

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra hydrotechniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Variantská studie proveditelnosti rekonstrukce
MVE Dobřichovice**

**Feasibility Study of the Dobrichovice Small
Hydropower Plant Rehabilitation Alternatives**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Miroslav Brouček, Ph.D.

leden 2020

Marek KAHUDA



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kahuda Jméno: Marek Osobní číslo: 438120
Zadávací katedra: K142 - Katedra hydrotechniky
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Variantní studie proveditelnosti rekonstrukce MVE Dobřichovice
Název diplomové práce anglicky: Feasibility Study of the Dobrichovice Small Hydropower Plant Rehabilitation Alternatives

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte variantní řešení rekonstrukce MVE Dobřichovice předpokládající kompletní nahrazení stávající technologie a úpravy stavební části. Posuďte kapacitu odpadního koryta a navrhněte možnosti úpravy. Proveďte technicko-ekonomické posouzení variant. Pro nejvýhodnější variantu rozšiřte úroveň detailu zpracování výkresové a výpočtové části dokumentace na úroveň DSP.

Seznam doporučené literatury:

Malé vodní elektrárny, Gabriel, P., Čihák, F. Kalandra, P., ISBN: 80-01-01812-1

Skriptum Navrhování vodních elektráren, Gabriel, P., Kučerová, J., ISBN 80-01-01304-9

další odborná literatura z oblasti navrhování a realizace malých vodních elektráren se vztahem k tématu diplomové práce;

relevantní technické normy, zejména ČSN 75 2601 Malé vodní elektrárny - základní požadavky; ČSN 73 1208

Navrhování betonových konstrukcí vodohospodářských objektů, příslušné EC a legislativní přepisy.

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Miroslav Brouček, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 27.9.2019

Termín odevzdání diplomové práce: 5.1.2020

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

28.9.2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem ČVUT 1/2009 „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

Praha, 5. 1. 2020

Poděkování:

Děkuji Ing. Miroslavovi Broučkovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při pravidelných konzultacích. Dále děkuji Ing. Marku Konejlovi zastupujícím STORM WATER s.r.o. za poskytnutí podkladů a praktických rad při konzultacích. Také děkuji Ing. Martinu Králíkovi, Ph.D. za umožnění propojení grantu 161-1611946A142 s diplomovou prací. Na závěr si velký dík zaslouží rodina za jejich obětavost a trpělivost.

Anotace

V diplomové práci je variantně řešeno technické řešení rekonstrukce MVE Dobřichovice. V první části je popsána lokalita a stávající stav MVE. Ve druhé části se práce zabývá možnostmi výpočtu 1D ustáleného nerovnoměrného proudění metodou po úsecích a výpočtu výroby MVE ve výpočetním prostředí Octave. Dále je zhodnocen stávající stav MVE Dobřichovice a je vypočtena výroba elektrické energie v průměrném roce. V poslední části práce jsou rozebrány dvě varianty rekonstrukce strojovny MVE s ohledem na stavební náklady a na přínos v podobě navýšení výroby elektrické energie elektrárnou. V první variantě je uvažováno zachování stávající strojovny. Ve druhé variantě se předpokládá demolice stávající strojovny a výstavba nové elektrárny.

Klíčová slova

Malá vodní elektrárna, Rekonstrukce, MVE, Dobřichovice, Studie proveditelnosti, Berounka, Koryto, Metoda po úsecích, Octave

Annotation

The master thesis solves alternatives of the rehabilitation of the small hydropower plant Dobrichovice. In the first part, the current location and condition of the HPP Dobrichovice are described. In the second part of the thesis author describes possibilities of solution of the 1D steady flow by “per partes” method and possibilities of computation of the electricity production by HPP, both in the Octave software. Next, author rates current condition of the HPP Dobrichovice and computes its hydropower generation in the average year. In the last part of the thesis author presents two alternatives of the technical solution of the rehabilitation of the HPP. Alternatives are presented with relation to investment costs and to hydropower generation increasement. The first alternative operates with preservation of the current power plant engine room. The second alternative assumes construction of a new hydropower plant.

Keywords

Small hydropower plant, Rehabilitation, SHPP, HPP, Dobrichovice, Feasibility study, Berounka river, Channel, Per partes method , Octave

Obsah

Úvod	6
1 Popis území stavby	7
1.1 Hydrologie	9
1.2 Geologie a hydrogeologie.....	10
2 Popis stávajícího stavu MVE Dobřichovice.....	13
2.1 Jez	13
2.2 Strojovna MVE.....	14
2.3 Odpadní kanál.....	18
2.4 Brod	19
3 Výpočet výroby průběžné MVE	20
3.1 Software Octave.....	20
3.2 Metoda po úsecích	21
3.3 Výpočet výroby průběžné MVE v prostředí Octave	35
4 Zhodnocení stávajícího stavu MVE.....	45
4.1 Stavebně technický stav	45
4.2 Výpočet výroby elektrické energie MVE za stávajícího stavu.....	47
5 Výběr vhodného typu turbíny pro lokalitu.....	59
6 Variantní návrh řešení rekonstrukce MVE Dobřichovice	63
6.1 Varianta I – zachování stávající strojovny.....	63
6.2 Varianta II – nová strojovna	75
Závěr	87
Použité zdroje.....	89
Seznam obrázků.....	91
Seznam tabulek	93
Výkresová část.....	94

Úvod

V obci Dobřichovice, která spadá pod obec s rozšířenou působností Černošice ve Středočeském kraji, je při levém břehu řeky Berounky, na jejím ř. km 16,117, situována malá vodní elektrárna Dobřichovice. Vodní dílo je vybaveno dvěma Francisovými kašnovými turbínami, vzduť pro vytvoření hydroenergetického potenciálu je zajištěno pevným jezem. Vtokový objekt do tlakového obvodu turbín je umístěn v jezové zdrži, odvedení vody od savek turbín je řešeno derivačně odpadním kanálem. Stávající technologie vodního díla se ukazuje jako zastaralá a z hlediska potenciálu lokality jako poddimenzovaná. Z těchto důvodů byl správcem vodního díla autorovi zadán požadavek na vypracování variantní studie proveditelnosti rekonstrukce vodní elektrárny. Dle dohody s investorem jsou uvažovány dvě varianty řešení.

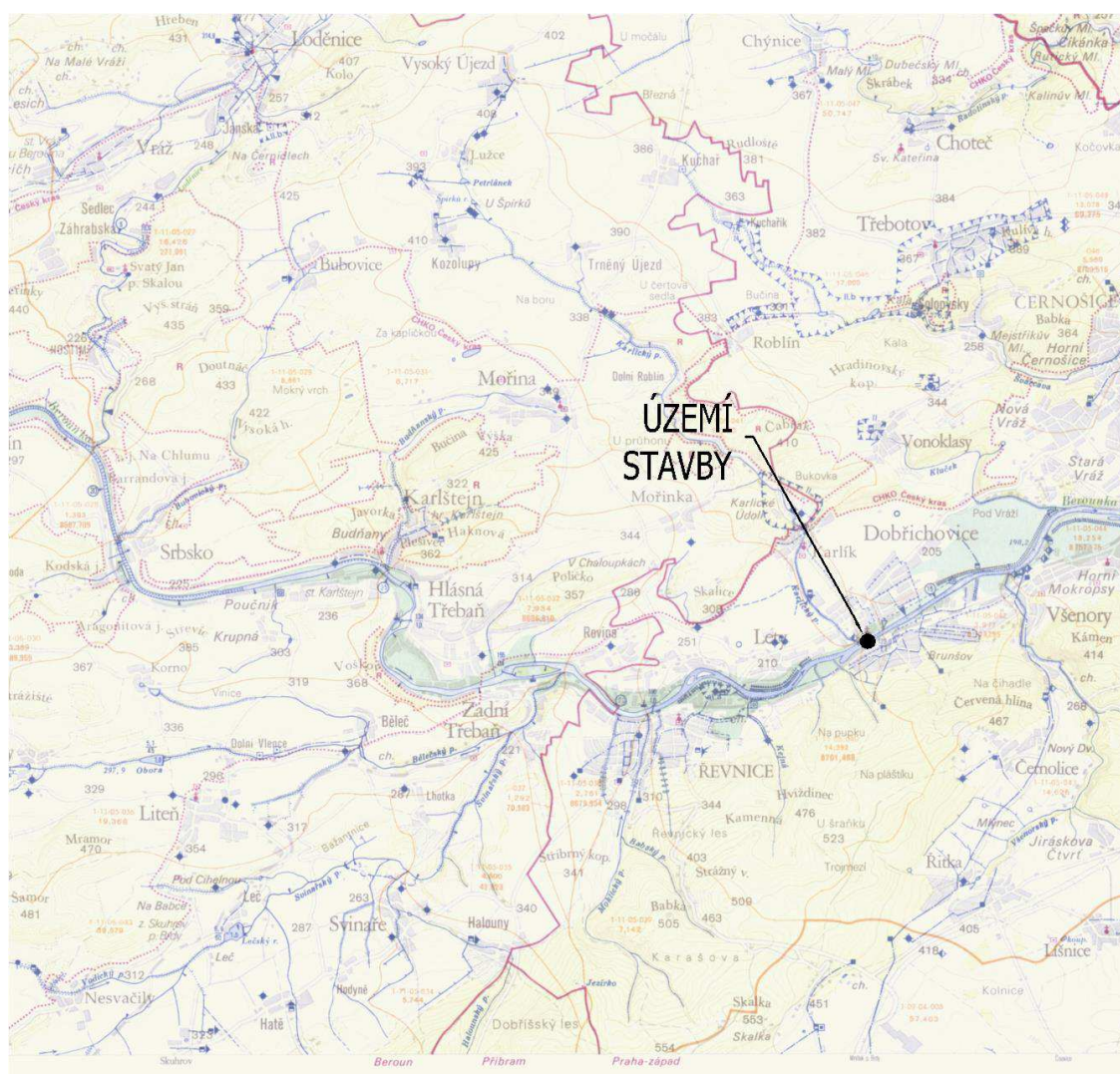
První variantou je zachování stávající strojovny a návrh nové technologie, což obnáší přidružené stavební úpravy stávající strojovny, případně odpadního kanálu. Druhou variantou řešení je demolice stávající stavby a návrh nové strojovny. S touto variantou jsou vázány rozsáhlé zemní a stavební práce.

Cílem diplomové práce tedy je vypracování technického zhodnocení stávajícího stavu vodního díla včetně výpočtu výroby elektrické energie elektrárnou v průměrném roce. Následně návrh variant stavebně technického řešení rekonstrukce MVE a jejich technicko-ekonomické zhodnocení, což obnáší návrh nové technologie vodních turbín a stavebních úprav v návaznosti na odhadované investiční náklady řešení a výpočet výroby elektrické energie vodní elektrárnou v průměrném roce.

Pro nejvýhodnější variantu si autor klade za cíl vypracování výkresové části na úrovni dokumentace pro stavební povolení.

1 Popis území stavby

Malá vodní elektrárna Dobřichovice se nachází ve stejnojmenném městě lokalizovaném ve Středočeském kraji. Dobřichovice dále spadají pod obec s rozšířenou působností Černošice a okres Praha-západ. Katastrální území, na kterém se vodní dílo nalézá opět nese název Dobřichovice. Níže je pro názornost na obr. 1.1 uvedeno zakreslení lokality do hydrotechnické mapy. Z hlediska ochrany přírody se stavba nenachází na zvláště ani jinak chráněném území [20].



obr. 1.1 – Zakreslení lokality do hydrotechnické mapy [21]

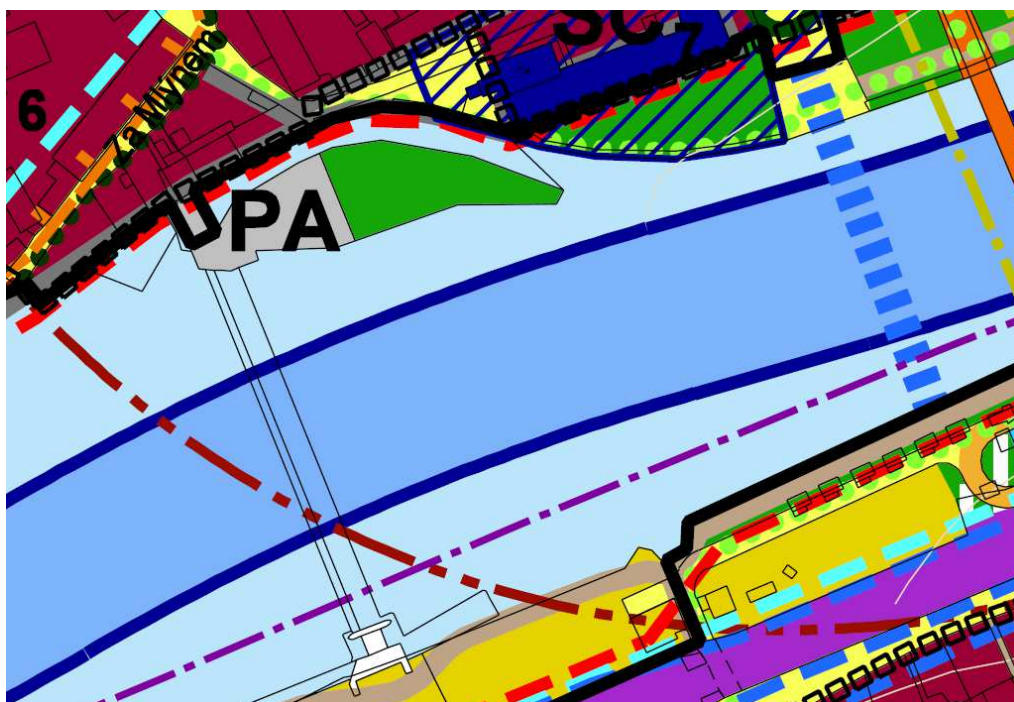
Strojovna vodní elektrárny je situována při levém břehu řeky Berounky přibližně v ose pevného jezu v ř. km 15,84, kdy nátok na vodní elektrárnu je řešen přímo z jezové zdrže bez deriveace. Odpad je naopak řešen derivačně odpadním kanálem délky cca 119 m v ose, který je od řeky Berounky oddělen ostrovem. Z obr. 1.2 níže, kde je uveden okomentovaný výřez z katastrální mapy podložené ortofoto mapou, je uspořádání patrné.



obr. 1.2 – Uspořádání objektů vodního díla – katastrální mapa [17]

K území stavby je dále vztažen územní plán města Dobruška. Výřez lokality vodního díla z hlavního výkresu územního plánu je uveden na obr. 1.3 na následující straně a je popsán v následujícím odstavci.

