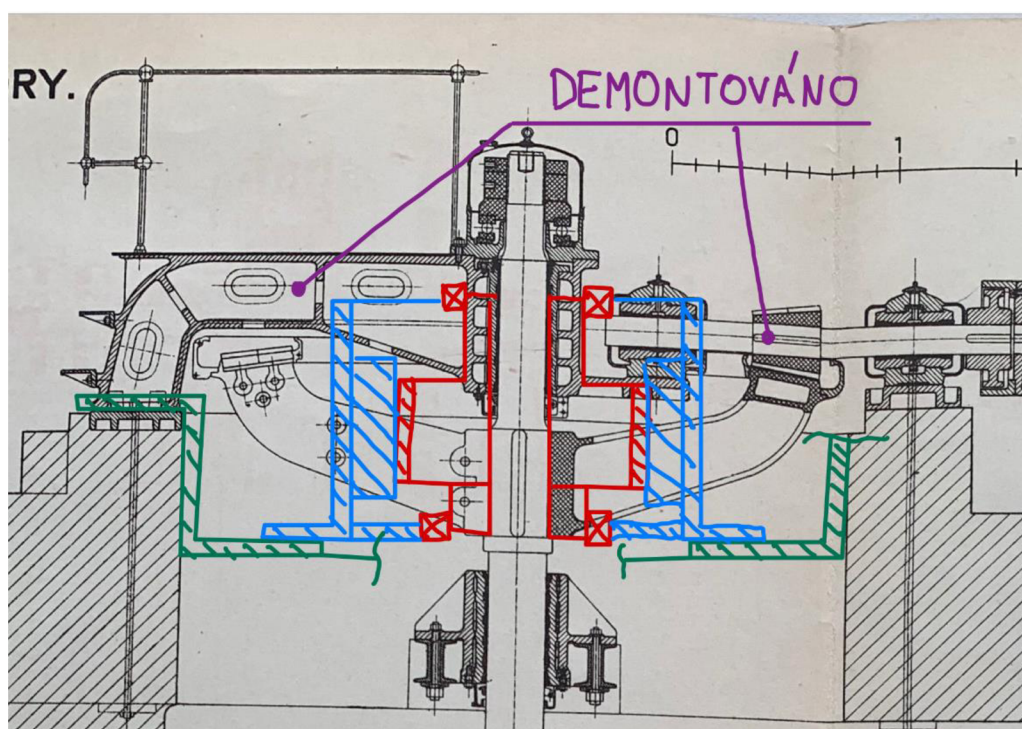
Obr. 10 Detail převodového soukoli



Obr. 11 Pohled na turbínu s rozváděcím kruhem

4.2 Budoucí rekonstrukce

Z důvodu poškození převodu na turbíně č. 2 (uprostřed) je naplánována rekonstrukce právě na tomto stroji. Rekonstrukce spočívá v odstranění převodového soukolí a nasazení synchronního generátoru na vertikální hřídel vodní turbíny. Konstrukce bude doplněna o měnič frekvence. Vyvedený elektrický výkon bude upravován měničem na frekvenci sítě 50 Hz. Měnič umožní změnu provozních otáček turbíny za provozu stroje tak, aby byla dosažena maximální účinnost turbíny. Ke správnému nastavení frekvenčního měniče je třeba znát univerzální charakteristiku stroje. Ta se vlivem stáří elektrárny nedochovala. Cílem této práce je nalezení univerzální charakteristiky větší turbíny ($D=2,25$ m) pomocí dostupných dat.



Obr. 14 Schéma zamýšlené rekonstrukce

4.3 Nalezení charakteristiky $Q_{11}-n_{11}$

K nalezení charakteristiky byly využity majitelem naměřené provozní body MVE. Spád i výkon je zjištěn přímo na MVE. Výkon je měřen na svorkách generátoru. Dále jsou v datech uvedeny hodnoty průtoku řekou, které jsou získány z hydrologické stanice. Ze získaných dat se většina bodů nehodila, neboť bylo v provozu více turbín. Z tohoto důvodu nelze jednoznačně určit průtok vody jednotlivými turbínami. Pro výpočet jsou relevantní ta měření, kdy byla v provozu pouze jedna turbína, a průtok turbínou je v dalších výpočtech uvažován stejný jako průtok vody řekou. Dále byly k dispozici hodnoty z hydrotechnického výzkumu, provedeného v roce 1956. Z celkového množství dat bylo pro další výpočty vybráno šest bodů. Ke zpracování charakteristiky turbíny je třeba vypočítat hodnoty jednotkového průtoku Q_{11} , jednotkové otáčky n_{11} a zjistit účinnost turbíny v daném provozním bodě. Ukázka výpočtu pro bod naměřený 30.11.2021:

Tab. 3 Naměřený provozní bod 30.11.2021

Q [m ³ /s]	H [H]	P [kW]
10	3,1	210

Turbína má průměr $D=2,25$ m a je provozována při konstantních otáčkách $n = 41,8 \text{ min}^{-1}$, z toho byly vypočítány jednotkové otáčky n_{11} :

$$n_{11} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{H}} = \frac{41,8 \cdot 2,25}{\sqrt{3,1}} = 53,41 \quad (4.1)$$

Dále bylo vypočteno Q_{11} :

$$Q_{11} = \frac{Q}{(D^2 \cdot \sqrt{H})} = \frac{10}{(2,25^2 \cdot \sqrt{3,1})} = 1,12 \quad (4.2)$$

Ze znalosti průtoku Q , spádu H byl vypočten celkový teoretický hydraulický výkon. Hodnota konstant:

$$g = 9,81 \text{ m}^2/\text{s} \\ \rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$P_{th} = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q = 1000 \cdot 9,81 \cdot 3,1 \cdot 10 = 304,11 \text{ kW} \quad (4.3)$$

Účinnost soustrojí (turbína, převodové soukolí a generátor) byla vypočtena podělením výkonu naměřeného na svorkách generátoru výkonem teoretickým:

$$\eta_{celková} = \frac{P_{naměřený}}{P_{th}} \cdot 100 = 69 \% \quad (4.4)$$

K určení účinnosti turbíny bylo třeba znát účinnost převodu a účinnost generátoru. Z vypočtené účinnosti soustrojí byla vypočtena účinnost turbíny podle následujícího vztahu:

$$\eta_{celková} = \eta_{turbíny} \cdot \eta_{generátoru} \cdot \eta_{převodu} \quad (4.5)$$

Jako účinnost generátoru byla po konzultaci s majitelem MVE zvolena hodnota $\eta_{generátoru}=94 \%$, účinnost převodového soukolí byla kvůli poškození soukolí odhadnuta jako $\eta_{převodu}=95 \%$.

$$\eta_{turbíny} = \frac{\eta_{celková}}{\eta_{generátoru} \cdot \eta_{převodu}} = \frac{0,69}{0,94 \cdot 0,95} \cdot 100 = 77,3 \% \quad (4.6)$$

Takto proběhl výpočet pro všechny naměřené body (Tab. 4).

Tab. 4 Body vhodné k sestrojení charakteristiky Q_{11} - n_{11}

č.	Datum měření	Q [m ³ /s]	H [H]	P [kW]	Př [kW]	η [%]	Q ₁₁ [-]	n ₁₁ [-]
1	HV – 1956	9,19	2,59	160	232,55	77,00	1,12	58,42
2	HV – 1956	11,54	2,44	188	276,06	76,30	1,46	60,22
3	8.12.2021	6,50	3,40	120	216,80	62,00	0,69	51,00
4	30.11.2021	10,00	3,10	210	304,11	77,30	1,12	53,41
5	04.08.2021	11,00	2,93	224	316,17	79,30	1,27	54,94
6	HV - 1956	8,55	2,64	141	221,00	71,40	1,04	57,91

4.3.1 Srovnání s existujícími charakteristikami

Prvním možným řešením byla podobnost s již existujícími charakteristikami Francisových turbín. Z vlastnictví vedoucího práce doc. Ing. Miloslava Haluzi CSc. byly pro porovnání naměřených bodů vybrány dvě charakteristiky. Převedení papírové charakteristiky do podoby digitální zajistilo lepší viditelnost porovnání (pomocí programu PlotDigitizer). Do programu byla vložena fotka charakteristiky, následně nastavené osy a jejich měřítka, postupně pak byly označeny pomocí bodů křivky stejné účinnosti. Pro charakteristiku F32 bylo odečteno kolem 400 bodů, pro charakteristiku F42 přes 700. Následně byly tyto body vykresleny v programu Excel. K porovnání je třeba naměřené body turbíny správně vložit do charakteristiky. Posun bodů byl určen jako rozdíl Q_{11} a n_{11} optima zkoumané turbíny a optima charakteristiky. Posuv ve směru x:

$$\Delta n_{11} = n_{11char} - n_{11turb} \quad (4.7)$$

Posuv ve směru y:

$$\Delta Q_{11} = Q_{11char} - Q_{11turb} \quad (4.8)$$

Vypočtené difference byly následně připočteny k hodnotám Q_{11} a n_{11} naměřených bodů.