Z pohledu územního plánu je ostrov rozdělen přibližně na dvě poloviny, kdy dělicí linie je vedena kolmo ke směru proudění. Západní část ostrova, na které se nachází strojovna MVE, je vedena jako plocha pracovních aktivit (na obr. značeno PA a šedou výplní), východní část pak jako mimolesní zeleň – doprovodná zeleň vodního toku (zelená výplň). Světle modře jsou dále vyplněny vodní plochy, ohraničený tmavší pruh vedený středem toku značí nadregionální biokoridor. Ve směru proudu pod elektrárnou je napříč tokem veden brod zhotovený z betonových panelů (na obr. značen modrými pruhy), o kterém bude vedena diskuse v dalších kapitolách. Dále je z územního plánu patrné umístění vodního díla v aktivní zóně záplavového území (hranice vyznačena červenou čárkovanou čarou) a tvorba hranice zastavěného území strojovnou MVE (hranice vyznačena černou čarou). [19]



obr. 1.3 – Výřez z hlavního výkresu územního plánu města Dobřichovice [19]

1.1 Hydrologie

Zásadním hydrologickým podkladem pro práci jsou základní hydrologické údaje povrchových vod dle ČSN 75 1400 vydané Českým hydrometeorologickým ústavem dne 27.05.2014 pod značkou 379/14/J [8]. Údaje jsou vztaženy k řece Berounce – číslo hydrologického pořadí 1-11-05-0420; konkrétně k profilu Dobřichovického jezu v ř. km 16,117.

Dle ČHMÚ je v profilu jezu dlouhodobý průměrný roční průtok $Q_a = 38,6 \text{ m}^3/\text{s}$, M-denní průtoky jsou uvedeny v tab. 1.1 níže. Třída přesnosti dat je pro oba případy III, což dle ČSN 75 1400 odpovídá orientační hodnotě střední kvadratické chyby pro Q_a 20 %, pro $Q_{30=300d}$ 25 % a pro $Q_{300=364d}$ 45 % [22].

tab. 1.1 – M-denní průtoky v profilu jezu dle ČHMÚ

M_d [dny]	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
Q_{M_d} [m ³ /s]	82,9	55,2	42,8	34,6	29,1	24,8	21,6	19,2	17,2	15,2	13,0	10,1	7,5

Minimální zůstatkový průtok (MZP) je na lokalitě dle vodoprávního povolení stanoven jako $MZP = 4,65 \text{ m}^3/\text{s}$, jehož dosažení je kontrolováno nepřímou – kontrolou dosažení úrovně hladiny v nadjezí na úroveň značky umístěné na levém břehu jezu ve

výšce 1 cm nad přelivnou hranou v tomto bodě, kde je dle geodetického zaměření [11] kóta přelivné hrany nejdříve položena. Splnění podmínky tedy vede i ke smožení přelivné hrany jezu v celé jeho šířce. [13]

1.2 Geologie a hydrogeologie

Na sousedním pozemku (vyznačeno na obr. 1.4) byl proveden geologický průzkum [5], jehož výsledky o geologických, hydrogeologických a základových poměrech byly poskytnuty správcem vodního díla jako podklad pro diplomovou práci. Dle autora diplomové práce jsou pro účely studie proveditelnosti tyto podklady dostačující, ale pro účely možné budoucí tvorby vyššího stupně dokumentace (DSP, DPS) autor doporučuje provedení průzkumu přímo na lokalitě. V následujících podkapitolách je uveden stručný výtah z výsledků průzkumu.



obr. 1.4 – Lokalita geologického průzkumu

1.2.1 Geologické poměry

Předkvartérní podklad zájmového území je tvořen horninami barrandienského paleozoika – ordoviku, který je zde zastoupen vinickým souvrstvím. To je tvořeno tmavě šedě až černošedě zbarvenými jílovitými břidlicemi, které jsou při povrchu značně zvětřelé – rozpukané (geotechnický typ GT4). Hornina se drobně úlomkovitě až střípkovitě rozpadá, místy jsou břidlice rozložené na jíl pevné konzistence. Povrch předkvartérního podkladu se dle průzkumu vyskytuje v úrovni 195,31 – 199,89 m n. m.

Pokryvné útvary jsou zastoupeny nejčastěji fluviálními sedimenty, které jsou tvořeny hlinitými písky s příměsí šterku a písčitými šterky, a dále navážkami převážně z hlinitých písků s různorodou příměsí charakteru stavebního odpadu (cihly, škvára atp.).

Báze písčitých štěrků (geotechnický typ GT3) byla sondami zastižena na úrovni 195,31 – 199,89 m n. m., což odpovídá povrchu předkvartérního podkladu, a jejich povrch se pohybuje v úrovni 202,13 – 203,81 m n. m. Písčité štěrky jsou světle hnědé barvy a 50 – 70 % objemu vrstvy tvoří valouny o velikosti 2 – 10 cm, místy až 20 cm.

Nadloží písčitých štěrků je tvořeno ulehlými hlinitými písky (geotechnický typ GT2) s příměsí 10 – 20 % štěrku a valounů o velikosti 1 – 5 cm. Jejich povrch se pohybuje na kótě 204,42 – 205,93 m n. m.

Povrch území průzkumu pak tvoří navážky charakteru hlinitého písku a písčité hlíny s různorodou příměsí. V rámci práce je pro zjednodušení v místě ostrova uvažována absence navážek a rozsah hlinitých písků až po úroveň terénu, který se zde nachází maximálně na kótě 204,94 m n. m.

1.2.2 Hydrogeologické poměry

Poloha lokality v údolí Berounky jednoznačně určuje hydrogeologický režim území. Prostředím výskytu podzemní vody jsou fluvialní sedimenty pokryvných útvarů, které tvoří vysoce propustné prostředí, kde je bez výrazného omezení umožněno prakticky volné proudění podzemní vody. Báze hydrogeologického kolektoru je tvořena horninovým masivem, který působí jako izolátor, resp. poloizolátor. Určité zvodnění horniny se objevuje pouze v jejích horních, rozpukaných partiích.

V místě lokality dochází k významné komunikaci povrchové vody s podzemní vodou, jejíž režim je přímo závislý na úrovni hladiny v řece Berounce. Dalšími druhořadými dotačními zdroji podzemní vody jsou vsakující se atmosférické srážky a možné úniky vody z inženýrských sítí.

Za stavu běžných klimatických poměrů se hladina podzemní vody pohybuje na úrovni 202,31 – 202,98 m n. m. Průměrná hodnota měření odpovídá úrovni hladiny podzemní vody 202,50 m n. m.

Dle provedených chemických rozborů nejsou podzemní vody agresivní – dle ČSN EN 206-1 stupeň XA1.

1.2.3 Základové poměry

Základové poměry byly vyhodnoceny jako složité z důvodů změn základové půdy, nepravidelného uložení a nepravidelných mocností vrstev a dále z důvodu

pravděpodobného vlivu podzemní vody na zakládání. Dle ČSN 73 1001 je při navrhování plošných základů doporučeno postupovat podle zásad 2. geotechnické kategorie a použít směrné normové charakteristiky zemin a hornin.

2 Popis stávajícího stavu MVE Dobřichovice

Malá vodní elektrárna Dobřichovice je situována v budově původního mlýnu při levém břehu řeky Berounky, přibližně v podélné ose pevného jezu v Dobřichovicích. Elektrárna je řešena jako průběžná, jezová, derivační, kdy je derivace využito pouze odpadním kanálem, vtokový objekt do hydraulického obvodu turbín je proveden přímo z jezové zdrže. Situační uspořádání objektů je patrné z obr. 1.2 a je v kap. 1 i stručně popsáno.

2.1 Jez

Dobřichovický jez, jehož rekonstrukce byla dokončena v červnu 2000, je proveden jako pevný, střechovitého příčného profilu s přelivnou hranou na kótě 202,65 m n. m. při pravém pilíři, který dělí jezové těleso od rybího přechodu, a při levém zavázání na kótě 202,74 m n. m., kde je značkou na kótě 202,75 m n. m. kontrolována i minimální přepadová výška pro převádění MZP. Cca 12 m od levého zavázání byla zaměřena úroveň přelivné hrany 202,69 m n. m. Ve výpočtech je úroveň přelivné hrany uvažována 202,67 m n. m., což odpovídá váženému průměru geodeticky zaměřených výšek zaokrouhlenému na cm. Celková délka přelivné hrany činí cca 114 m, šířka jezu včetně předprsí je uváděna 8,8 m. [17][11]

Těleso jezu je provedeno jako betonové s kamenným obkladem, koruna jezu je provedena z čistých kopáků. Do podzákladí je těleso zavázáno betonovými ostruhami. Přelivná plocha délky v řezu cca 7 m je provedena ve sklonu cca 1:5. Výška jezu je uváděna jako 1,4 m, což přibližně odpovídá rozdílu úrovně přelivné hrany a dolního zakončení přelivné plochy na kótě 201,24 (vpravo) – 201,37 m n. m. (při levém zavázání). Podjezí je opevněno těžkým kamenným záhozem v délce 7 m. Na obr. 2.1 je uvedena fotografie z provádění rekonstrukce. [17][11]

Jak již bylo zmíněno výše, těleso jezu je u pravého břehu odděleno pilířem od rybího přechodu, který je tvořen pěti přepážkami bez štěrbin. Přepážky jsou provedeny z dřevěných hradidel vložených do zabetonovaných ocelových drážek. Šířka této propusti je 6 m. Při pravém břehu je dále vybudována rampa šířky 2 m ve sklonu 1:10 pro umožnění sestupu vodáků do podjezí. Konstrukci je možné vidět na obr. 2.2 vlevo v kontextu s celým jezem. [17]



obr. 2.1 – Dobřichovický jez v době rekonstrukce [17]



obr. 2.2 – Pohled proti vodě na jez Dobřichovice

2.2 Strojovna MVE

Strojovna MVE je situována při levém břehu jezové zdrže, kde je propojena s dalšími objekty ve vlastnictví majitele vodního díla. Technologii elektrárny tvoří dvě Francisovy vertikální kašnové turbíny.

Jako **podklady** pro práci byly správcem vodního díla poskytnuty tyto výkresové dokumentace stávající strojovny:

- Plán na postavení II. Francisovy turbíny Dobřichovice z roku 1931 (viz příloha 2.1)

- Opravy na vtoku do MVE z roku 1999

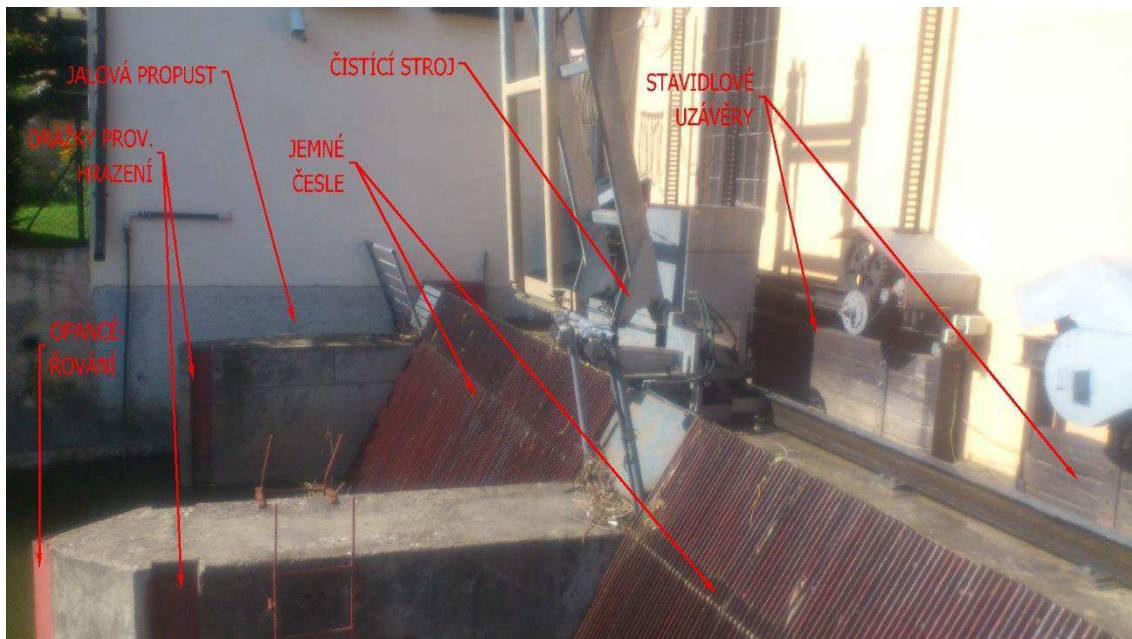
Poskytnuté dokumentace v rámci tolerancí (jednotky cm) odpovídají geodetickému zaměření lokality (možno porovnat pouze venkovní konstrukce). V místech, kde se rozměrově rozcházejí, bylo rozhodnuto právě na základě zaměření. Dále je nutno se pozastavit nad výškovým systémem poskytnutých dokumentací, který je viditelně jadranský, protože oproti geodetickému zaměření, které je provedeno v Bpv, je průměrný výškový rozdíl kótovaných a zároveň zaměřených konstrukcí 30 cm (Bpv vykazuje nižší hodnoty). Popis stávajícího stavu pokračuje v dalších odstavcích.

Spodní stavba strojovny je provedena jako betonová a je třemi masivními pilíři šířky 800 – 900 mm rozdělena do tří polí, kdy krajní levé pole je ze strany vedlejší budovy ohraničeno betonovou stěnou. Pilíře jsou „vytaženy“ jak před objekt strojovny, kde slouží jako nátokové pilíře, tak i za objekt strojovny. Krajní levé pole šířky 0,8 m slouží jako jalová propust, zbylá dvě pole šířky 5,0 m a 4,5 m pro umístění technologie turbín.

Délka pilířů v oblasti **vtoku** (viz obr. 2.3) přesahuje stavbu strojovny proti vodě o 5,51 m, dno nátoky je provedeno jako betonové na kótě 201,00 m n. m. Přední zhlaví pilířů je provedeno jako zašpičatělé, kdy vlastní špička zhlaví je opancéřována. Téměř bezprostředně za zhlavími pilířů se nachází drážky provizorního hrazení, díky kterým je možné revizní uzavření všech tří polí. Pro zabránění vplutí nečistot do kašen turbín jsou mezi pilíři osazeny jemné česle o délce 4,0 m a odklonu od horizontální roviny o 60° z pásové oceli tloušťky 6 mm, světlost mezi česlicemi je 30 mm. U dna jsou česle opřeny o ocelový práh zakotvený do betonového dna, horní práh tvoří ocelový profil I 260, za kterým směrem po vodě navazuje železobetonová podesta šířky 2,20 m. Podestou je umožněn přístup k jednotlivým polím vtoku a dále je na ní umístěn čistící stroj pro automatické stírání česlí. Průměrná úroveň horní plochy podesty a pilířů je dle zaměření 204,35 m n. m. Bezprostředně nad strojovnou (mezi podestou a strojovnou) jsou opět ve všech třech polích umístěny provozní stavidlové uzávěry. Zdvih stavidel je umožněn přes cévové tyče za pomoci elektropohonů. Stavidlo jalové propusti plní zároveň funkci regulačního uzávěru.

Na objekt vtoku navazuje spodní stavba strojovny v podobě **kašen** turbín. Šířky kašen respektují zmíněné šířky jednotlivých polí – 5,0 m vlevo, 4,5 m vpravo ve směru proudu. Osy turbín jsou v podélném směru od vstupního profilu vzdáleny 2,6 m. Kašny jsou zakončeny půlkruhově, kdy počátek zaoblení odpovídá profilu os turbín. V rozsahu

horní stavby strojovny jsou dělicí pilíře navýšeny na výšku spodní stavby tak, aby tvořily podpory pro železobetonovou stropní desku tvořící podlahu horní stavby strojovny.



obr. 2.3 – Vtokový objekt MVE

Odvedení vody od turbín je zajištěno betonovými **savkami**, jejichž podélný tvar je patrný z příložených dokumentací v přílohové části. Savky mají pod turbínami kruhový profil průměru 2,2 m. Příčný profil savek je ve směru proudu plynule rozšiřován na obdélníkový výstupní profil rozměrů 5,0 x 1,9 m, resp. 4,5 x 1,9 m.

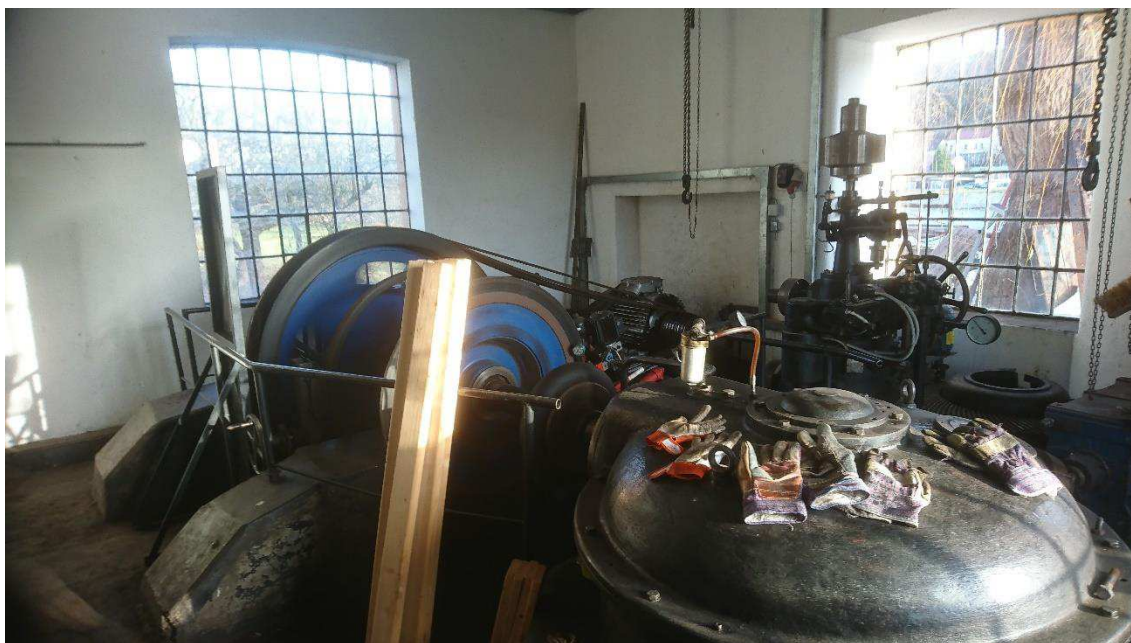
Pod strojovnou pilíře přesahují půdorys horní stavby o 1,255 m, úroveň horní hrany pilířů je cca 202,10 m n. m., jejich dolní zhlaví je provedeno jako půlkruhové. Krajní pravý pilíř je prodloužen více a slouží jako opěrná stěna a jako napojení na pravý břeh odpadního kanálu. V pilířích jsou osazeny drážky provizorního hrazení pro možnost revizního zahrazení hydraulického obvodu turbín. Dno výtokového objektu je provedeno jako betonové. Na obr. 2.4 je uvedena fotografie výtoku pod savkami z roku 2011, kdy došlo k údržovacím pracím na tomto objektu.

Do **horní stavby** dosahující půdorysných rozměrů cca 8 x 14 m jsou vyvedeny svislé hřídele turbín. V horní stavbě tedy je umístěna technologie generátorů, dále jsou zde umístěny elektro-rozvaděče atp. Přístup do horní stavby je umožněn buďto přes vedlejší budovu, se kterou je propojena, nebo zvenčí z ostrova, na který je přístup umožněn lávkou vedenou přes odpadní kanál. Střecha horní stavby má sedlový charakter, s tím rozdílem, že je v příčném směru zaoblena do obloukového tvaru. Střecha není navržena jako odnímatelná.



obr. 2.4 – Oprava výtoku pod elektrárnou v roce 2011

Technologii MVE tvoří již zmíněné dvě Francisovy vertikální kašnové turbíny hltností $2 \times 5 \text{ m}^3/\text{s}$, jejichž hřídele jsou vyvedeny do horní stavby. Zde jsou vertikální hřídele kuželovým soukolím převedeny na horizontální, na kterých jsou umístěny setrvačníky a řemenice. Právě řemeny je totiž proveden převod na požadované otáčky generátorů. Maximální výkony soustrojí jsou udávány pro T1 (vlevo ve směru proudu) 40 kW, pro T2 (vpravo) 44 kW. Celkový instalovaný výkon elektrárny tedy činí 84 kW. Na obr. 2.5 níže je uspořádání soustrojí v horní stavbě patrné.



obr. 2.5 – Soustrojí T2 v horní stavbě

2.3 Odpadní kanál

Pro odvedení vody od výtoku z MVE zpět do řeky Berounky slouží odpadní kanál, jehož délka v ose je 119,1 m, resp. 195,9 m v případě měření od průsečíku osy kanálu s osou Berounky. Za výtokem z elektrárny dochází ke zúžení profilu koryta odpadního kanálu z 11,5 m na 8 m, poté je vlivem přechodu typu pravého břehu ze svislé opěrné betonové stěny na svah opět rozšiřován. Nikoliv však ve dně.

Odpadní kanál je zleva opevněn nabetonávkami na základech sousední stavby a následně opěrnou stěnou z lomového kamene, která je cca po úroveň lávky také zakryta betonem. V místě ústí přechází levá opěrná stěna do kamenné dlažby, kterou je opevněn levý břeh dolního úseku řeky Berounky. Zprava je kanál kromě zmíněné krátké betonové části pod výtokem opevněn kamenným pohozelem ve sklonu cca 1:1,5. Pravý břeh je dále zpevněn stromovým vegetačním doprovodem. Dno kanálu je tvořeno skalním podložím.

Přibližně v jedné třetině své osově délky pod strojovnou je odpadní kanál přemostěn lávkou šířky 3 m s asfaltovým povrchem a hlavním nosným systémem v podobě dvou ocelových nosníků I profilu proměnné výšky – směrem do středu jsou zvyšovány. Na následujících fotografiích jsou uvedeny pohledy z lávky, a to proti vodě na strojovnu (obr. 2.6) a po vodě směrem k soutoku s řekou Berounkou (obr. 2.7). Fotografie byly pořízeny za stavu odstavení MVE, kdy je díky nízkému vodnímu stavu možno spatřit skalní výchozy, na kterých jsou levobřežní opěrné stěny patrně založeny.



obr. 2.6 – Pohled z lávky na odpadní kanál proti vodě



obr. 2.7 – Pohled z lávky na odpadní kanál po vodě

2.4 Brod

Přibližně 17,5 m pod osovým soutokem odpadního kanálu MVE a Berounky je v korytě řeky umístěna konstrukce brodu (viz obr. 2.8) z betonových panelů tloušťky 20 cm. Panely jsou naskládány vedle sebe ve třech řadách do celkové šířky cca 9 m po celé délce příčného profilu koryta.

Brod již není využíván a jeho vlastnictví je nejasné. Jeho vlivem dochází za běžných průtoků ke vzduť hladiny (dle zaměření hladiny nad a pod brodem) o cca 30 cm.



obr. 2.8 – Brod přes řeku Berounku pod soutokem s odpadním kanálem MVE

3 Výpočet výroby průběžné MVE

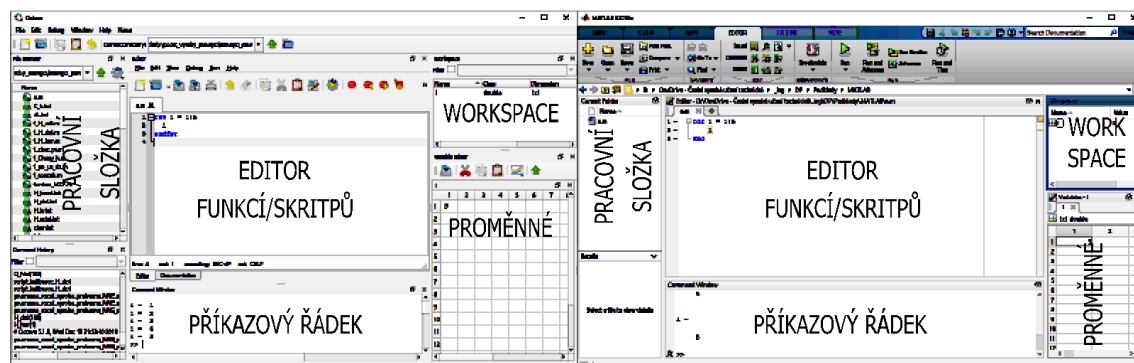
V následujících kapitolách bude opakovaně na konkrétních případech proveden výpočet výroby průběžnou malou vodní elektrárnou. Tato kapitola je zaměřena na teoretický popis zvoleného způsobu výpočtu a při použití výpočtu v dalších kapitolách je pouze popsána jeho aplikace a případné úpravy, které může konkrétní případ vyžadovat.

Kompletní hydrotechnický výpočet výroby byl proveden v programu Octave, ve kterém byly vytvořeny funkce na výpočet průběhu hladin metodou po úsecích, na výpočet výroby v závislosti na okrajových podmínkách, a řídicí skript, do kterého jsou zadávány veškeré vstupní parametry a který „volá“ zmíněné funkce a produkuje výsledky v číselné i grafické podobě.

3.1 Software Octave

Pro výpočet výroby průběžné MVE byl zvolen software GNU Octave 5.1.0, který je open source alternativou výpočetního programu MATLAB. Jedná se tedy o programovací jazyk primárně určený pro numerické výpočty, jako je řešení lineárních a nelineárních rovnic, numerické lineární algebry, statistických analýz či provádění jiných numerických experimentů. Programovací jazyk je obdobný jazyku MATLABu a ve většině případů jsou syntaxe vytvořené v jednom či druhém prostředí mezi sebou kompatibilní.

Octave je prováděn v uživatelském rozhraní GUI (graphical user interface), které je velice podobné prostředí MATLAB (srovnání viz obr. 3.1). Oproti MATLABu je však GNU Octave volně šiřitelný software a je z oficiálních stránek stažitelný zdarma.



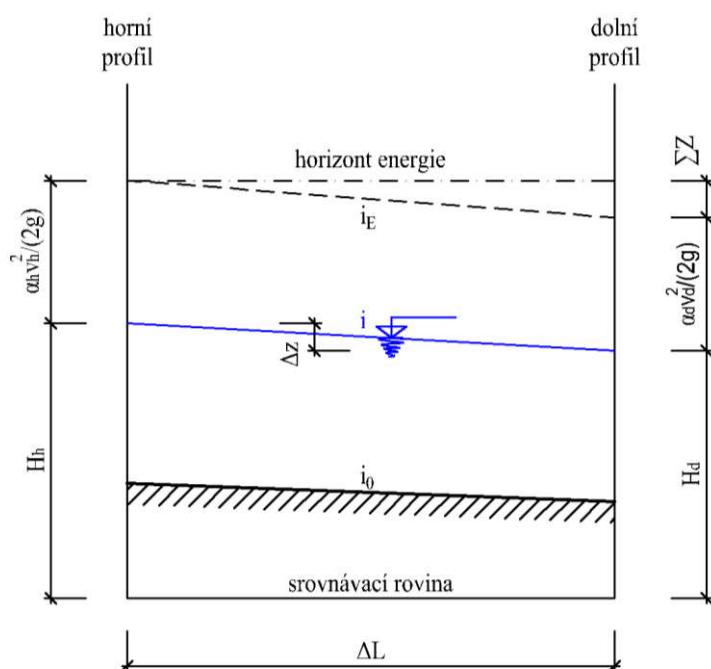
obr. 3.1 – Srovnání uživatelského prostředí Octave (vlevo) a MATLAB (vpravo)

3.2 Metoda po úsecích

Pro výpočet úrovně dolní hladiny pod elektrárnou byla zvolena tzv. metoda po úsecích umožňující řešit 1D ustálené nerovnoměrné proudění v otevřených korytech. Popis metody a dalších přidružených hydraulických jevů lze nalézt v běžně dostupné literatuře oboru hydrauliky [14][6][9].

3.2.1 Princip metody po úsecích

Metoda je založena na Bernoulliho rovnici pro horní a dolní profil řešeného úseku, viz následující obr. 3.2.



obr. 3.2 – Bernoulliho rovnice pro úsek otevřeného koryta

Úsek je možné řešit dvěma způsoby. Buď jsou známy hloubky, resp. úrovně hladin v obou profilech, v takovémto případě vede řešení k přímému výpočtu délky úseku ΔL . Ve druhém případě je známa délka úseku a hloubka na jeho počátku a je hledána hloubka na konci úseku. Tento postup vede k iteračnímu řešení, nicméně pro neprizmatické koryto, kdy musí být volen konkrétní profil, což jsou i všechny případy řešené v rámci diplomové práce, je druhá varianta prakticky jediná možná. Proto je dále představena pouze druhá varianta, kdy je hledána hloubka v druhém profilu.

Porovnáním obou stran rovnice patrné z obr. 3.2 získáme vztah:

$$H_h - H_d = \Delta z = \frac{\alpha_d v_d^2 - \alpha_h v_h^2}{2g} + \Sigma Z \quad (3.1)$$

kde:

- Δz je rozdíl hladin horního a dolního profilu úseku [m]
 H_h, H_d úrovně hladin v horním a dolním profilu úseku [m, m n. m.]
 v_h, v_d průřezové rychlosti v horním a dolním profilu úseku [m/s] (vztah 3.12)
 α_h, α_d Coriolisova čísla horního a dolního profilu [-] (vztah 3.14)
 $\sum Z$ součet všech hydraulických ztát mezi horním a dolním profilem [m]
 vyjádřený vztahem:

$$\sum Z = Z_t + Z_m \quad (3.2)$$

kde:

- Z_t jsou ztráty třením [m]
 Z_m jsou ztráty místní [m]

Ztráty třením je možné vyjádřit pomocí Chézyho rovnice pro průměrný profil:

$$Z_t = i_E \Delta L = \frac{Q^2}{C_p^2 S_p^2 R_p} \Delta L \quad (3.3)$$

kde:

- i_E je sklon čáry energie [-]
 ΔL délka úseku [m]
 Q průtok [m³/s]
 C_p průměrný Chézyho rychlostní součinitel [m^{0,5}/s]
 S_p průměrný průtočný profil [m²]
 R_p průměrný hydraulický poloměr [m]

Průměrné veličiny jsou dány průměry veličin horního a dolního profilu, například $S_p = (S_h + S_d)/2$, kde S_h a S_p jsou průtočné plochy horního a dolního profilu. Obdobně uvedené platí pro C_p a R_p .