$$n'_{11} = n_{11} + \Delta n_{11} \quad (4.9)$$

$$Q'_{11} = Q_{11} + \Delta Q_{11} \quad (4.10)$$

Tab. 5 Optimum zkoumané turbíny

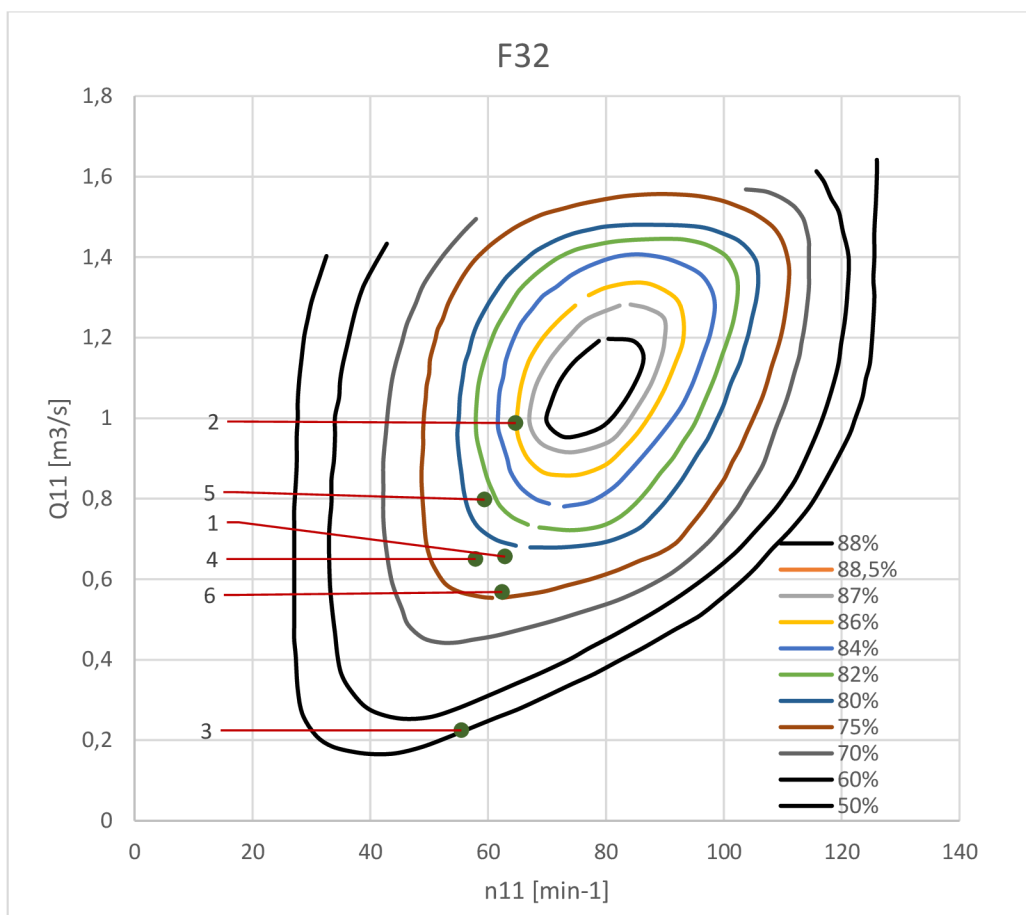
Q [m ³ /s]	H [H]	Q ₁₁ [-]	n ₁₁ [-]
10	1,6	1,56	74,35

Srovnání s charakteristikou F32:

Podle výše uvedeného postupu byl vypočten posun bodů (tab. 6). Následně byly body vykresleny do charakteristiky (graf 6).

Tab. 6 Posun bodů F32

	Turbína	F32	Δ
n_{11}	74,35	78,8	4,45
Q_{11}	1,56	1,09	-0,47



Graf 6 Charakteristika F32 s vyznačenými naměřenými body

Z grafu byly odečteny rozdíly účinností naměřených a účinností charakteristiky (Tab. 7). Víme že body 1, 2 a 4 pracují při podobné účinnosti 77 % (Tab. 4). Rozdíl účinností je u bodu 2 jiný než u zbývajících dvou, z toho bylo usouzeno, že křivky stejné účinnosti mají jiné zakřivení než křivky naměřené v charakteristice F32.

Tab. 7 Rozdíl účinností

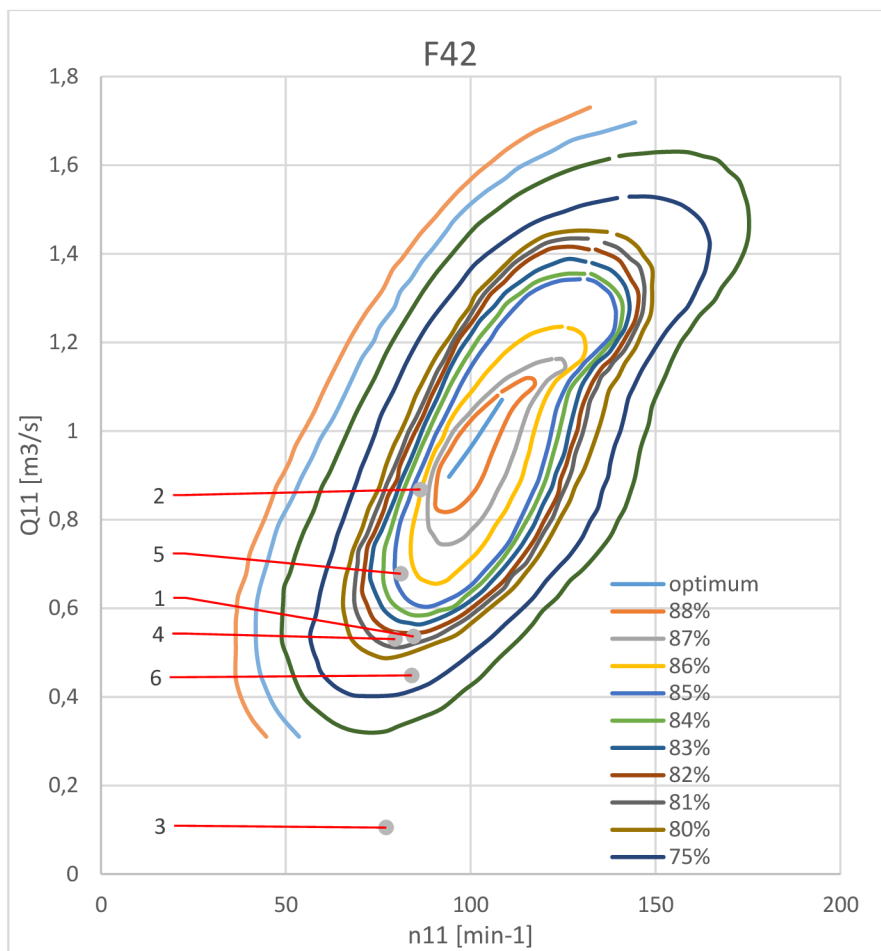
č.	Datum měření	$\Delta \eta$ [%]
1	HV	0
2	HV	10
3	8.12.2021	12
4	30.11.2021	0
5	04.08.2021	3
6	HV	4

Srovnání s charakteristikou F42:

Stejný postup byl proveden s charakteristikou F42:

Tab. 8 Posun bodů F42

	Turbína	F42	Δ
n_{11}	74,35	100,50	26,15
Q_{11}	1,56	0,97	-0,59



Graf 7 Charakteristika F42 s vyznačenými naměřenými body

Tab. 9 Rozdíl účinností

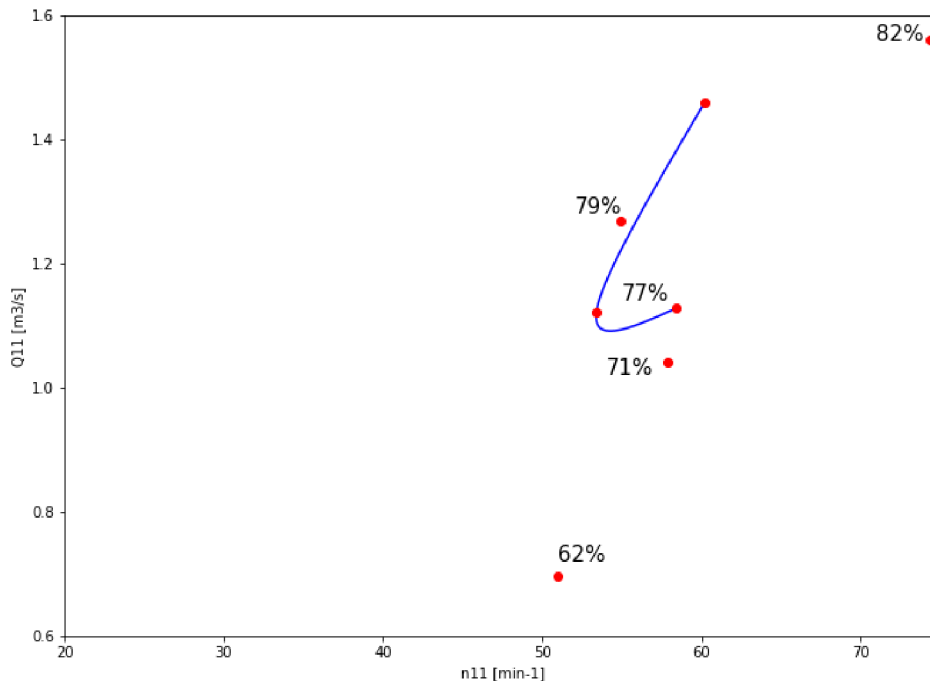
č.	Datum měření	$\Delta \eta$ [%]
1	HV	3
2	HV	10
3	8.12.2021	x
4	30.11.2021	4
5	04.08.2021	6
6	HV	6

Stejně jako v případě porovnání s charakteristikou F32 byly sledovány body 1,2 a 4 se stejnou naměřenou účinností. Vzhledem k různým hodnotám rozdílu účinností bylo i v tomto případě rozhodnuto, že se charakteristika F42 neshoduje s charakteristikou zkoumané turbíny.