Zavedením průměrného modulu průtoku [m³/s] dle vztahu:

$$K_p = C_p S_p R_p^{0,5} \quad (3.4)$$

lze vztah 3.3 zjednodušit na:

$$Z_t = \frac{Q^2}{K_p^2} \Delta L \quad (3.5)$$

Pro výpočet Chézyho rychlostního součinitele byl zvolen vztah podle Pavlovského:

$$C = \frac{1}{n} R^P \quad (3.6)$$

kde:

n je drsnostní součinitel dle vztahu 3.9 odvozeném Hortonem a Einsteinem

R hydraulický poloměr [m] dle vztahu 3.8

P exponent podle Pavlovského dle vztahu 3.7

$$P = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,10) \quad (3.7)$$

$$R = \frac{S}{O} \quad (3.8)$$

$$n = \frac{(\sum_{i=1}^N O_i n_i^{1,5})^{\frac{2}{3}}}{O^{\frac{2}{3}}} \quad (3.9)$$

kde:

S je průtočný profil [m²]

O omočený obvod profilu koryta [m]

O_i omočený obvod i -tého úseku příčného profilu koryta [m]

n_i drsnostní součinitel i -tého úseku příčného profilu koryta

Místní ztráty změnou průřezu je možné vyjádřit vztahem:

$$Z_m = \xi_m \left| \frac{\alpha_d v_d^2 - \alpha_h v_h^2}{2g} \right| \quad (3.10)$$

kde:

ξ_m je součinitel místní ztráty změnou průřezu

Vztah 3.1 je nyní možné upravit do **výsledného tvaru**:

$$\Delta z = \frac{\alpha_d v_d^2 - \alpha_h v_h^2}{2g} + \frac{Q^2}{K_p^2} \Delta L + \xi_m \left| \frac{\alpha_d v_d^2 - \alpha_h v_h^2}{2g} \right| \quad (3.11)$$

Střední průřezové rychlosti jsou dány rovnicí kontinuity:

$$v = \frac{Q}{S} \quad (3.12)$$

Coriolisovo číslo zohledňuje vliv nerovnoměrného rozdělení bodových rychlostí po profilu a je definováno vztahem:

$$\alpha = \frac{\int \rho u^3 dS}{\rho v^3 S} \quad (3.13)$$

kde:

- u je bodová rychlost [m/s] reprezentující elementární průt. plochu dS
 ρ hustota kapaliny [kg/m³]

Jelikož ale na lokalitě nebylo provedeno měření bodových rychlostí, a navíc se mohou hodnoty Coriolisových čísel pro různé profily lišit, byl zvolen způsob výpočtu pro každý profil zvlášť dle empirického vztahu závislém na Chézyho rychlostním součiniteli podle Morozova:

$$\alpha = 1,0 + 0,84 \left(\frac{3,7}{C^4} - 1 \right)^{1,8} \quad (3.14)$$

Směr výpočtu metodou po úsecích je doporučen pro říční proudění proti směru proudění, pro bystřinné proudění naopak ve směru proudu. Níže je uveden doporučený postup řešení pro říční proudění:

1. Stanovení úrovně hladiny v prvním profilu – dolní okrajové podmínky – například předpoklad ustáleného rovnoměrného proudění, výpočet přepadové výšky přes vzdouvací objekt, předpoklad výskytu kritické hloubky atp.
2. Odhad úrovně hladiny v horním profilu, výpočet rozdílu hladin dle vztahu 3.11, a porovnání odhadu s vypočtenou hodnotou úrovně hladiny v horním profilu.
3. Oprava odhadu a opakování postupu v bodě č. 2, dokud se odhadnutá a vypočtená hodnota úrovně hladiny v horním profilu s požadovanou přesností nerovnaj.
4. Finální vypočtený horní profil je použit jako dolní profil pro výpočet následujícího horního profilu dle bodů 2 a 3.
5. Opakování postupu pro celý zájmový úsek koryta

V případě bystřinného proudění je postup obdobný, pouze se postupuje od horní okrajové podmínky, tedy směrem od horního profilu k dolnímu.

3.2.2 Metoda po úsecích v prostředí Octave

Pro řešení jednoho úseku metody po úsecích byla vytvořena výpočetní funkce s názvem *f_po_us_dz*. Funkce je připravena na řešení říčního proudění, je ale možné její použití i pro bystřinné proudění, pouze by byl horní profil zadán jako dolní a dolní jako horní. Nicméně pro výpočty na lokalitě se vznik bystřinného proudění nepředpokládá. Funkce je připravena na výpočet úrovní hladin vzhledem ke srovnávací rovině, stejně jako je metoda odvozena v předešlé kapitole. Nejsou tedy počítány hloubky, ale například nadmořské výšky úrovní hladin.

Vstupními parametry funkce jsou úroveň hladiny a geometrie horního profilu, průtok, délka úseku, součinitel místní ztráty, úroveň hladiny potřebné hydraulické charakteristiky dolního profilu. Hydraulické charakteristiky horního profilu, jako je průtočná plocha, hydraulický poloměr atp., jsou dopočteny za použití podfunkce *f_char_pr*, jejíž princip bude vysvětlen v další kapitole, na základě geometrie profilu a odhadnuté úrovně hladiny. Geometrií profilu je myšlena matice souřadnic bodů tvořících po propojení liniemi profil koryta, a vektor drsnostních součinitelů náležících každé linii mezi jednotlivými body profilu koryta zleva doprava.

Následně je dle postupu uvedeném v předchozí kapitole 3.2.1 dopočten rozdíl hladin horního a dolního profilu, jehož přičtením k úrovni hladiny dolního profilu je získána vypočtená hodnota úrovně hladiny horního profilu. Na závěr je vypočtena výstupní proměnná dle vztahu:

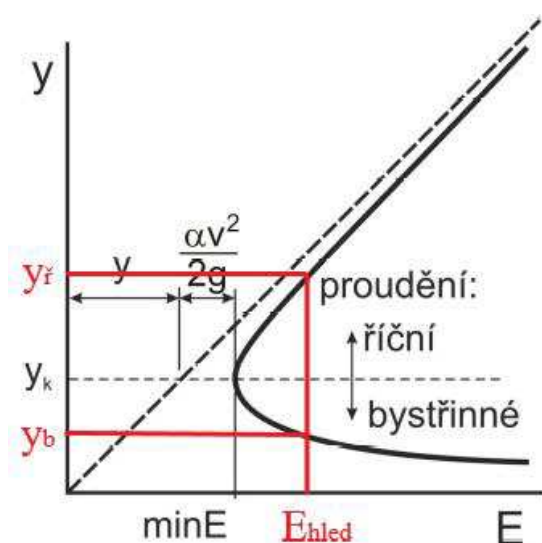
$$e = (H_{h,vyp} - H_{h,odhad})^2 \quad (3.15)$$

Jedná se tedy o kvadrát rozdílu odhadnuté a vypočtené hodnoty úrovně hladiny v horním profilu. Takto zapsaná funkce má minimum v bodě 0, a to právě když si jsou obě hodnoty (odhadnutá a vypočtená) rovny, což je i cíl výpočtu úseku.

Takto připravená funkce vybízí k jedinému, a to je použití optimalizační metody určené k nalezení minima funkce, kdy vztah 3.15 je právě účelovou funkcí určenou k minimalizaci, a proměnnou, na základě které optimalizační metoda minimum funkce hledá, je odhadovaná úroveň hladiny horního profilu.

Posledním důležitým krokem je výběr optimalizační metody. Mezi připravenými funkcemi systému Octave se jich nachází hned několik, ale jako nejvhodnější se ukázala funkce *fminbnd* využívající tzv. Golden Section (Zlatá sekce) vyhledávací strategii.

Zásadní výhodou této metody je možnost, resp. nutnost zadání intervalu, ze kterého bude vstupní proměnná vybírána, takže při správném nastavení nedojde například k hledání úrovně hladiny pod úrovní dna atp. Navíc problém, kdy hledáme konkrétní energetickou



výšku druhého profilu má řešení pro dvě hloubky, kdy jedna odpovídá bystřinnému a druhá říčnímu proudění. Graficky je tento jev znázorněn na obr. 3.3, je ale nutno podotknout, že energetická výška pro jednotlivá řešení pravděpodobně nebude naprosto shodná, protože do výpočtu dále vstupuje sklon čáry energie průměrného profilu úseku.

obr. 3.3 Energetická výška E v závislosti na hloubce y [14]

Interval úrovní hladin, pro které je hledáno řešení, byl tedy z výše uvedených důvodů stanoven za předpokladu říčního proudění od kritické úrovně hladiny po druhý nejvýše položený bod geometrie koryta. V případě bystřinného proudění by bylo řešení hledáno pro interval od nejnižšího bodu dna profilu koryta po kritickou úroveň hladiny. V pracovní verzi programu byl interval úrovní hladin nastaven pro celý rozsah geometrie koryta, což v ojedinělých případech vedlo právě ke „spadnutí“ řešení do bystřinného proudění, přestože bylo očekáváno proudění říční, a k nesmyslným průběhům hladin.

Nevýhodou použité optimalizační metody je delší výpočetní čas, který se projevil hlavně při opakovaném výpočtu pro delší průtokové řady (např. 365 hodnot řady M-denních průtoků). Dalším úskalím algoritmu je možnost jeho konvergence k lokálnímu minimu, což by měl mít uživatel na paměti. Na druhou stranu se ale funkce f_{minbnd} při správném nastavení ukázala jako spolehlivá a jiná alternativa již nebyla vyhledávána.

Ve chvíli, kdy optimalizační funkce dokonverguje k řešení $e = 0$ s přesností 10^{-4} , je výpočet ukončen a jako výsledek je vrácena vstupní proměnná, pro kterou bylo nalezeno minimum účelové funkce, tedy úroveň hladiny v horním profilu a výpočet může být spuštěn na dalším úseku, což může být zajištěno cyklem `for` – pro $i = 2$ až n profilů je opakován výpočet, kdy profil $i-1$ je vždy dolní profil a i -tý profil je horní profil. Úroveň hladiny v prvním profilu je vypočtena na základě okrajové

podmínky. Princip implementace funkce pro několik úseků bude nejspíše patrnější z diagramu na následující straně (obr. 3.4). Základními parametry pro výpočet jsou myšleny například vektory vzdáleností mezi profily, vektory součinitelů místních ztrát mezi profily, parametry okrajové podmínky atp.

Dalšími použitými funkcemi dle obr. 3.4 jsou f_char_pr , která již byla zmíněna v textu výše a která bude dále podrobněji představena, a f_H_crit sloužící k výpočtu kritické hloubky, resp. kritické úrovně hladiny, čímž je myšlena úroveň hladiny, při které je právě dosaženo kritické hloubky v profilu.

Funkce f_H_crit je napsána na stejném principu jako $f_po_us_dz$. Je tedy připravena na „volání“ pomocí nadřazené optimalizační funkce $fminbnd$. Myšlenkou výpočtu je hledání právě takové úrovně hladiny v profilu, kdy je pro daný průtok Froudovo číslo rovno právě 1. Nastavený interval řešení je v tomto případě od nejnižšího bodu dna koryta po druhý nejvyšší bod geometrie profilu. Froudovo číslo je definováno dle vztahu:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \frac{S}{B}}} \quad (3.16)$$

kde:

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

B šířka koryta v úrovni hladiny [m]

Účelová funkce určená k minimalizaci pak je:

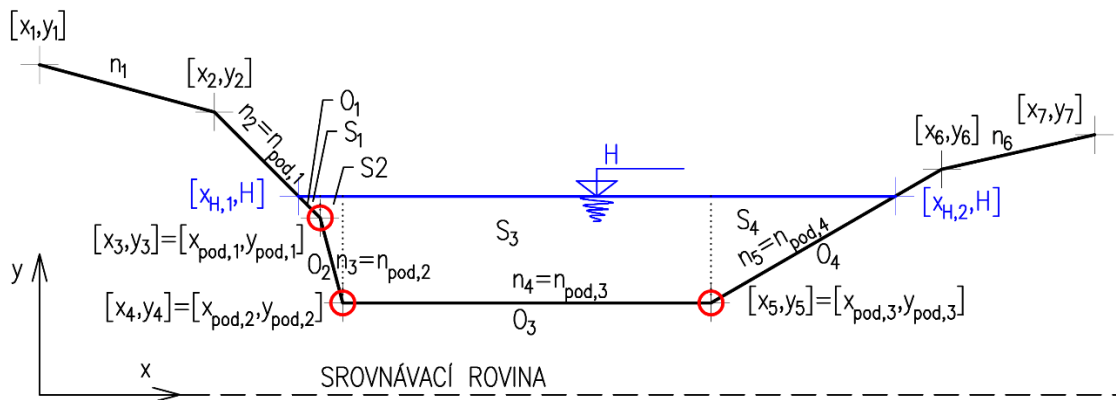
$$e = (Fr - 1)^2 \rightarrow \min \quad (3.17)$$

3.2.3 Výpočet hydraulických charakteristik profilu v prostředí Octave

Nedílnou součástí výpočetních funkcí zmíněných v předchozích kapitolách je funkce f_char_pr , která na základě úrovně hladiny, geometrických a drsnostních parametrů profilu koryta řeší jeho základní průtočné charakteristiky. Jelikož je geometrie zadávána v bodech, není předem známo, mezi kterými body dojde k průsečíku úrovně hladiny s geometrií koryta. Právě proto představovalo pro autora vytvoření funkce mnohem větší výzvu než vytvoření vlastní funkce pro řešení metody po úsecích. Z tohoto důvodu je funkci v práci věnována vlastní kapitola.

Vstupními parametry funkce tedy jsou matice geometrie profilu nazvaná PR, kde první sloupec tvoří souřadnice x – délkové souřadnice bodů zleva doprava, kdy první bod má souřadnici 0, druhý sloupec tvoří souřadnice y – výškové souřadnice bodů od srovnávací roviny (v rámci práce byl vždy uvažován souřadný systém Bpv), tato matice je v prvním kroku výpočtu rozdělena na vektory x a y; dále vektor drsnostních součinitelů n_i , který má vždy m-1 prvků, kdy m je počet řádků matice PR (počet bodů), a každá hodnota tedy náleží úseku profilu koryta mezi jednotlivými body; a posledním vstupem je úroveň hladiny H opět uvažována od srovnávací roviny. Parametry PR a n_i byly vždy pro všechny uvažované profily předem připraveny v pracovním adresáři ve formátu textového editoru a byly „volány“ dle potřeby.