4.3.2 Vytvoření nové charakteristiky

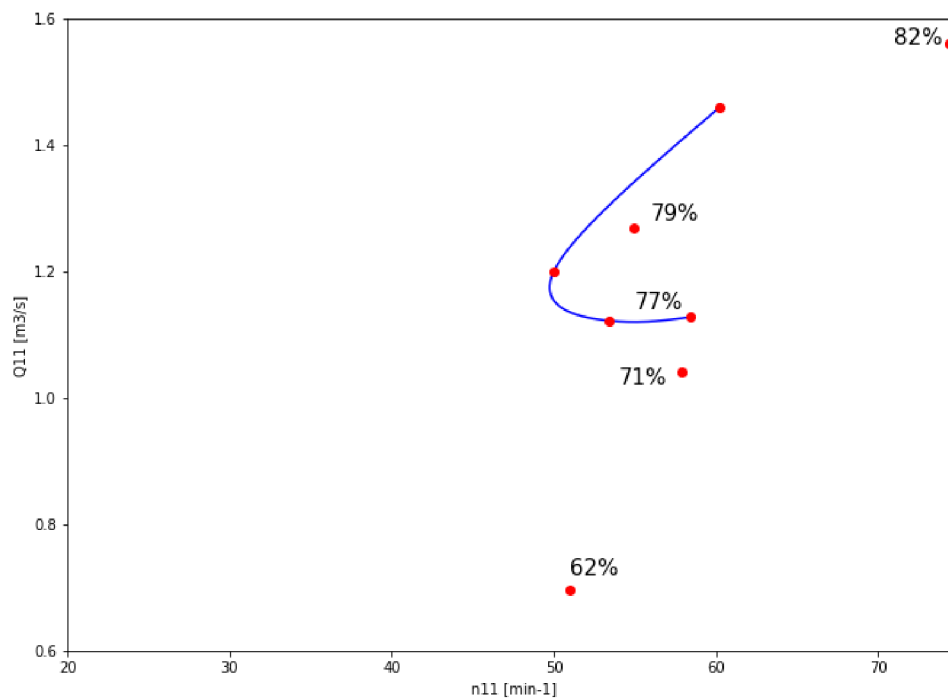
K vytvoření vlastní charakteristiky Q_{11} - n_{11} byly využity body č. 1, 2 a 4 kvůli jejich podobné účinnosti tj. 77 %. K dosažení hladkému spojení bodů byla využita interpolace za pomoci Bézierových křivek. Program byl psán v programovacím jazyce Python.

V grafu 8 jsou vykreslené naměřené body s dopsanými účinnostmi. Body o účinnosti 77 % byly spojeny pomocí Bézierovy křivky. Z grafu je patrné, že křivka stejné účinnosti nemá správné zakřivení, jelikož bod o účinnost 79 % se nachází dále od optima než tato křivka.



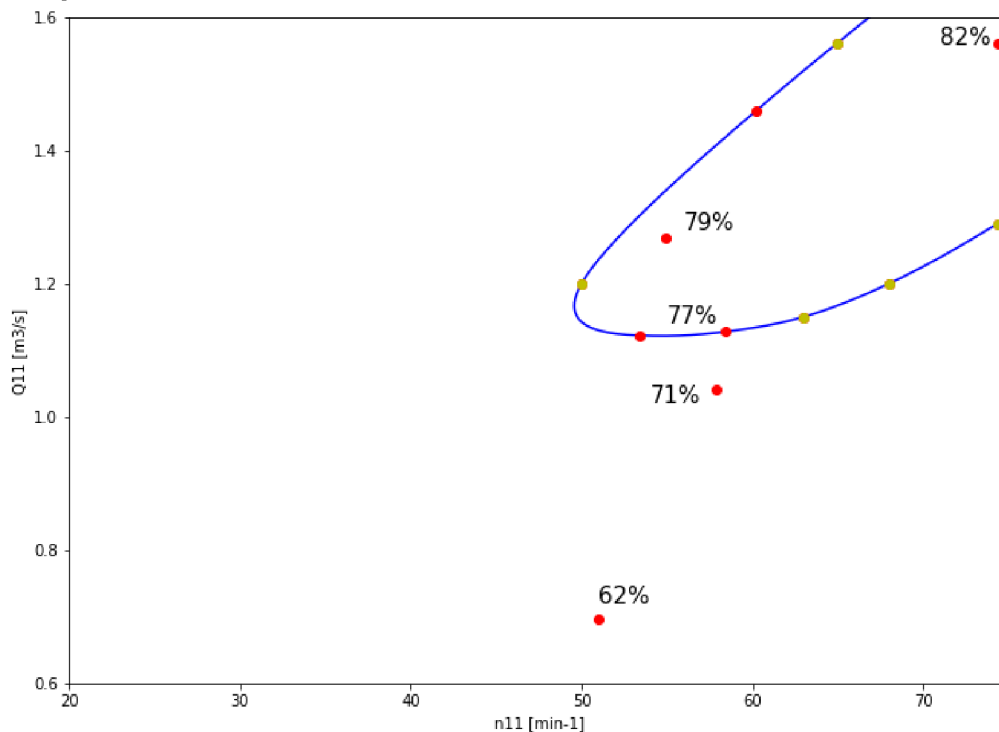
Graf 8 Vykreslení naměřených bodů

Z toho důvodu byl ke křivce o účinnosti přidán bod tak, aby zakřivení křivky splňovalo podmínku, že účinnost se směrem k optimu turbíny zvyšuje (Graf 9).



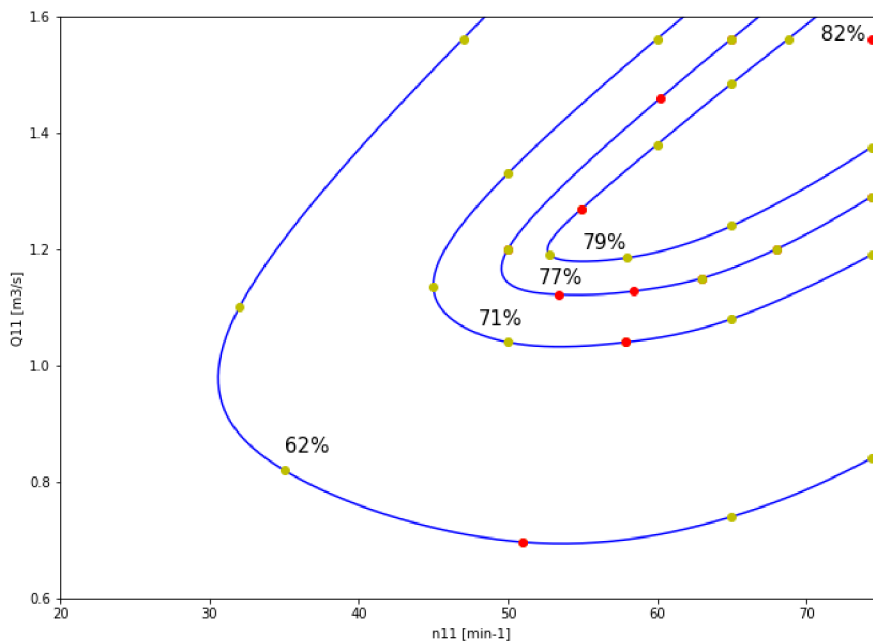
Graf 9 Přidání bodu

Tento odhadnutý trend zakřivení byl doplněn dalšími body tak, aby byla křivka stejné účinnosti protažena až k optimu turbíny. V grafu 10 jsou žlutě vyznačené body doplněné a červeně body naměřené.



Graf 10 Doplnění celé křivky

Posledním krokem bylo dotvoření křivek stejných účinností pro ostatní naměřené body se snahou zachovat objevený trend zakřivení.

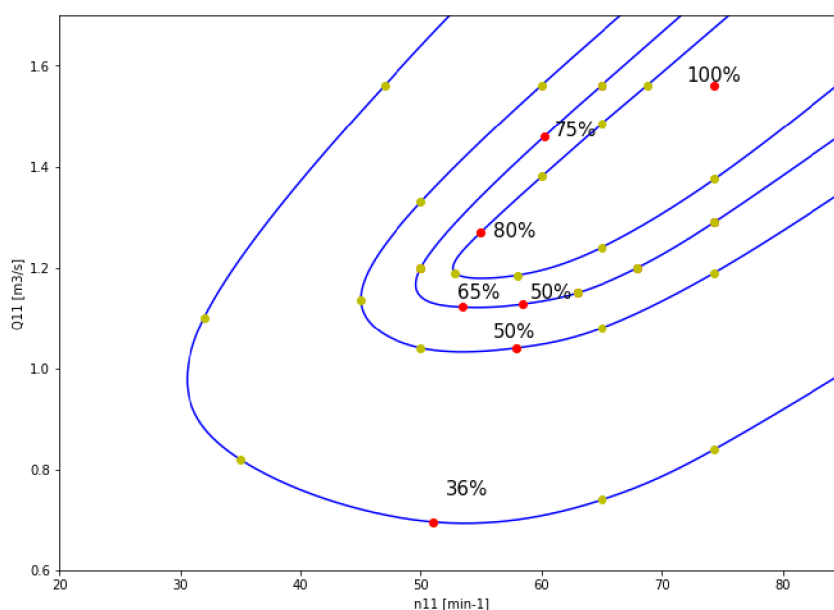


Graf 11 Dokončená charakteristika

Lze vidět, že charakteristika je silně zakřivená, to je dáno jednak velkou rychloběžností turbíny a také oproti charakteristikám nám známým F32, F42 (které byly měřené se spirálou) je tato turbína uložena v betonové kašně.