Pro lepší pochopení funkce se autor rozhodl popsat algoritmus na konkrétním příkladu smyšleného profilu koryta uvedeném na obr. 3.5.



obr. 3.5 – Schéma k popisu f_char_pr na konkrétním příkladě

Prvním krokem výpočtu je nalezení průsečíků hladiny a geometrie profilu koryta, tj. souřadnice $x_{H,1}$ a $x_{H,2}$. To zajišťuje cyklus, který pro $i = 1 \div m-1$, kdy m je počet bodů geometrie, posuzuje podmínky:

$$H \leq y_i \wedge H \geq y_{i+1} \quad (3.18)$$

$$H \geq y_i \wedge H \leq y_{i+1} \quad (3.19)$$

Pokud je jedna z podmínek splněna, program provede lineární interpolaci mezi souřadnicemi x_i a x_{i+1} na základě polohy H mezi souřadnicemi y_i a y_{i+1} . V našem případě je první podmínka 3.18 splněna mezi souřadnicemi y_2 a y_3 , čímž je nalezena souřadnice body $x_{H,1}$, a druhá podmínka 3.19 je splněna mezi souřadnicemi y_5 a y_6 , tím je nalezena souřadnice $x_{H,2}$.

Dalším krokem je výběr bodů, které jsou pod úrovní hladiny. Tyto body jsou na obrázku označeny červeným kolečkem. To je provedeno pomocí logické operace, díky které jsou z původních vektorů souřadnic geometrie profilu vybrány pouze ty, pro jejichž pozici platí podmínka $y_i < H$. Vybrané souřadnice jsou zapsány do nových vektorů x_{pod} a y_{pod} .

Následně jsou vypočteny jednotlivé dílčí průtočné plochy. Krajní levá plocha S_1 dle vztahu pro obsah trojúhelníku:

$$S_1 = \frac{(H - y_{pod,1})(x_{pod,1} - x_{H,1})}{2} \quad (3.20)$$

Vnitřní plochy jsou pro $i = 2 \div m_{pod}$, kdy m_{pod} je počet bodů pod hladinou, vypočteny dle vztahu pro obsah lichoběžníku:

$$S_i = \frac{(H - y_{pod,i-1}) + (H - y_{pod,i})}{2} (x_{pod,i} - x_{pod,i-1}) \quad (3.21)$$

Krajní pravá plocha $S_{m_{pod}+1}$ (v našem případě S_4) je dopočtena opět dle vztahu pro obsah trojúhelníku:

$$S_{m_{pod}+1} = \frac{(H - y_{pod,m_{pod}})(x_{H,2} - x_{pod,m_{pod}})}{2} \quad (3.22)$$

Výsledná průtočná plocha je nakonec dopočtena dle vztahu:

$$S = \sum_{i=1}^{m_{pod}+1} S_i \quad (3.23)$$

Obdobně jsou vypočteny omezené obvody na základě Pythagorovy věty. Pro první linii platí:

$$O_1 = \sqrt{(H - y_{pod,1})^2 + (x_{pod,1} - x_{H,1})^2} \quad (3.24)$$

Vnitřní linie jsou opět cyklicky počítány pro $i = 2 \div m_{pod}$ dle vztahu:

$$O_i = \sqrt{(y_{pod,i} - y_{pod,i-1})^2 + (x_{pod,i} - x_{pod,i-1})^2} \quad (3.25)$$

Krajní pravá linie (v našem případě O_4) je vypočtena obdobně první:

$$O_{m_{pod}+1} = \sqrt{(H - y_{pod, m_{pod}})^2 + (x_{H,2} - x_{pod, m_{pod}})^2} \quad (3.26)$$

Celkový omočený obvod je posléze doložen dle vztahu:

$$O = \sum_{i=1}^{m_{pod}+1} O_i \quad (3.27)$$

Jak již bylo zmíněno, povinným vstupem do výpočtu je vektor drsnostních součinitelů obsahujících $m-1$ hodnot. Dalším krokem je zúžení vektoru na hodnoty odpovídající jednotlivým omočeným obvodům. To je provedeno opět dle logické operace – jsou vybrány ty pozice, pro které platí podmínka $y_i < H$, nicméně takto vybrané hodnoty by v našem případě postrádaly hodnotu n_2 odpovídající omočenému obvodu O_1 (viz obr. 3.5). Proto je přidána i pozice, pro kterou platí podmínka:

$$y_i > H \wedge y_{i+1} < H \quad (3.28)$$

Takto provedeným výběrem vznikne nový vektor drsnostních součinitelů n_{pod} , který počtem prvků i jejich pozicemi odpovídá vektoru jednotlivých omočených obvodů O_i . Výsledný drsnostní součinitel koryta je následně vypočten dle rovnice:

$$n = \frac{\left(\sum_{i=1}^{m_{pod}+1} O_i n_{pod,i}^{1,5} \right)^{\frac{2}{3}}}{O^{\frac{2}{3}}} \quad (3.29)$$

Na závěr je vypočten hydraulický poloměr dle vztahu 3.8, Chézyho rychlostní součinitel dle vztahu 3.6 a šířka profilu koryta v úrovni hladiny dle vztahu:

$$B = x_{H,2} - x_{H,1} \quad (3.30)$$

Pokud by byla vstupní hodnota úrovně hladiny zadána tak, že se nenachází v prostoru zadané geometrie profilu koryta, je funkce ošetřena podmínkou, kdy jsou za takovéto situace vráceny výstupní proměnné jako NaN (not a number). Výpočet díky tomu není přerušen, ale uživatel je upozorněn na chybu.

Takto připravená funkce si našla široké uplatnění v hydraulických výpočtech v rámci práce a autor pevně věří, že ji bude využívat i nadále v praxi.

3.2.4 Okrajové podmínky

Jak již bylo zmíněno, pro možnost výpočtu metodou po úsecích je nutné znát úroveň hladiny v prvním profilu, ze kterého je výpočet „odstartován.“ Pro tyto potřeby bylo v rámci práce využito výpočtu úrovně hladiny za předpokladu ustáleného rovnoměrného proudění a dále výpočtu přepadu přes širokou korunu. Pro výpočet horní hladiny nad elektrárnou, která se nachází v profilu jezu, bylo využito výpočtu přepadu přes jezové těleso.

Pro výpočet úrovně hladiny ustáleného rovnoměrného (UR) proudění ve vybraném profilu koryta pro konkrétní průtok byla vytvořena funkce f_Chezy , která problematiku řeší za použití Chézyho rovnice:

$$Q_{vyp} = CS\sqrt{Ri_0} \quad (3.31)$$

kde:

Q_{vyp} je vypočtený průtok [m^3/s]

i_0 sklon dna [-], při kterém bylo dosaženo UR proudění

C, S, R jsou hydraulické charakteristiky vypočtené funkcí f_char_pr

Funkce je opět připravena na výpočet pomocí optimalizační funkce $fminbnd$, kdy účelovou funkcí určenou k minimalizaci na základě systematicky volené úrovně hladiny je:

$$e = (Q - Q_{vyp})^2 \rightarrow min \quad (3.32)$$

kde:

Q je uvažovaný průtok v korytě [m^3/s]

Další využitou okrajovou podmínkou tedy je přepad přes širokou korunu, jehož výpočetní vztah má po vyjádření energetické přepadové výšky tvar:

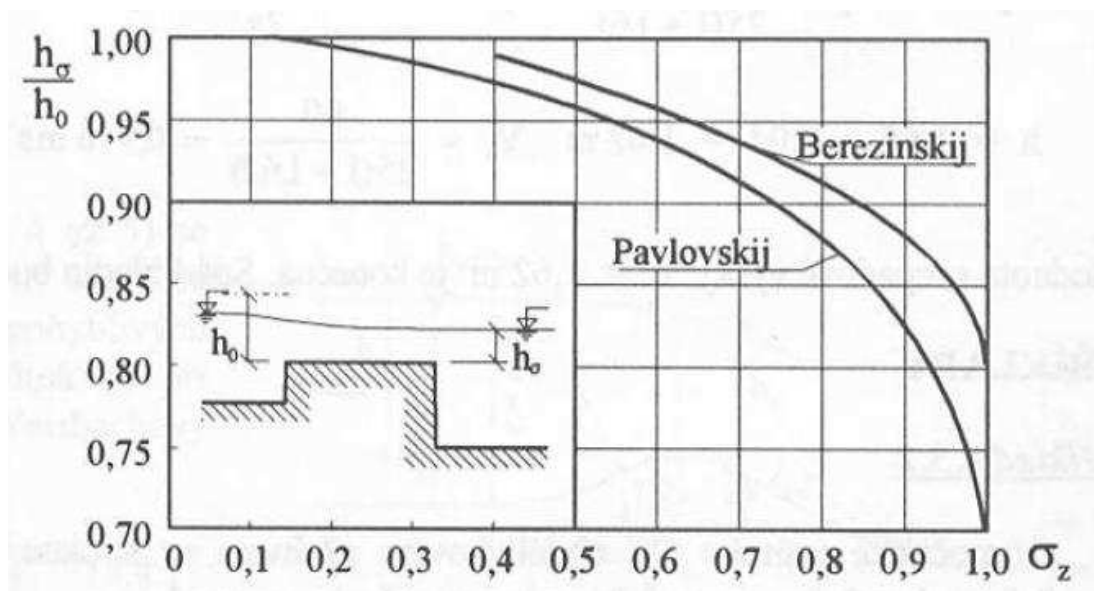
$$h_0 = \left(\frac{Q}{\sigma_z m b \sqrt{2g}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (3.33)$$

kde:

h_0 je energetická přepadová výška [m] (viz obr. 3.6)

Q průtok přes přeliv [m^3/s]

- σ_z součinitel vyjadřující zatopení dolní vodou [-] uvažovaný podle Pavlovského (viz obr. 3.6)
- m součinitel přepadu přes širokou korunu [-]
- b šířka přelivu ve směru kolmém na směr proudění [m]
- g gravitační zrychlení $g = 9,81 \text{ m/s}^2$



obr. 3.6 – Součinitel zatopení dolní vodou pro přepad přes širokou korunu [6]

Přepadová výška je poté dopočtena ze vztahu:

$$h = h_0 - \frac{\alpha v_0^2}{2g} \quad (3.34)$$

kde:

- h je přepadová výška [m]
- v_0 přítoková rychlost [m/s]

Jelikož je ale přítoková rychlost v_0 závislá na hloubce v v profilu před objektem, tedy i na přepadové výšce h , je nutné řešení provést iteračně. Postup výpočtu je naznačen v následujících bodech:

1. Výpočet úrovně hladiny pod brodem za předpokladu ustáleného rovnoměrného proudění – funkce f_{Chezy} .
2. Prvotní odhad přepadové výšky.
3. Výpočet energetické přepadové výšky dle rovnice 3.33)3.33.
4. Posouzení zatopení dolní vodou a případné zahrnutí součinitele σ_z dle obr. 3.6.

5. Výpočet přítokové rychlosti pomocí funkce f_char_pr v kombinaci s rovnicí kontinuity $v = Q/S$.
6. Výpočet přepadové výšky dle rovnice 3.34 a porovnání s odhadem. Pokud není odhad dostatečně přesný, zápis vypočtené přepadové výšky jako nový odhad.
7. Opakování kroků 5 a 6, dokud není odhad dostatečně přesný. To je zajištěno výpočetním cyklem *while* – opakuj výpočet, dokud není splněna podmínka – v našem případě, dokud není rozdíl odhadnuté a vypočtené h menší než 0,005 m.

Okrajová podmínka široké koruny byla využita při výpočtu úrovně hladiny nad brodem popsáním v kap. 2.4.

Poslední zmíněnou okrajovou podmínkou je úroveň hladiny nad jezovým tělesem, která je definována přepadem přes přelivnou hranu jezu. V tomto případě je výpočet opět proveden dle rovnice 3.33 s tím rozdílem, že není předpokládáno zatopení dolní vodou a přítoková rychlost v_0 v jezové zdrži je zanedbána. Vztah 3.33 tedy vede po přičtení výsledku k úrovni přelivné hrany jezu přímo k úrovni hladiny v nadjezí, a tedy i nad vtokem do MVE.

3.2.5 Řešení soutoku

Dalším hydraulickým jevem, na který autor v rámci práce narazil, je soutok (např. odpadního kanálu s dolním korytem řeky Berounky, který je také s metodou po úsecích úzce spjat, protože jí bylo řešeno dolní koryto pod soutokem a následně bylo řešení navázáno nad soutokem. Dá se tedy říci, že soutok udal dolní okrajovou podmínku pro možnost pokračování řešení. Soutok je možné řešit dvěma způsoby, a to větou o hybnostech kapaliny nebo energetickou bilancí. Autorem byla vybrána druhá, výpočetně méně náročná varianta.

Princip řešení soutoku metodou energetické bilance je, stejně jako metoda po úsecích, založen na Bernoulliho rovnici, takže i pro soutok platí rovnice 3.11 (str. 23). Jediným rozdílem je nemožnost řešení ztráty třením pomocí vztahu 3.3, protože průtok v horním profilu není roven průtoku dolním profilem. Tento problém autor vyřešil zavedením průměrného sklonu čáry energie mezi profily:

$$i_{E,p} = \frac{i_{E,h} + i_{E,d}}{2} \quad (3.35)$$

kde:

$i_{E,h}$ je sklon čáry energie horního profilu dle Chézyho rovnice [-] (rov. 3.36)

$i_{E,d}$ je sklon čáry energie dolního profilu dle Chézyho rovnice [-] (rov. 3.36)

$$i_E = \frac{v^2}{C^2 S^2 R} \quad (3.36)$$

Pro výpočet soutoku byla vytvořena funkce f_soutok , která svou strukturou odpovídá funkci $f_po_us_dz$ s rozdílem předdefinovaného výpočtu ztrát třením dle výše uvedených vztahů a komentáře.