4.3.3 Odhadnutí křivek otevření RK

Z literatury je známo, že u rychloběžných FT má křivka otevření rozvaděče stoupající charakter. Brzdových zkoušky provedené v roce 1926 dokazují, že optimum turbíny bylo měřeno pro maximální otevření rozvaděče tj. 100 %. K měřeným bodům byly dopsány procenta otevření RK (graf 12). Vlivem malého počtu bodů nelze jednoznačně určit sklon křivek konstantního otevření rozvaděče. Proto bylo od tohoto cíle nakonec upuštěno.



Graf 12 Charakteristika s dopsanými hodnotami otevření rozvaděče.

4.3.4 Vykreslení provozní oblasti

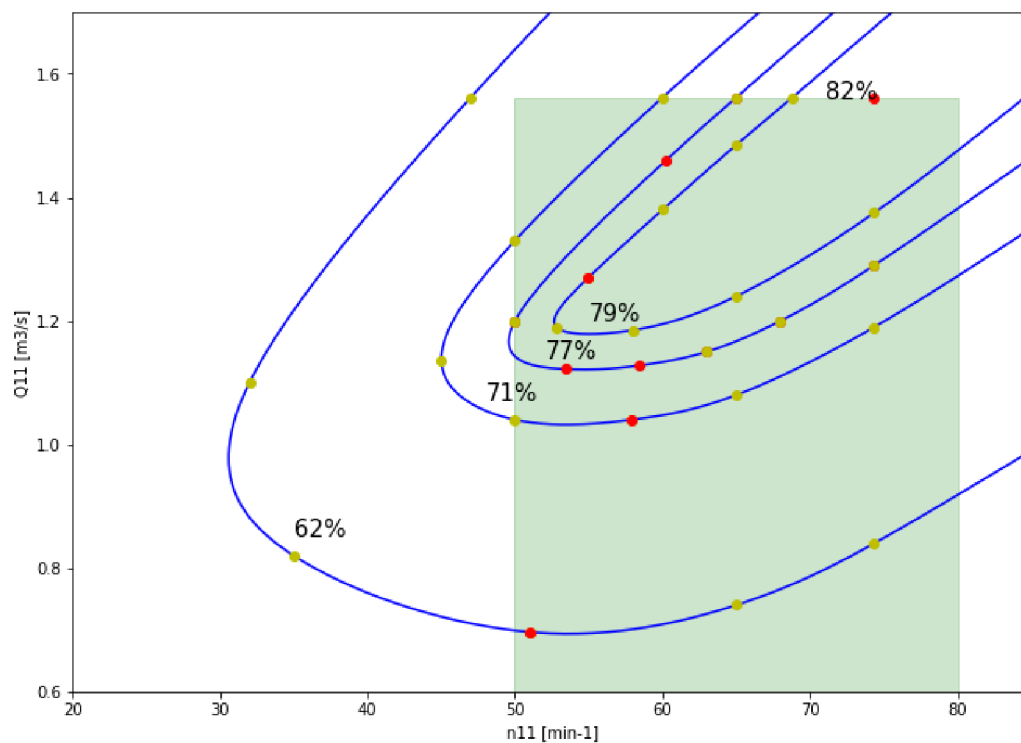
Oblast provozu turbíny je zleva omezena maximálním provozním spádem $H = 3,4$ m. Zprava je omezena minimálním spádem $H = 1,4$ m. Kvůli neznalosti křivky maximálního otevření rozvaděč není zcela správně omezena shora, jedná se pouze o odhad.

Výpočet omezení zleva:

$$n_{11} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{H}} = \frac{41,8 \cdot 2,25}{\sqrt{3,4}} = 51 \quad (4.11)$$

Výpočet omezení zprava:

$$n_{11} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{H}} = \frac{41,8 \cdot 2,25}{\sqrt{1,4}} = 79,5 \quad (4.12)$$



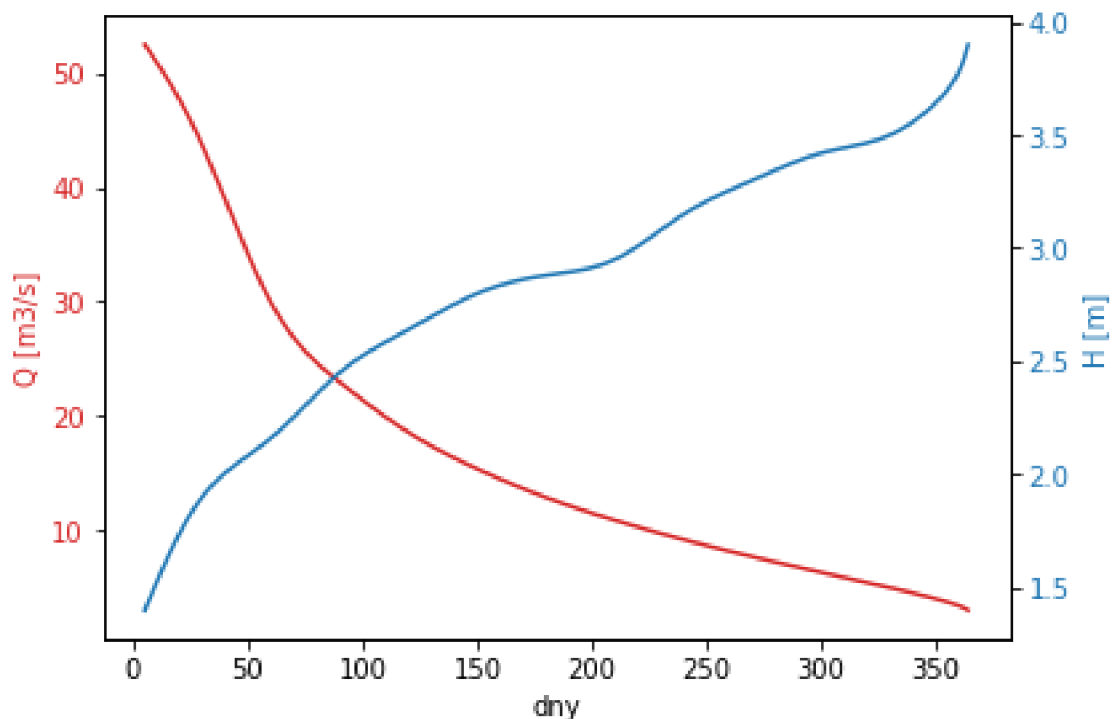
Graf 13 Vykreslení provozní oblasti

5 Roční výroba energie

K výpočtu roční výroby energie byla využita naměřená data o průměrném ročním překročení průtoku hydrologickou stanicí Týniště nad Orlicí. Křivka trvání spádu byla určena z dat měřených majitelem MVE v průběhu několika let. Tyto data (Tab. č.10) jsou zobrazeny v přehledném grafu 14.

Tab. 10 Naměřené hodnoty Q a H po dobu M - dní

M - dní	5	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
Q [$m^3 \cdot s^{-1}$]	52,5	43,7	29,9	22,9	18,5	15,3	12,8	10,8	9,1	7,6	6,23	4,9	3,64	2,93
H [m]	1,4	1,9	2,16	2,45	2,64	2,8	2,88	2,95	3,15	3,3	3,42	3,5	3,7	3,9



Graf 14 Křivka trvání spádu a průtoku

Jelikož MVE disponuje třemi turbínami, bylo vypočítáno celkově 5 variant možností provozu a to:

č.	Typ turbín v provozu
1. Varianta	1x velká turbína $D = 2,25$ m
2. Varianta	2x velká turbína $D = 2,25$ m
3. Varianta	1x malá turbína $D = 1,56$ m
4. Varianta	1x velká turbína + 1x malá turbína
5. Varianta	2x velká turbína + 1x malá turbína

5.1 Výpočet varianty č. 1

Jelikož známe průměr turbíny D , provozní otáčky turbíny n a hodnotu spádu H , můžeme pro jednotlivé dny vypočítat dané jednotkové otáčky n_{11} . Příklad výpočtu pro spád $H = 1,9$ m:

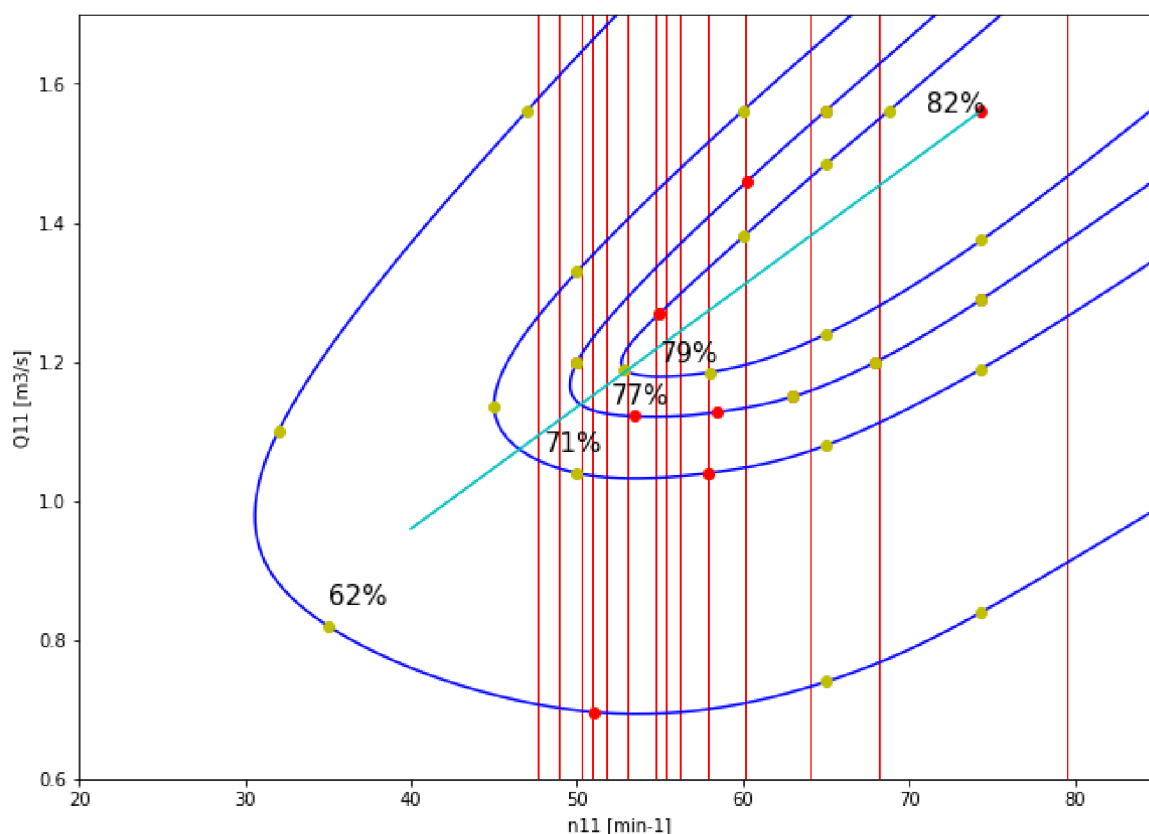
$$n_{11} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{H}} = \frac{41,8 \cdot 2,25}{\sqrt{1,9}} = 68,23 \quad (5.1)$$

Takto proběhl výpočet hodnot n_{11} pro všechny hodnoty spádu H (tabulka č. 11).

Tab. 11 Hodnota n_{11} pro dané spády H

H [m]	1,4	1,9	2,16	2,45	2,64	2,8	2,88	2,95	3,15	3,3	3,42	3,5	3,7	3,9
n_{11} [-]	79,49	68,23	63,99	60,09	57,88	56,21	55,42	54,76	52,99	51,77	50,86	50,27	48,89	47,62

Následně byly do grafu charakteristiky turbíny vyneseny čáry konstantních n_{11} pro daný spád H a čára provozu tak, aby bylo dosaženo největší účinnosti (Graf 15).



Graf 15 Charakteristika s vnesenými čarami konstantních n_{11}

Pomocí průsečíků těchto křivek byly odečteny hodnoty účinnosti η a hodnoty jednotkového průtoku Q_{11} . Z hodnot Q_{11} byl za pomoci upravené rovnice pro jednotkový průtok (5.2) vypočítán skutečný průtok turbínou Q , ukázka pro $H = 1,9$ m:

$$Q = Q_{11} \cdot D^2 \cdot \sqrt{H} = 1,45 \cdot 2,25^2 \cdot \sqrt{1,9} = 10,12 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1} \quad (5.2)$$

Ze znalosti spádu H , průtoku turbínou Q a účinnosti turbíny η můžeme určit výkon na hřídeli:

$$P = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \cdot \eta = 1000 \cdot 9,81 \cdot 1,9 \cdot 10,11 \cdot 0,8 = 152,76 \text{ kW} \quad (5.3)$$

Následně můžeme určit získaný elektrický výkon:

$$P_{el} = P \cdot \eta_{\text{převodu}} \cdot \eta_{\text{genu}} = 150,75 \cdot 0,95 \cdot 0,94 = 136,42 \text{ kW} \quad (5.4)$$

Pro spád $H < 1,6$ m byl brán $Q_{11}=1,56 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, kvůli odhadovanému maximálnímu otevření rozvaděče. Tato hodnota může být i větší, ale protože tak malý spád se vyskytuje pouze malou část roku můžeme tuhle chybu zanedbat. Z hydrologických dat víme, že pro spád $H > 2,95$ m hodnota průtoku řeky $Q_{\text{řeky}}$ nedosahuje potřebné hodnoty průtoku turbínou Q pro dosažení maximální hodnoty účinnosti η . Pro tyto případy byl brán průtok turbínou Q se rovná průtoku řekou $Q_{\text{řeky}}$ (5.5). Následně byla vypočtena hodnota Q_{11} pro daný průtok, vynesena do grafu charakteristiky pro dané n_{11} a odečtena hodnota účinnosti η .

$$Q_{\text{turb}} = Q_{\text{řeky}} \quad (5.5)$$

$$Q_{11} = \frac{Q_{\text{řeky}}}{(D^2 \cdot \sqrt{H})} = \frac{9,1}{(2,25^2 \cdot \sqrt{3,15})} = 1,01 \quad (5.6)$$

Pro hodnoty spádu $H \geq 3,5$ m nebyl výpočet proveden kvůli nízké účinnosti turbíny. Celkové hodnoty výpočtu jsou uvedeny v tabulce č. 16.

5.2 Varianta č. 2

Druhá varianta je počítána pro 2 velké turbíny v provozu. Výpočet probíhal stejně jako v případě varianty č. 1. Do spádu $H \leq 2,45$ m je v řece dostatek vody, abychom dosáhli maximální účinnosti charakteristiky pro konstantní n_{11} , stejně jako v případě pro provoz pouze jedné turbíny. Pro spády $H > 2,45$ m byl průtok turbínou počítán jako:

$$Q_{\text{turbíny}} = \frac{Q_{\text{řeky}}}{2} \quad (5.7)$$

Celkový vyrobený výkon byl počítán jako dvojnásobek vyrobeného výkonu jednou turbínou:

$$P_{\text{celkový}} = 2 \cdot P_{\text{turb}} \quad (5.8)$$

Od spádu $H > 2,95$ m výpočet nebyl proveden kvůli nízké účinnosti a také kvůli nižšímu zužitkovanému výkonu ve srovnání s variantou č. 1. Celkové hodnoty výpočtu jsou uvedeny v tabulce č. 17.

5.3 Varianta č. 3

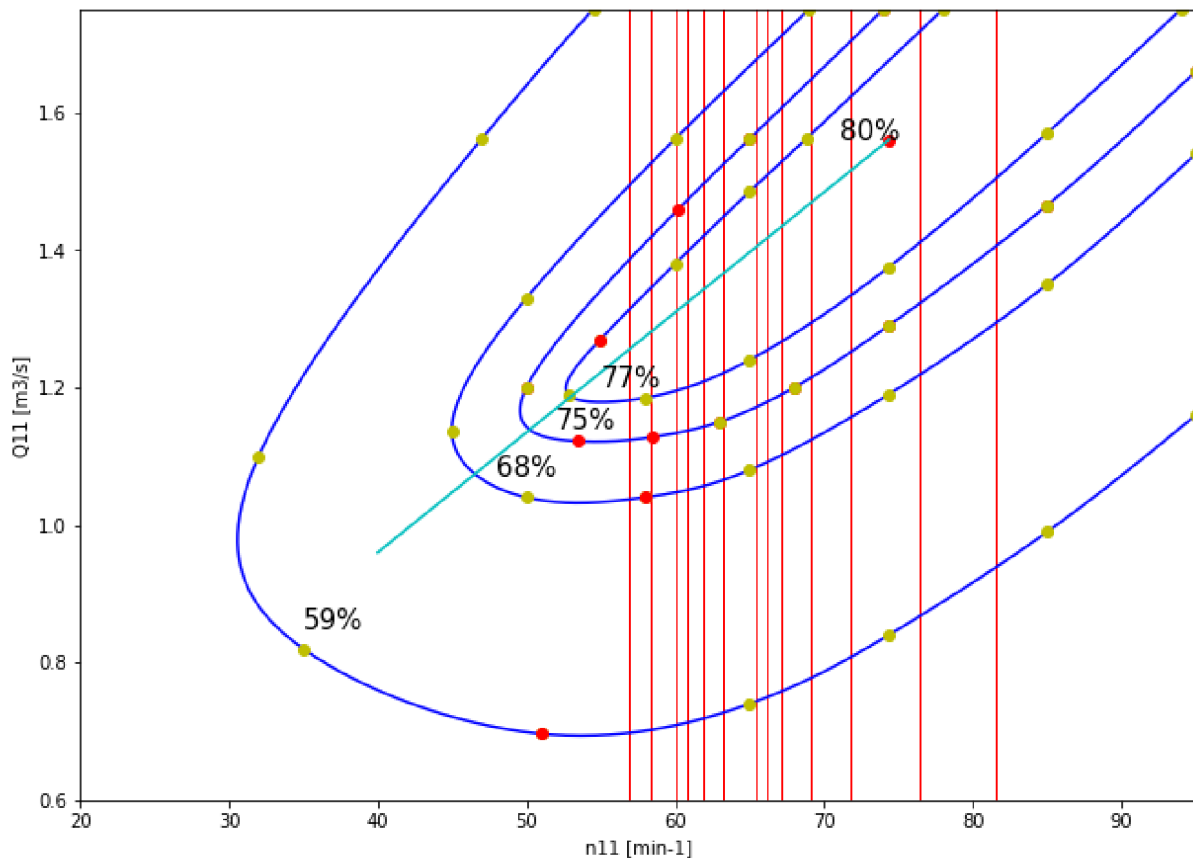
Třetí varianta je počítána pro provoz pouze malé turbíny. Tato turbína je modelově podobná jako turbína větší, proto byla použita stejná charakteristika s přepočtem účinnosti pomocí Moodyho vztahu:

$\eta_{\text{velké turbíny}} [\%]$	$\eta_{\text{malé turbíny}} [\%]$
79	77
77	75
71	68
62	59

Dále byly přepočteny čáry konstantních n_{11} z důvodu provozu menšího stroje při odlišných otáčkách.

Tab. 12 Vypočtené n_{11} pro spád H

H [m]	1,4	1,9	2,16	2,45	2,64	2,8	2,88	2,95	3,15	3,3	3,42	3,5	3,7	3,9
$n_{11} [\text{min}^{-1}]$	94,93	81,49	76,42	71,76	69,13	67,12	66,19	65,40	63,29	61,83	60,74	60,04	58,39	56,88



Graf 16 Charakteristika menší turbíny $D=1,56 \text{ m}$

Z teorie je známo, že provoz díla je při jiném Q_{11} než model. V této práci je jako model brána větší turbína, pro kterou byla zjištěna charakteristika. Charakteristika by se teda měla přepočítat podle následujících vztahů:

$$Q_{11_{malé}} = Q_{11_{velké}} \cdot \sqrt{\frac{\eta_{malé}}{\eta_{velké}}} \quad (5.9)$$

$$n_{11_{malé}} = n_{11_{velké}} \cdot \sqrt{\frac{\eta_{malé}}{\eta_{velké}}} \quad (5.10)$$

V tomto případě se tohoto přepočtu zanedbalo, jelikož:

$$\sqrt{\frac{\eta_{malé}}{\eta_{velké}}} = \sqrt{\frac{0,8}{0,82}} \cong 0,99 \quad (5.11)$$

5.4 Varianta č. 4

Tato varianta počítá s provozem velké a současně malé turbíny zároveň. Pro spád $H < 2,8$ m je v řece dostatek vody na to, aby se obě turbíny provozovaly v oblasti nejlepší účinnosti. Od spádu $H \geq 2,8$ m byl průtok řeky rozdělen mezi turbíny následovně:

Tab. 13 Rozdělení průtoku mezi malou a velkou turbínou

$Q_{řeky} [m^3 \cdot s^{-1}]$	$H [m]$	$Q_{malé} [m^3 \cdot s^{-1}]$	$Q_{velké} [m^3 \cdot s^{-1}]$
15,3	2,8	5,3	10
12,8	2,88	4,8	8
10,8	2,95	4,8	6

Celkový vyrobený výkon byl počítán jako součet vyrobeného výkonu velkou a malou turbínou:

$$P_{celkový} = P_{velké} + P_{malé} \quad (5.12)$$

Pro spády větší než 2,95 m body nebyly dopočítávány kvůli malému průtoku řekou.

5.5 Varianta č. 5

Poslední variantou je provoz všech tří turbín dohromady. Zde byly provedeny výpočty do spádu $H \leq 2,64$ m, přičemž pro spád $H > 2,16$ m není v řece dostatek vody pro všechny tři turbíny, aby mohly pracovat v oblasti nejvyšších účinností pro konstantní jednotkové otáčky. Průtok řeky byl mezi jednotlivé turbíny rozdělen následovně:

Tab. 14 Rozdělení průtoku mezi jednotlivé turbíny

$Q_{\text{řeky}} [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$H [\text{m}]$	$Q_{\text{malé}} [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$Q_{\text{velké}} [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
22,9	2,45	5,9	8,5
18,5	2,8	6	6,25

Celkový vyrobený výkon byl počítán jako součet vyrobeného výkonu 2x velkou a 1x malou turbínou:

$$P_{\text{celkový}} = 2 \cdot P_{\text{velké}} + P_{\text{malé}} \quad (5.13)$$

Pro spády větší než 2,64 m body nebyly dopočítávány kvůli menšímu vyrobenému výkonu než v případě se 2 velkými turbínami v provozu.

5.6 Tabulky s výpočty pro variantu 1 až 5

V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledky výpočtů popsaných v předešlé kapitole. Zeleně znázorněné výkony v jednotlivých tabulkách jsou největší možné hodnoty výkonu pro daný spád H a průtok řeky $Q_{řeky}$. Ve variantě číslo 4 a 5 jsou barevně odlišené výpočty pro malou a velkou turbínu (modře- malá, žlutě- velká). Oranžově jsou vyznačené části, pro které nebyl udělán výpočet.

Tab. 15 Varianta č. 1

M - dní	5	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
$Q_{řeky}$ [$m^3 \cdot s^{-1}$]	52,50	43,70	29,90	22,90	18,50	15,30	12,80	10,80	9,10	7,60	6,23	4,90	3,64	2,93
H [m]	1,40	1,90	2,16	2,45	2,64	2,80	2,88	2,95	3,15	3,30	3,42	3,50	3,70	3,90
n11 [-]	79,49	68,23	63,99	60,09	57,88	56,21	55,42	54,76	52,99	51,77	50,86			
Q11 [-]	1,56	1,45	1,35	1,28	1,25	1,23	1,22	1,21	1,01	0,83	0,67			
eta [-]	0,81	0,81	0,81	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,70	0,65	0,60			
Q [$m^3 \cdot s^{-1}$]	9,34	10,12	10,04	10,14	10,28	10,42	10,48	10,52	9,10	7,60	6,23			
P [kW]	103,95	152,76	172,40	195,02	213,03	228,96	236,90	243,58	196,84	159,92	125,41			
Pel [kW]	92,83	136,42	153,95	174,15	190,24	204,46	211,56	217,52	175,78	142,81	111,99			

Tab. 16 Varianta č. 2

M - dní	5	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
$Q_{řeky} [m^3 \cdot s^{-1}]$	52,50	43,70	29,90	22,90	18,50	15,30	12,80	10,80	9,10	7,60	6,23	4,90	3,64	2,93
H [m]	1,40	1,90	2,16	2,45	2,64	2,80	2,88	2,95	3,15	3,30	3,42	3,50	3,70	3,90
n11 [-]	79,49	68,23	63,99	60,09	57,88	56,21	55,42	54,76						
Q11 [-]	1,56	1,45	1,35	1,28	1,12	0,90	0,74	0,62						
eta [-]	0,81	0,81	0,81	0,80	0,77	0,66	0,63	0,60						
$Q [m^3 \cdot s^{-1}]$	9,34	10,12	10,04	10,14	9,25	7,65	6,40	5,40						
P [kW]	207,91	305,53	344,80	390,04	368,92	277,37	227,83	187,53						
Pel [kW]	185,66	272,83	307,90	348,31	329,45	247,69	203,45	167,46						

Tab. 17 Varianta č. 3

M - dní	5	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
$Q_{řeky} [m^3 \cdot s^{-1}]$	52,50	43,70	29,90	22,90	18,50	15,30	12,80	10,80	9,10	7,60	6,23	4,90	3,64	2,93
H [m]	1,40	1,90	2,16	2,45	2,64	2,80	2,88	2,95	3,15	3,30	3,42	3,50	3,70	3,90
n11 [-]	94,93	81,49	76,42	71,76	69,13	67,12	66,19	65,40	63,29	61,83	60,74	60,04	58,39	56,88
Q11 [-]	1,56	1,56	1,56	1,50	1,45	1,40	1,39	1,38	1,30	1,29	1,27	1,08	0,78	0,61
eta [-]	0,68	0,76	0,80	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78	0,77	0,67	0,62	0,55
$Q [m^3 \cdot s^{-1}]$	4,49	5,23	5,58	5,71	5,73	5,70	5,74	5,77	5,61	5,70	5,72	4,90	3,64	2,93
P [kW]	41,95	74,13	94,58	109,86	118,79	123,71	127,32	130,20	135,34	143,08	147,66	112,72	81,92	61,65
Pel [kW]	37,46	66,20	84,46	98,11	106,08	110,47	113,70	116,27	120,86	127,77	131,86	100,66	73,15	55,06