3.3 Výpočet výroby průběžné MVE v prostředí Octave

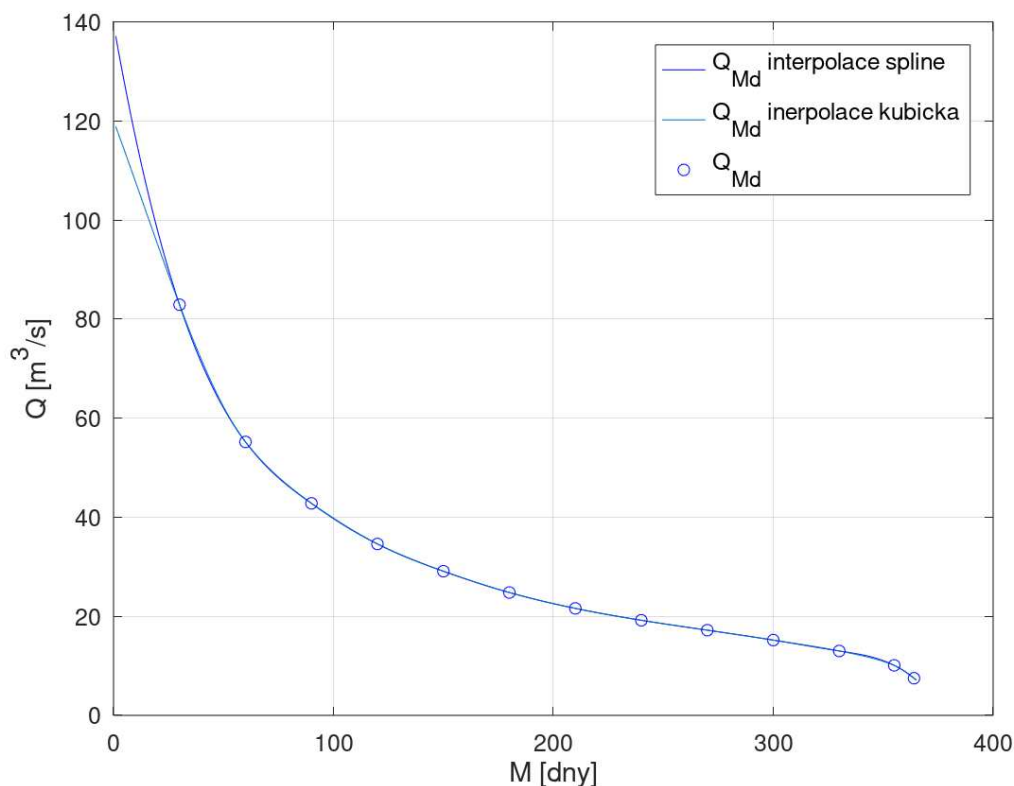
V předchozích kapitolách byl představen postup výpočtu úrovně horní a dolní hladiny nad a pod hydraulickým obvodem turbín MVE, které jsou nezbytnými okrajovými podmínkami pro výpočet výroby průběžné vodní elektrárny. Tato kapitola je zaměřena právě na postup výpočtu výroby pro danou průtokovou řadu. Problematika je opět k nalezení v běžně dostupné literatuře zabývající se malými vodními elektrárnami a využitím vodní energie [4][3][16][2] a literatura již není dále citována.

Vlastní výpočet je řízen hlavním skriptem nazvaným *prumerna_rocni_vyroba_prubezne_MVE_script*, který je, jak jeho název napovídá, připraven na výpočet na základě průtokové řady průměrných M-denních průtoků. Nicméně po drobné úpravě je aplikovatelný na jakoukoliv průtokovou řadu. Skript je připraven za předpokladu elektrárny vybavené právě dvěma turbínami, což odpovídá potřebám diplomové práce.

V hlavičce skriptu jsou definovány vstupní parametry – parametry horní okrajové podmínky (jezu), dolní okrajové podmínky (brod, odpadní kanál), vtokového objektu, hydrologie (průtoková řada, minimální zůstatkový průtok), strojní části (parametry turbín, generátoru atp.). Textové soubory s geometriemi příčných profilů a jejich drsnostních součinitelů musí být před výpočtem v požadovaném tvaru připraveny v pracovním adresáři.

V prvním kroku výpočtu je provedena interpolace/extrapolace řady M-denních průtoků pro každý den v roce. Interpolační metodou může být variantně kubická interpolace nebo interpolace pomocí spline. Dle srovnání na obr. 3.7 je patrné, že se až

na extrapolované hodnoty výsledky prakticky neliší. Pro další výpočty byla vybrána interpolace pomocí spline, jejíž extrapolovaný průběh připadá autorovi přirozenější.



obr. 3.7 – Porovnání metod interpolace M-denních průtoků

Následně je vypočten průběh čáry trvání průtoků vodní elektrárnou, který je možný vyjádřit vztahem:

$$Q_{VE,i} = \max(\min(Q_{VE,max}; Q_{Md,i} - MZP); 0) \quad (3.37)$$

kde:

$Q_{VE,i}$ je průtok zpracováváný MVE pro i-tý den v roce [m^3/s]

$Q_{VE,max}$ maximální zpracovatelný průtok MVE (součet hltností turbín) [m^3/s]

$Q_{Md,i}$ M-denní průtok pro i-tý den v roce z interpolované řady [m^3/s]

MZP minimální zůstatkový průtok [m^3/s]

Dalším krokem je výpočet úrovně horní a dolní vody, kdy vstupují do hry hydraulické výpočty popsané v kap. 3.2. Výpočet úrovně hladiny horní vody je popsán na konci kapitoly 3.2.4. Pro výpočet úrovně dolní vody byla vytvořena funkce f_{H_dol} , která svou strukturou odpovídá algoritmu na obr. 3.4. Od jasně definované dolní okrajové podmínky je tedy metodou po úsecích s případným vstupem řešení soutoku řešen průběh hladin dolní vody až po profil bezprostředně pod výtokem MVE pro celou průtokovou

řadu. H_{dol} pak je definována jako úroveň hladiny tohoto profilu. Aplikace $f_{H_{dol}}$, která je variantně upravována, je u konkrétních řešení v následujících kapitolách popsána. Pro výsledky průběhu hladin pod elektrárnou je v rámci výpočtu zkontrolována platnost předpokladu říčního proudění výpočtem Froudova čísla dle rov. 3.16. Požadavkem je, aby podmínka $Fr < 1$ platila pro všechny dolní profily v celé průtokové řadě. Pro možnost kontroly je na základě logické operace vypočtena proměnná *kontrola*, pro kterou platí: $kontrola \geq 1 \Rightarrow$ alespoň v jednom profilu při alespoň jednom průtoku dojde ke vzniku bystrinného proudění.

Před výpočtem výkonu je pro navrhované varianty na základě hlavní univerzální charakteristiky a zákonů hydraulické podobnosti turbín vypočten průměr oběžného kola a otáčky navrhované turbíny dle vztahů:

$$D_{OK} = \sqrt{\frac{Q_{turb,opt}}{Q_{11,opt}\sqrt{H_{opt}}}} \quad (3.38)$$

$$n = n_{11,opt} \frac{\sqrt{H_{opt}}}{D_{OK}} \quad (3.39)$$

kde:

D_{OK} je průměr oběžného kola turbíny [m]

$Q_{turb,opt}$ optimální průtok turbínou, volen jako 85 % hlnosti turbíny [m^3/s]

$Q_{11,opt}$ optimální průtok jednotkovou turbínou (bod dosažení max. účinnosti) [m^3/s] dle hlavní univerzální charakteristiky

H_{opt} optimální spád, volený iteračně, [m]

n otáčky navržené turbíny [ot./min]

$n_{11,opt}$ otáčky jednotkové turbíny při max. účinnosti [ot./min] dle hl. un. char.

Výkon vodní turbíny na prahu vodní elektrárny [W] je vypočten dle vztahu:

$$P_{turb,i} = \rho g H_{netto,i} Q_{turb,i} \eta_{turb,i} \eta_p \eta_g \eta_t \quad (3.40)$$

Vztah je možné za předpokladu hustoty vody $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ upravit:

$$P_{turb,i} = g H_{netto,i} Q_{turb,i} \eta_{turb,i} \eta_p \eta_g \eta_t \quad (3.41)$$

kde:

$P_{turb,i}$ je výkon na prahu vodní elektrárny [kW]

g gravitační zrychlení $9,81 \text{ m/s}^2$

$H_{netto,i}$	čistý spád [m]
$Q_{turb,i}$	průtok turbínou [m ³ /s]
$\eta_{turb,i}$	účinnost turbíny zahrnující mechanické a hydraulické ztráty interpolovaný z hlavní univerzální charakteristiky [-]
η_p	účinnost převodu mezi turbínou a generátorem [-]
η_g	účinnost generátoru [-]
η_t	účinnost transformátoru
i	index vyjadřující výpočet pro i-tý člen průtokové řady, resp. i-tý den v roce (platí i pro další vztahy v kapitole)

Čistý spád je vypočten dle vztahu:

$$H_{netto,i} = H_{hor,i} + \frac{\alpha_{hor,i} v_{hor,i}^2}{2g} - H_{dol,i} - \frac{\alpha_{dol,i} v_{dol,i}^2}{2g} - (\sum h_z)_i \quad (3.42)$$

kde:

$H_{hor,i}$	je úroveň horní hladiny [m n. m.]
$H_{dol,i}$	úroveň dolní hladiny [m n. m.]
$\alpha_{hor}, \alpha_{dol}$	Coriolisova čísla horního a dolního profilu [-]
V_{hor}, V_{dol}	průřezové rychlosti horního a dolního profilu [m/s], kdy je předpokládáno, že v jezové zdrži $v_{hor} \approx 0 \Rightarrow$ zanedbání členu
$\sum h_z$	součet všech hydraulických ztrát na spádu, které nejsou zahrnuty do účinnosti turbíny [m]

Mezi hydraulické ztráty, které byly uvažovány, patří ztráty na jemných česlích a ztráty na vtoku do tlakového obvodu turbín.

Ztráty na jemných česlích lze vyjádřit dle vztahu:

$$h_{zc,i} = \beta \left(\frac{s}{b}\right)^{\frac{4}{3}} \frac{Q_{turb,i}^2}{(S_c n_{zan})^2 2g} \sin \alpha_c k_\delta k_p \quad (3.43)$$

kde:

$h_{zc,i}$	je ztráta na česlích [m]
β	tvárový součinitel česlic [-] (viz obr. 3.8)
s	šířka česlic [m]
b	světla vzdálenost česlic [m]

- S_c průtočná plocha v profilu česlí bez uvažování zmenšení profilu konstrukcí česlí [m²]
- n_{zan} součinitel vyjadřující zanesení profilu česlí [-] ve výpočtech uvažována hodnota 0,9 (10 % plochy zaneseno)
- α_c úhel roviny česlí od vodorovné roviny [°]
- k_δ koeficient zahrnující šikmost obtékání česlí [-]
- k_p koeficient zahrnující vliv podpěr česlí [-] (uvažováno $k_p = 2$)

Profil				
Tvarový součinitel β	2,42	1,83	1,64	1,79

obr. 3.8 – Tvarový součinitel česlic β [10]

Ztráty na vtoku do tlakové části za česlemi, které zahrnují i ztráty změnou průřezu z obdélníkového na kruhový profil jsou vypočteny dle vztahu:

$$h_{z,vtok,i} = \xi_{vtok} \frac{Q_{turb,i}^2}{\left(\frac{\pi D_{vtok}^2}{4}\right)^2} \quad (3.44)$$

kde:

$h_{z,vtok,i}$ je ztráta na vtoku [m]

ξ_{vtok} součinitel místní ztráty vtokem včetně ztráty změnou průřezu [-]
(ve výpočtech uvažován 0,25)

D_{vtok} průměr koncového kruhového profilu vtoku [m]

V případě výpočtu výroby za stávajícího stavu MVE nebyla místní ztráta vtokem uvažována, a to z důvodu nátoku na turbínu přímo z kašny, kdy je předpokládáno zahrnutí ztráty do účinnosti turbíny.

Stanovení účinnostních součinitelů v rovnici 3.41 bude specifikováno v následujících kapitolách pro konkrétní případy. Ale je možné předeslat, že v případě stávajícího stavu byly zvoleny jako konstanty. V případě nového návrhu je účinnost generátoru η_g interpolována z grafu zjednodušeně v závislosti na procentuálním průtoku turbínou (ve vztahu k maximální hltnosti). Účinnost turbíny je získána 2D interpolací z hlavní univerzální charakteristiky turbíny, kde je účinnost závislá na hodnotách n_{11} a Q_{11} . Tyto hodnoty jsou dopočteny opět dle zákonů hydraulické podobnosti turbín:

$$Q_{11,i} = \frac{Q_{turb,i}}{D_{OK}^2 \sqrt{H_{netto,i}}} \quad (3.45)$$

$$n_{11,i} = \frac{nD_{OK}}{\sqrt{H_{netto,i}}} \quad (3.46)$$

Pro výpočet výkonu jedné turbíny na prahu vodní elektrárny dle rovnice 3.41 byla vytvořena funkce f_char_turb , která ho na základě všech potřebných vstupních parametrů dle rovnic 3.41 až 3.46 řeší. Nicméně ještě nebyla specifikována jedna zásadní proměnná výpočtu, a tou je průtok turbínou $Q_{turb,i}$, resp. optimální rozdělení celkového využitelného průtoku elektrárnou $Q_{VE,i}$. Jelikož je předpokládáno, že může nastat situace, kdy nejsou navrženy dvě turbíny se stejnými parametry, jsou zváženy následující tři varianty:

1. v chodu pouze turbína T1, která využívá $Q_{VE,i}$, ale nikdy ne více, než je její hltnost
2. v chodu pouze turbína T2, která využívá $Q_{VE,i}$, ale nikdy ne více, než je její hltnost
3. v chodu obě turbíny využívající $Q_{VE,i}$ v optimálním rozdělení

Pro každou variantu je pomocí funkce f_char_turb pro každý člen průtokové řady (den v roce) vypočten celkový výkon na prahu elektrárny – v případě třetí varianty se jedná o součet výkonů obou turbín – a je vybrána ta varianta, která vykazuje maximální výkon. Pro vybranou variantu jsou zapsány výsledky do příslušných matic.

Pozorný čtenář si teď pravděpodobně klade otázku, co je optimální rozdělení ve třetí variantě. Výpočetní script nabízí možnost výběru dvou variant řešení. Jednou je uživatelské rozdělení průtoku, která se pro dvě stejná soustrojí při rozdělení 1:1 skutečně ukázala jako optimální, resp. oproti optimálnímu řešení (viz dále) nebyl po zaokrouhlení v konečné výrobě rozdíl.