Tab. 18 Varianta č. 4

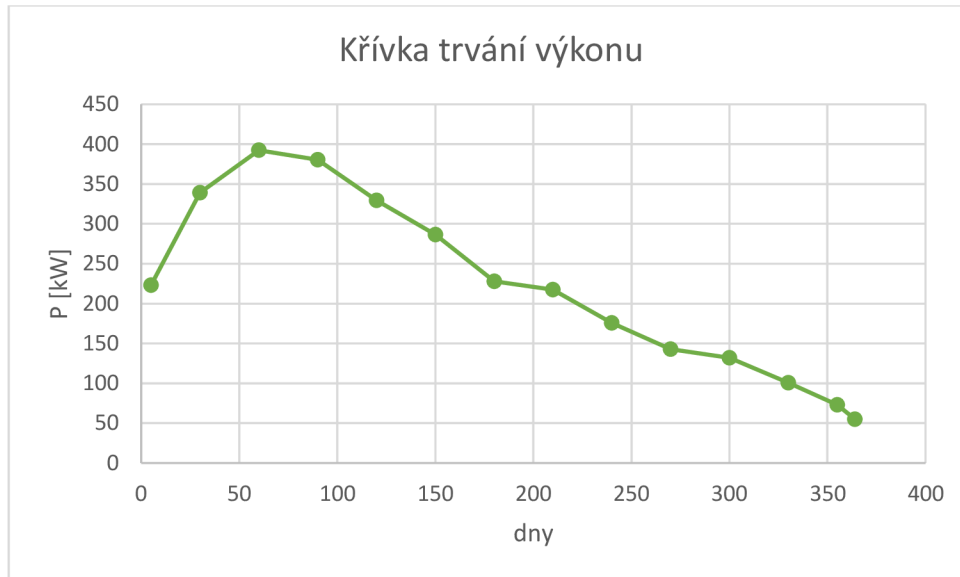
M - dní	5	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
Q _{řeky} [m ³ *s ⁻¹]	52,50	43,70	29,90	22,90	18,50	15,30	12,80	10,80	9,10	7,60	6,23	4,90	3,64	2,93
H [m]	1,40	1,90	2,16	2,45	2,64	2,80	2,88	2,95	3,15	3,30	3,42	3,50	3,70	3,90
n ₁₁ [-]	94,93	81,49	76,42	71,76	69,13	67,12	66,19	65,40						
Q ₁₁ [-]	1,56	1,56	1,56	1,50	1,45	1,30	1,16	1,15						
eta [-]	0,68	0,76	0,80	0,80	0,80	0,79	0,75	0,75						
Q [m ³ *s ⁻¹]	4,49	5,23	5,58	5,71	5,73	5,30	4,80	4,80						
n ₁₁ [-]	79,49	68,23	63,99	60,09	57,88	56,21	55,42	54,76						
Q ₁₁ [-]	1,56	1,45	1,35	1,28	1,25	1,18	0,93	0,69						
eta [-]	0,81	0,81	0,81	0,80	0,80	0,75	0,67	0,62						
Q [m ³ *s ⁻¹]	9,34	10,12	10,04	10,14	10,28	10,00	8,00	6,00						
P [kW]	145,90	226,89	266,98	304,88	331,82	321,02	253,15	211,84						
P _{el} [kW]	130,29	202,61	238,41	272,26	296,32	286,67	226,06	189,17						

Tab. 19 Varianta č.5

M - dní	5	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
Q _{řeky} [m ³ *s ⁻¹]	52,50	43,70	29,90	22,90	18,50	15,30	12,80	10,80	9,10	7,60	6,23	4,90	3,64	2,93
H [m]	1,40	1,90	2,16	2,45	2,64	2,80	2,88	2,95	3,15	3,30	3,42	3,50	3,70	3,90
n ₁₁ [-]	94,93	81,49	76,42	71,76	69,13									
Q ₁₁ [-]	1,56	1,56	1,56	1,29	1,52									
eta [-]	0,68	0,76	0,80	0,79	0,80									
Q [m ³ *s ⁻¹]	4,49	5,23	5,58	4,90	6,00									
n ₁₁ [-]	79,49	68,23	63,99	60,09	57,88									
Q ₁₁ [-]	1,56	1,45	1,35	1,14	0,76									
eta [-]	0,81	0,81	0,81	0,77	0,63									
Q [m ³ *s ⁻¹]	9,34	10,12	10,04	9,00	6,25									
P [kW]	249,86	379,65	439,38	426,16	328,26									
Pel [kW]	223,12	339,03	392,37	380,56	293,14									

5.7 Celková vyrobená energie

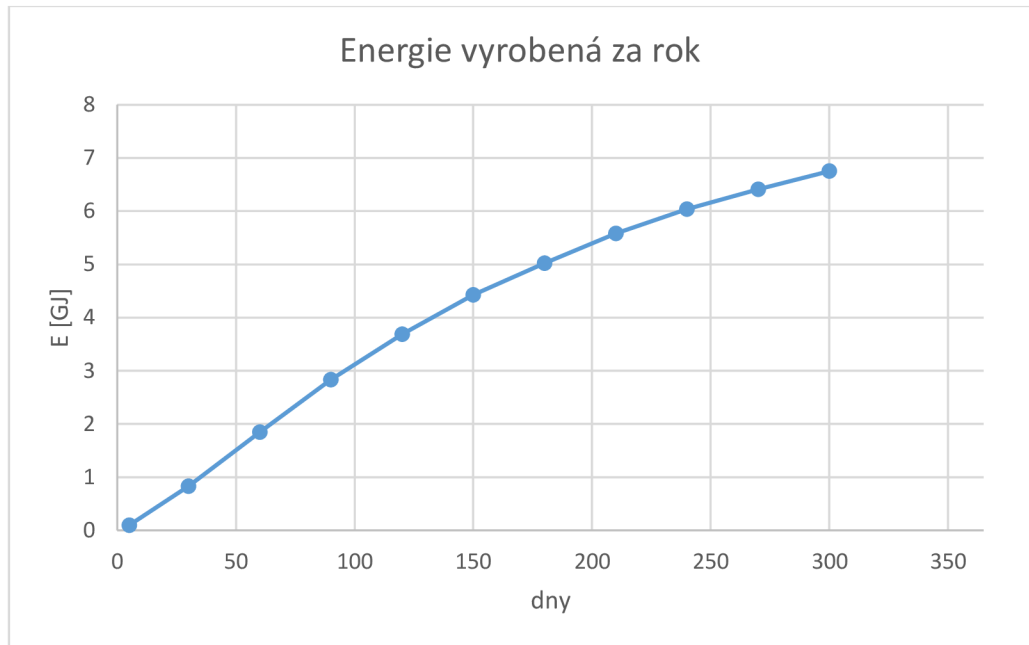
Ze všech vypočtených dat byly vybrány nejlepší varianty využití vodní energie pro dané stavy řeky v průběhu roku. Vyrobený výkon elektrárnou pro jednotlivá překročení průměrných denních hodnot průtoku a spádu je znázorněn v grafu 17.



Graf 17 Křivka trvání výkonů

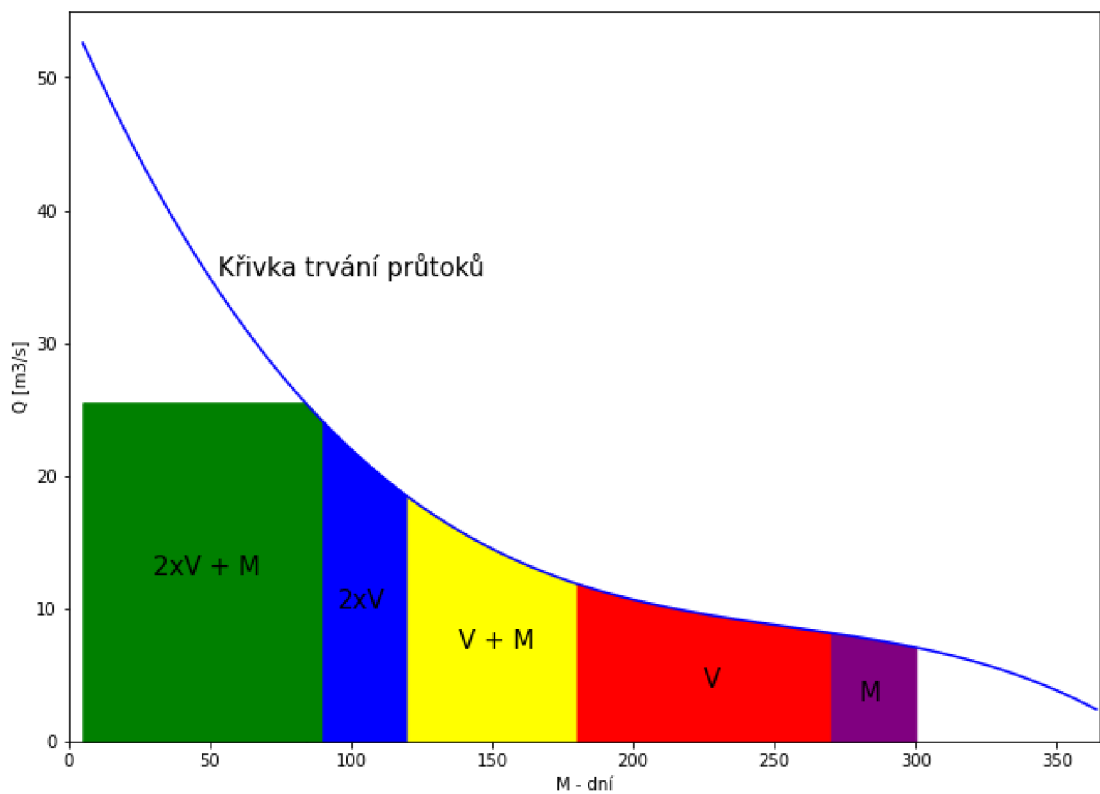
Plocha pod čarou překročení průměrných denních výkonů udává roční práci MVE za rok. Tato plocha lze vypočítat integrací po výkonové křivce. Integrací vyšla hodnota $E = 2 \text{ MWh}$. MVE je ovšem provozována pouze do spádu 3,4 m (tzn. doba provozu je zhruba 300 dní), jelikož při vyšším spádu protéká řekou nedostatečné množství vody. Výsledná vyrobená energie tedy je $E = 1,875 \text{ MWh}$, tj. 6,75 GJ.

$$E = \int_0^T P \cdot dt \quad (5.14)$$



Graf 18 Vyrobená energie za rok v GJ

V poslední řadě byl vytvořen graf 19, který znázorňuje nevýhodnější využití průtoku řeky jednotlivými variantami sepnutí turbíny k dosažení maximální možné výroby elektřiny.



Graf 19 Znáornění využití potenciálu elektrárnou s vyznačením provozu jednotlivých turbín

ZÁVĚR

Hlavním úkolem této práce bylo nalezené univerzální charakteristiky Francisovy turbíny instalované na MVE Albrechtice na Orlicích. V praxi je taková charakteristika měřena výrobcem pomocí modelové turbíny na zkušební trati. Z existujících materiálů víme, že charakteristika zkoumané turbíny byla v minulosti naměřena, bohužel se však nedochovala. Z hlediska finanční i časové náročnosti měření na díle bylo přistoupeno k pokusu vytvořit tuto charakteristiku pomocí dochovaných historických materiálů a majitelem naměřených bodů provozu elektrárny. Problémem těchto měření byla pouze znalost celkového průtoku řekou a nemožnost určení průtoku jednotlivými turbínami.

Prvním provedeným řešením bylo srovnání měřených bodů s existujícími charakteristikami Francisových turbín. Nicméně bylo zjištěno, že charakteristika naší zkoumané turbíny neodpovídá porovnávaným charakteristikám, proto bylo od tohoto řešení upuštěno. Důvodem mohlo být zejména to, že charakteristiky měřené na modelu byly uloženy ve spirále, avšak zkoumaná turbína je uložena v kašně, která hůře rozvádí vodu na turbínu.

Dalším řešením bylo vytvoření vlastní charakteristiky pomocí naměřených bodů. Využita byla měření tří bodů o podobné účinnosti, která udávala trend zakřivení čar konstantních účinností v charakteristice. Pro další naměřené hodnoty účinnosti byl tento trend zakřivení sledován a byly domodelovány další tři čáry konstantních účinností. Jedná se tedy pouze o odhad charakteristiky z šesti dostupných bodů. V budoucnu by tak bylo vhodné nadále s touto charakteristikou pracovat a doplňovat ji o další naměřené body a tím ji i přibližovat realitě.

V poslední kapitole byla vypočtena průměrná roční výroba elektřiny elektrárnou pro současný stav s využitím naší objevené charakteristiky turbíny. V budoucnu díky zamýšlené rekonstrukci přibude další stupeň regulace pomocí nastavení otáček turbíny a tím možnost provozu turbíny v oblastech lepších účinností.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- 1) Vodní elektrárny. In: *O energetice* [online]. -: -, 2016 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/vodni-elektrarny-princip-a-rozdeleni>
- 2) Charakteristika malých vodních elektráren. In: *Svět energie* [online]. -: -, - [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/vodni-elektrarny/mala-vodni-elektrarna/charakteristika-malych-vodnich-elektraren/vyklad>
- 3) HYDROENERGETICKÉ VYUŽITÍ VELMI MALÝCH SPÁDŮ V ZÁVISLOSTI NA EKONOMICKÉ EFEKTIVITĚ. In: *ČEZ* [online]. Praha: -, - [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <tps://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/soutez/hes.pdf>
- 4) ŠOB, František. *Hydromechanika*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-214-3578-0.
- 5) NECHLEBA, Miroslav. *Vodní turbíny, jejich konstrukce a příslušenství*. Druhé, rozšířené vydání. Praha: SNTL, 1962. ISBN .
- 6) BŘEZINA, Jan. *Vodní turbíny*. Druhé vydání. Praha: SNTL, 1963. ISBN -.
- 7) HABÁN, Vladimír. *Měření tekutinových mechanismů*. Brno, 2021. Přednášky. VUT.
- 8) *Manipulační řád pro vodní dílo Albrechtice na Orlici v ř. km 31,967*. In: . Hradec Králové: Povodí Labe, státní podnik, 2010, ročník 2010, č. 216/2011 Sb.
- 9) 80. výročí albrechtické vodní elektrárny. *Místní zpravodaj Albrechtice nad Orlicí* [online]. 2005, (3), 3 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.albrechtice-nad-orlici.cz/file.php?nid=591&oid=170943>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
Q	Průtok	$m^3 \cdot s^{-1}$
H	Spád	m
n	Otáčky	1/s
D	Průměr turbíny	m
ρ	Hustota	kg/m^3
g	Tíhové zrychlení	$m^3 \cdot s^{-1}$
M	Krouticí moment	N·m
ω	Úhlová rychlost	-
η	Účinnost	-
n_{11}	Jednotkové otáčky	-
Q_{11}	Jednotkový průtok	-
n_{ED}	Jednotkové otáčky	-
Q_{ED}	Jednotkový průtok	-
M_{ED}	Jednotkový moment	-
P_{ED}	Jednotkový výkon	-
P	Výkon	W
P_{th}	Teoretický výkon	W
P_{ef}	Efektivní výkon	W
P_{el}	Elektrický výkon	W
η_m	Účinnost modelu	-
η_d	Účinnost díla	-

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Oblast použití základních typů turbín (červeně vírová turbína)	14
Obr. 2 Tvar Francisova kola pro různé měrné otáčky	17
Obr. 3 Univerzální charakteristika Francisovy turbíny	18
Obr. 4 Schéma měřicí tratě.....	18
Obr. 5 Vodohospodářská mapa s vyznačením polohy MVE	21
Obr. 6 Přehledná situace	24
Obr. 7 Pohled na strojovnu	26
Obr. 8 Pohled na turbosoustrojí č. 2.....	26
Obr. 9 Kryt převodovky a regulátor otáček	27
Obr. 10 Detail převodového soukolí	27
Obr. 11 Pohled na turbínu s rozváděcím kruhem.....	27
Obr. 12 Podélný řez elektrárnou	28
Obr. 13 Příčný řez elektrárnou	28
Obr. 14 Schéma zamýšlené rekonstrukce	29

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Vykreslení naměřených bodů při různém otevření rozvaděče	19
Graf 2 Vykreslení účinností na n_{11}	20
Graf 3 Vykreslení křivky účinnosti 80 %	20
Graf 4 Grafické znázornění tab. 1	22
Graf 5 Grafické znázornění N-letých průtoků	22
Graf 6 Charakteristika F32 s vyznačenými naměřenými body	32
Graf 7 Charakteristika F42 s vyznačenými naměřenými body	33
Graf 8 Vykreslení naměřených bodů	34
Graf 9 Přidání bodu	35
Graf 10 Doplnění celé křivky	35
Graf 11 Dokončená charakteristika	36
Graf 12 Charakteristika s dopsanými hodnotami otevření rozvaděče	36
Graf 13 Vykreslení provozní oblasti	37
Graf 14 Křivka trvání spádu a průtoků	38
Graf 15 Charakteristika s vynesnými čarama konstantních n_{11}	39
Graf 16 Charakteristika menší turbíny $D=1,56$ m	41
Graf 17 Křivka trvání výkonů	48
Graf 18 Vyrobena energie za rok v GJ	49
Graf 19 Znázornění využití potenciálu elektrárnou s vyznačením provozu jednotlivých turbín	49

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Průměrné překročení průtoků po dobu M-dní	22
Tab. 2 Velké vody opakující se jednou za N-let	22
Tab. 3 Naměřený provozní bod 30.11.2021.....	30
Tab. 4 Body vhodné k sestrojení charakteristiky Q_{11} - n_{11}	31
Tab. 5 Optimum zkoumané turbíny	31
Tab. 6 Posun bodů F32	32
Tab. 7 Rozdíl účinností	32
Tab. 8 Posun bodů F42	33
Tab. 9 Rozdíl účinností	33
Tab. 10 Naměřené hodnoty Q a H po dobu M- dní	38
Tab. 11 Hodnota n_{11} pro dané spády H.....	39
Tab. 13 Vypočtené n_{11} pro spád H.....	41
Tab. 14 Rozdělení průtoků mezi malou a velkou turbínu.....	42
Tab. 15 Rozdělení průtoků mezi jednotlivé turbíny.....	43
Tab. 16 Varianta č. 1	44
Tab. 17 Varianta č. 2	45
Tab. 18 Varianta č. 3	45
Tab. 19 Varianta č. 4.....	46
Tab. 20 Varianta č.5	47