Druhou variantou je nalezení optimálního rozdělení průtoků pomocí optimalizační funkce. Pro potřeby výpočtu byla vytvořena poměrně jednoduchá funkce f_2_turb připravená pro „volání“ pomocí, již v práci několikrát zmíněné, optimalizační funkce $fminbnd$. Vstupní proměnnou funkce je průtok turbínou T1 (Q_{T1} [m^3/s]), vstupními parametry pak jsou parametry obou turbín a $Q_{VE,i}$. Průtok druhou turbínou je následně dopočten dle vztahu:

$$Q_{T2} = \min(Q_{VE} - Q_{T1}; Q_{T2,max}) \quad (3.47)$$

kde:

$Q_{T2,max}$ je maximální hltnost turbíny T2

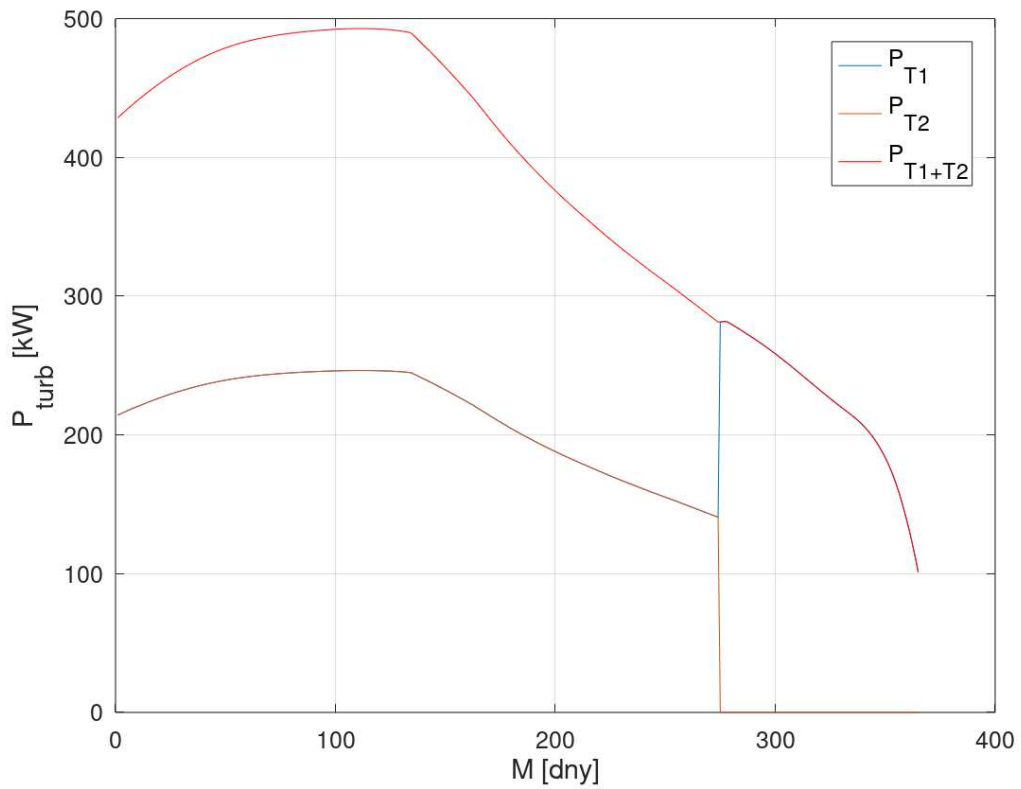
Na základě vypočteného rozdělení průtoků funkce f_{2_turb} pomocí funkce f_{char_turb} dopočte výkony na prahu elektrárny pro obě turbíny P_{T1} a P_{T2} [kW]. Na závěr je již jen definována výstupní proměnná – účelová funkce určená k minimalizaci algoritmem $fminbnd$:

$$e = -(P_{T1} + P_{T2}) \rightarrow \min \quad (3.48)$$

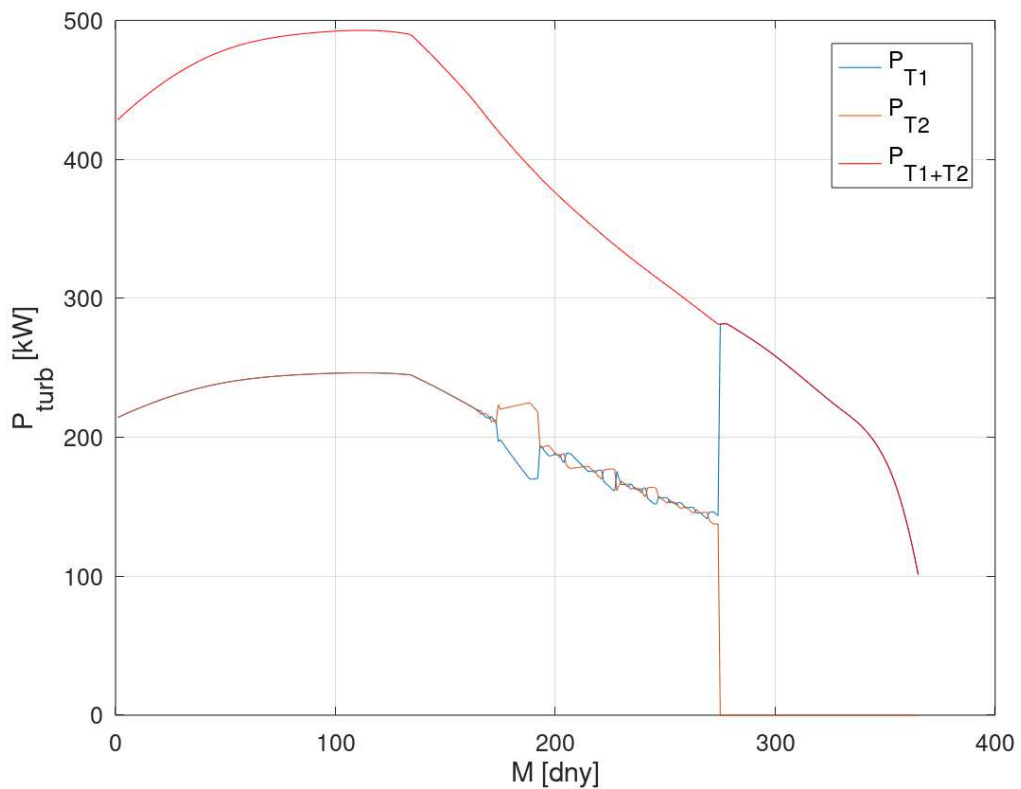
Znaménkem mínus před účelovou funkcí byl minimalizační problém převeden na maximalizační. Výsledkem (a zároveň výstupní proměnnou) tedy je nejmenší možná záporná hodnota účelové funkce, což je v absolutní hodnotě maximální výkon dosažitelný optimálním rozdělením pro daný $Q_{VE,i}$. Druhou výstupní proměnnou je průtok Q_{T1} , při kterém algoritmus dokonvergoval k řešení. Optimalizační funkce $fminbnd$ byla vybrána opět pro její nutnost zadání hranic hodnot vstupní proměnné, pro které je hledáno řešení. Jako minimum byla zvolena 0 a maximem je hltnost turbíny T1.

Pro srovnání výsledků optimalizace a manuálního rozdělení průtoků jsou na obr. 3.9 a obr. 3.10 uvedeny náhodně vybrané výsledky čar trvání výkonů pro případ dvou stejných turbín. Jak již bylo uvedeno, výsledná výroba vychází v tomto případě po zaokrouhlení totožná, ale průběh výkonů jednotlivých turbín pro optimalizační řešení se zdá být místy poněkud „divoký.“ Je tomu z důvodu nalezení optimálního řešení pro jiné rozdělení průtoků, než je 1:1, kdy rozdíl činí cca 0,01 kW. Bohužel není v autorových silách tento jev odstranit. Nicméně průběh součtu výkonů je přirozeně hladký. Právě z důvodu zvláště působícího průběhu a také z důvodu úspory výpočetního času je v dalších výpočtech za stavu dvou stejných turbín využito manuálního rozdělení. Ale pro situaci jedné větší a jedné menší turbíny se autorovi jeví varianta optimalizace jako prakticky jediná možná (příklad výsledků viz obr. 3.11).

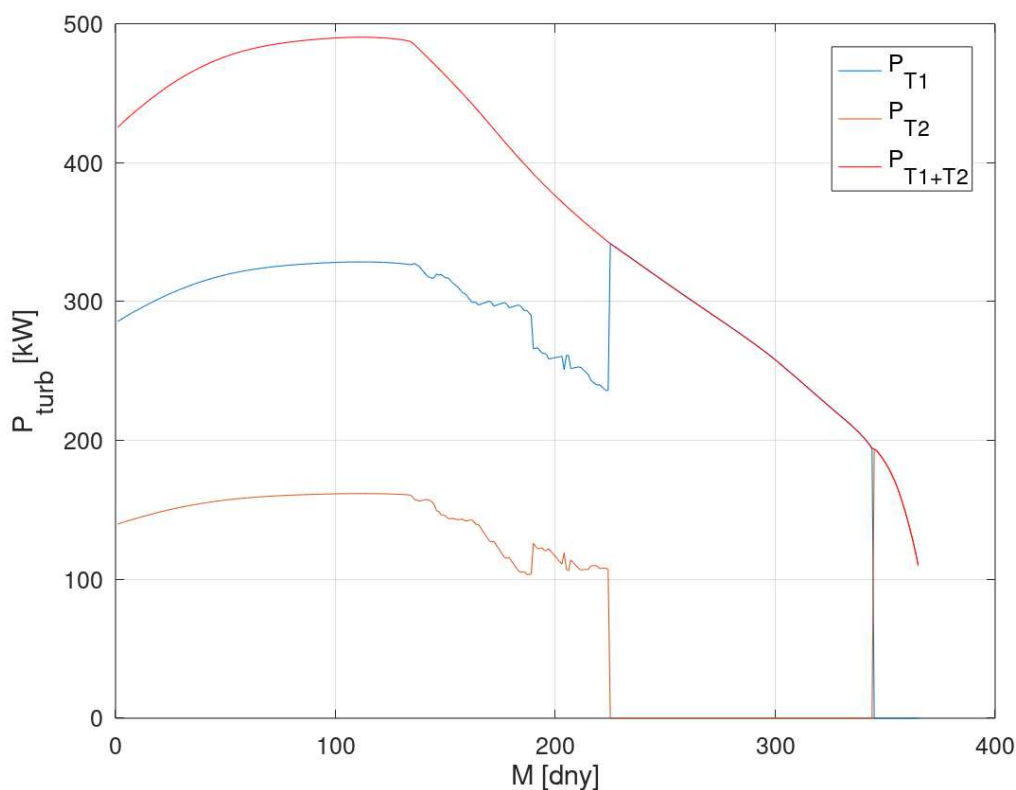
V kapitole zatím nebyla pospána definice minimálního provozního průtoku turbínami. Ta je stanovena na základě hlavní univerzální charakteristiky – v případě, kdy se výpočet dostane do stavu, kdy by měl interpolovat mimo poskytnutou univerzální charakteristiku, jsou vráceny hodnoty NaN (not a number), což je považováno za odstavení turbín. V případě výpočtu stávajícího stavu, kdy není univerzální charakteristiky využito, je minimální provozní průtok nastaven manuálně – odstavení turbín na základě definované minimální dolní provozní hladiny.



obr. 3.9 – Čáry trvání výkonů dvou stejných turbín při manuálním rozdělení průtoků 1:1



obr. 3.10 - Čáry trvání výkonů dvou stejných turbín při použití optimalizační funkce



obr. 3.11 – Čáry trvání výkonů dvou turbín – poměr hltností 2:1 – při použ. optim. funkce

Po ukončení výpočtu výkonů jednotlivých turbín na prahu vodní elektrárny je možné přistoupit k výpočtu celkové výroby elektrické energie vodní elektrárnou, ta je definována jako součtová čára výkonů:

$$E = \sum_{i=1}^N \frac{P_{VE,i} dT}{1000} \quad (3.49)$$

kde:

- E je celková výroba vodní elektrárny v průtokové řadě [MWh]
- $P_{VE,i}$ celkový výkon na prahu vodní elektrárny [kW]
- dT časový interval trvání jednoho průtoku řady [h] (24 h pro interp. Q_{Md})
- N počet prvků průtokové řady (365 hodnot pro výpočet v roce)

Jako poslední je pro návrhové varianty vypočteno minimální zanoření stropu vtoku proti vzniku vtokového víru dle vztahu J. L. Gordona pro vtoky méně náchylné na vznik vtokového víru:

$$S_p = 0,545 v_{vtok} D_{vtok}^{0,5} \quad (3.50)$$

kde:

- S_p je minimální zanoření stropu vtoku od horní min. prov. hladiny [m]

V_{vtok} průřezová rychlost proudění v koncovém profilu vtoku [m/s]

D_{vtok} průměr koncového, kruhového profilu vtoku [m]

Na úplný závěr jsou vykresleny výsledky v podobě grafů. Ty jsou přiloženy pro konkrétní výpočty v následujících kapitolách.

Autor nechtěl čtenáře zatěžovat uváděním výpočetní syntaxe v jazyce Octave do textové části práce, proto raději zvolil popis pomocí rovnic, schémat a slov. Vlastní výpočetní scripty a funkce jsou pro zájemce k nalezení na přiloženém datovém CD nosiči. Pro jejich otevření je doporučeno využití softwaru Octace, který je ke stažení zdarma z oficiálních webových stránek. Soubory by mělo být možné otevřít i v prostředí MATLAB, nicméně možnost spuštění výpočtu není otestována.

4 Zhodnocení stávajícího stavu MVE

4.1 Stavebně technický stav

Stávající stav MVE Dobřichovice byl podrobně popsán v kapitole 3. Elektrárna se nachází v relativně dobrém, provozuschopném stavu. Betonové konstrukce spodní stavby strojovny včetně konstrukcí vtoku a výtoku, které byly vlivem užívání stavby degradovány, prošly udržovacími pracemi a jejich stav je považován i výhledově za provozuschopný. Varianta zachování stavební části stávající strojovny tedy připadá v úvahu.

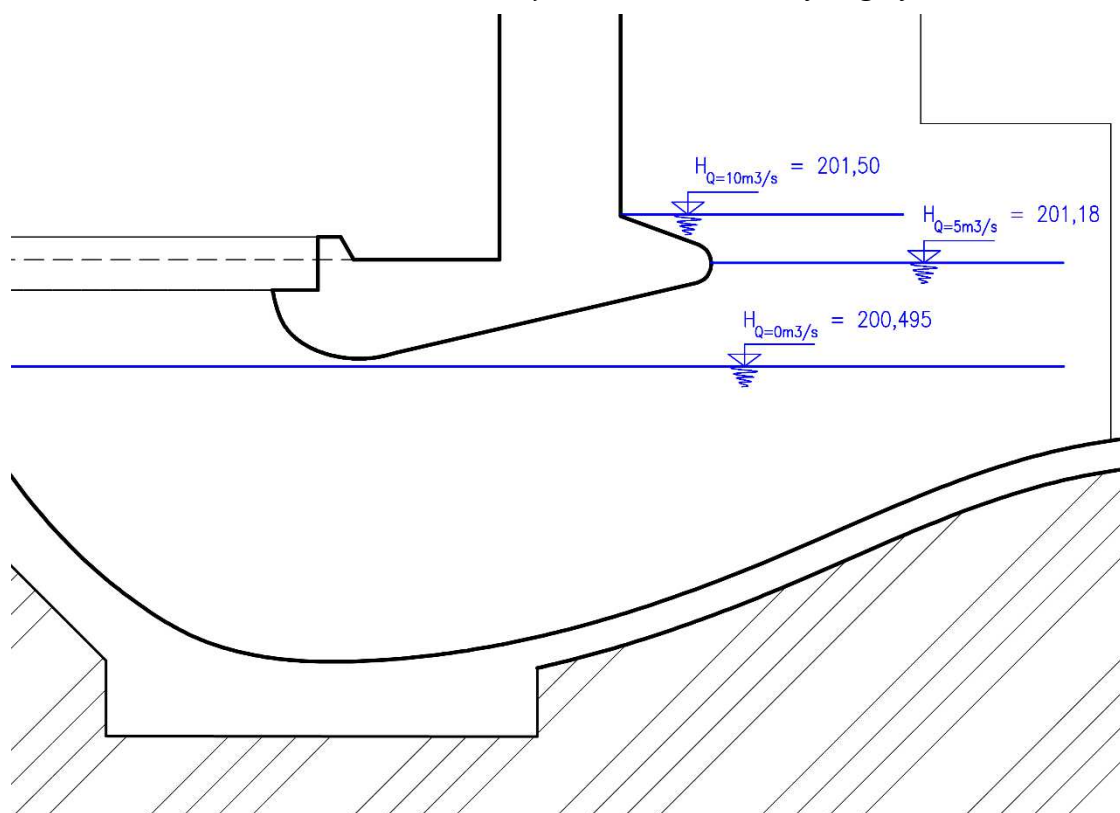
Dne 28.8.2014 proběhlo za běžného vodního stavu geodetické zaměření lokality [11] včetně průběhu hladiny v odpadním kanále při plném chodu MVE ($10 \text{ m}^3/\text{s}$). V profilu odpadního kanálu cca 5,6 m pod výtokovým profilem savek byla zaměřena úroveň hladiny 201,39 m n. m., v profilu ústí odpadního kanálu byla úroveň hladiny 200,71 m n. m. a v profilu pod jezem byla zaměřena úroveň hladiny 200,83 m n. m. Zároveň úroveň hladiny v nadjezí byla zaměřena 202,94 m n. m., což odpovídá průměrné výšce přepadového paprsku 27 cm, a tedy přepadu přes jez $29,8 \text{ m}^3/\text{s}$ (výpočet viz následující podkapitola). Dle měření tedy byl rozdíl hladin profilu ústí odpadního kanálu a podjezí 12 cm, zato vzduť vytvořené v délce odpadního kanálu činilo 68 cm. Z toho vyplývá, že i při téměř trojnásobném průtoku v podjezí oproti průtoku odpadním kanálem byla úroveň hladiny pod elektrárnou o 56 cm výše nežli v podjezí. Ačkoliv ze stavebního hlediska působí opevnění odpadního kanálu dojmem dobrého, stabilního stavu, z hlediska hydraulického je nutné konstatovat, že odpadní kanál je značně nekapacitní, kvůli čemuž derivace prakticky ztrácí smysl, ba naopak stav zhoršuje.

Při osobní prohlídce lokality byla za různých provozních stavů (v chodu obě turbíny na plné hltnosti – celkem $10 \text{ m}^3/\text{s}$; v chodu jedna turbína při plné hltnosti $5 \text{ m}^3/\text{s}$; úplné odstavení obou turbín) technickou nivelací zaměřena úroveň hladiny bezprostředně pod výtokovým profilem savek turbín. Jako výchozí bod měření bylo využito nivelačního bodu na lávce přemostující odpadní kanál, který zde byl umístěn při geodetickém zaměření lokality. Díky tomu jsou výsledky měření v souřadném systému Bpv. Úrovně hladiny jsou orientačně naznačeny na fotografii zachycující stav při úplném odstavení turbín (obr. 4.1) a skice na obr. 4.2. Ze zákresu hladin do skici, která odpovídá dokumentaci stávajícího stavu, je patrné, že úroveň zanoření stropu savek je již při stávajícím stavu „na hraně“ a zkapacitnění odpadního kanálu by pravděpodobně mělo při

zachování stávající technologie za následek přisávání vzduchu do hydraulických obvodů turbín a následnou kavitaci, kterou by byly pravděpodobně nejvíce zasaženy lopatky oběžných a rozváděcích kol. Autorovo doporučení je v případě zachování stávajících turbín nezasahovat do stávajícího stavu odpadního kanálu.



obr. 4.1 – Orientační zakreslení zaměřených úrovní hladin do fotografie odst. stavu

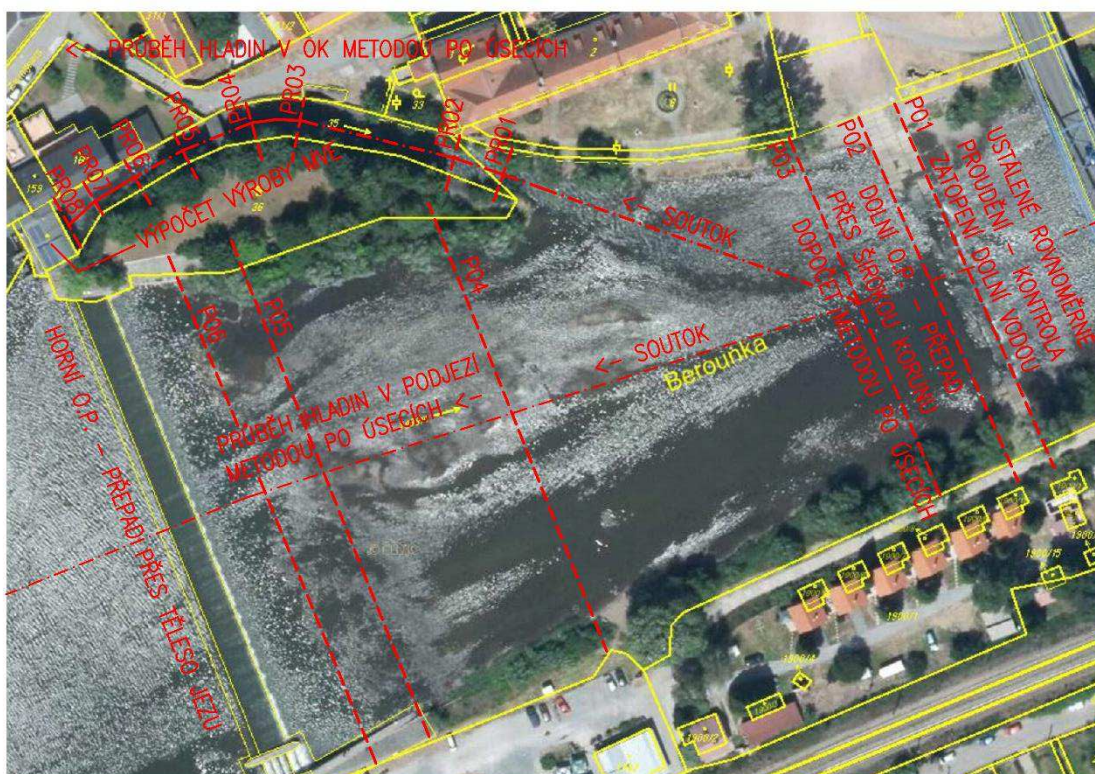


obr. 4.2 – Zakreslení zaměřených úrovní hladin do skici koncového profilu savky

Strojní část MVE tvoří dvě kašnové Francisovy turbíny, jejichž účinnost, která se pohybuje okolo 70 %, je v porovnání se soudobými typy turbín znatelně nižší. Kupříkladu účinnost přímoproudých Kaplanových turbín při optimálním využití přesahuje 90 %. Výměnou strojního vybavení by tedy mohlo dojít k výraznému navýšení výroby. Navíc je s novou technologií otevřena možnost zkapacitnění odpadního kanálu, čímž by vlivem navýšení spádu byla výroba elektrické energie navýšena ještě výrazněji.

4.2 Výpočet výroby elektrické energie MVE za stávajícího stavu

Pro výpočet navýšení výroby elektrické energie v průměrném roce vlivem rekonstrukce vodní elektrárny je nutné nejprve vypočítat výrobu při stávajícím stavu. K tomu byl využit výpočetní program popsáný v kapitole 4. Nicméně před zahájením výpočtu je nutné provést kalibraci modelu tak, aby co nejpřesněji odpovídal skutečnosti. Schéma modelu je pro lepší představu postupu výpočtu naznačeno do katastrální ortofoto mapy [18] na obr. 4.3.



obr. 4.3 – Praktické schéma výpočetního modelu [18]

Z obr. 4.3 je patrné, že bylo definováno 6 příčných profilů koryta Berounky (P01 – P06) a 8 příčných profilů odpadního kanálu (PR01 – PR08). Dále byly definovány další 4 profily popisující úseky mezi koncovými profily savek a dolními zhlavími dělících pilířů (není na obr. 4.3 z prostorových důvodů vyznačeno). Oblast podjezí (P04 – P06)

není pro vlastní výpočet výroby MVE využita, byla definována pouze pro potřeby kalibrace parametrů koryta řeky na základě zaměřené úrovně hladiny v podjezí. Postup výpočtu je tedy následující:

1. Výpočet horní okrajové podmínky – úroveň hladiny v nadjezí z rovnice přepadu.
2. Výpočet dolní okrajové podmínky – úroveň hladiny v profilu P02 nad brodem z rovnice přepadu přes širokou korunu se zohledněním zatopení dolní vodou. Úroveň hladiny v profilu P01 pod brodem vypočtena na základě předpokladu ustáleného rovnoměrného proudění.
3. Výpočet úrovně hladiny v dolním profilu soutoku s odpadním kanálem P03 metodou po úsecích.
4. Výpočet úrovně hladiny v dolním profilu odpadního kanálu PR01 výpočtem soutoku na základě Bernoulliho rovnice.
5. Výpočet úrovní hladin v profilech odpadního kanálu PR02 – PR08.
6. Výpočet úrovní hladin bezprostředně pod savkami pro jednotlivá pole metodou po úsecích, kdy výchozí úrovně hladin v profilech dolního zhlaví dělicích pilířů v jednotlivých polích odpovídají úrovni hladiny v PR08. Tento krok byl proveden z důvodu poměrně velké délky úseku mezi výtakovými profily a dolními zhlavími pilířů (2,64 m) a zároveň z důvodu poměrně strmého záporného sklonu dna v tomto úseku, kdy je předpokládána nezanedbatelná křivka snížení ve směru proudu.
7. Výpočet výkonu turbín na prahu vodní elektrárny.
8. Opakování postupu pro každý člen průtokové řady (každý den v roce).
9. Výpočet výroby elektrické energie MVE součtovou čarou čáry trvání výkonů.

4.2.1 Kalibrace parametrů hydraulické části modelu

Hydraulickou částí modelu se rozumí ta část modelu, ve které jsou počítány úrovně hladin a průtokové charakteristiky profilů nad a pod vodní elektrárnou. Parametry technologické části MVE sem tedy nepatří.

Kalibrace hydraulických parametrů přelivných objektů a uvažovaných příčných profilů byla provedena na základě geodetického zaměřením úrovní hladin [11] tak, aby hodnoty parametrů odpovídaly rozsahům hodnot uváděných v literatuře.

Problematickou částí kalibrace je stanovení průtoku řekou Berouňkou v době měření. Jelikož průtok není uveden v technické zprávě geodetického zaměřením a

vzhledem k datu měření 28.8.2014 a vzdálenosti neblíže položeného měrného profilu měřícího průtok cca 15 km je zpětné dohledání průtoky velmi problematické. Proto se autor rozhodl pro odhad průtoky na základě výpočtu přepadu přes těleso jezu.

Délka přelivné hrany včetně pravobřežního rybího přechodu, jehož výšková úroveň přelivné hrany odpovídá úrovni přelivné hrany jezu, byla na základě zaměření odečtena jako $B_{jez} = 119,92$ m. Součinitel přepadu přes nízký jez lichoběžníkového tvaru o sklonu přelivné plochy 1:5 byl na základě literatury [15] stanoven jako $m_{jez} = 0,40$. Jedná se o horní hodnotu, která byla zvolena z důvodu předpokladu mírného zaoblení přelivné hrany. Průměrná úroveň přelivné hrany byla na základě zaměření stanovena váženým průměrem jako $H_{jez} = 202,67$ m n. m. a úroveň hladiny v nadjezí byla zaměřena $H_{hor} = 202,94$ m n. m. Z rovnice přepadu byl dopočten průtok přepadající přes jez:

$$\begin{aligned}
 Q_{jez} &= m_{jez} B_{jez} \sqrt{2g} (H_{hor} - H_{jez})^{\frac{3}{2}} \\
 Q_{jez} &= 0,40 * 119,92 * \sqrt{2 * 9,81} * (202,94 - 202,67)^{\frac{3}{2}} \quad (4.1) \\
 Q_{jez} &= 29,81 \frac{m^3}{s}
 \end{aligned}$$

Odhad parametrů byl verifikován na základě podmínky převodu minimálního zůstatkového průtoky, který je dle povolení k nakládání s povrchovými vodami [13] definován jako $MZP = 4,65$ m³/s a jeho kontrola je prováděna nepřímo pomocí vodočetné latě, kdy MZP je dosaženo, právě když je úroveň hladiny horní vody $H_{hor,MZP} = 202,75$ m n. m. Kontrola byla provedena vyjádřením úrovně hladiny horní vody z rovnice přepadu:

$$\begin{aligned}
 H_{hor,MZP} &= \left(\frac{MZP}{m_{jez} B_{jez} \sqrt{2g}} \right)^{\frac{2}{3}} + H_{jez} \\
 H_{hor,MZP} &= \left(\frac{4,65}{0,4 * 119,92 * \sqrt{2 * 9,81}} \right)^{\frac{2}{3}} + 202,67 \quad (4.2) \\
 H_{hor,MZP} &= 202,748 \doteq 202,75 \text{ m n. m.}
 \end{aligned}$$

Takto odhadnutý průtok v době měření je dle autorova názoru pro účely studie proveditelnosti dostačující. Za stavu chodu elektrárny na maximální provozní průtok 10 m³/s byl tedy průtok pod soutokem s odpadním kanálem 39,81 m³/s. Na tento průtok byla kalibrována dolní okrajová podmínka přepadu přes širokou korunu (přes konstrukci brodu). Parametry brodu jsou průměrná výška přelivné hrany – na základě zaměření

stanovena jako $H_{\text{brod}} = 200,05$ m n. m., průměrná délka přelivné hrany – odečtena ze situačního výkresu v S-JTSK jako $B_{\text{brod}} = 64$ m. Průměrná úroveň hladiny nad brodem byla dle zaměření 200,60 m n. m., která dle výpočtu uvedeném v kap. 3.2.4 odpovídá součiniteli přepadu přes širokou korunu $m_{\text{brod}} = 0,30$ (podle Pikalova [15] odpovídá charakteristice přepadu – ostrá vstupní hrana a mimořádně drsný práh – popis odpovídá realitě).

Dále byly kalibrovány drsnostní parametry jednotlivých příčných profilů koryta Berounky a následně odpadního kanálu. Geometrie příčných profilů byla vytvořena na základě geodetického zaměření. V případě odpadního kanálu byly výpočetní profily umístovány co nejbližše zaměřeným profilům s ohledem na co nejvěrnější popis změn průřezu. Lokace zaměřených úrovní hladin v některých případech neodpovídaly vybranému umístění příčných profilů, a proto byly pro snadnější porovnávání s výpočtem v profilech uvažovány lineárně interpolované úrovně zaměřených hladin. V případě koryta Berounky, kde je zaměření poněkud skromné, bylo v profilech uvažováno vodorovné dno a průměrný podélný sklon dna 2,7 ‰, který byl i vstupním parametrem pro výpočet ustáleného rovnoměrného proudění profilu P01. Vypočtené úrovně hladin ostatních profilů byly získány metodou po úsecích, popř. výpočtem soutoku. Předpoklad vodorovného dna vedl při kalibraci k poměrně vysokým hodnotám drsnostních součinitelů, předpokládá se tedy zahrnutí nerovnoměrností dna do hodnot součinitelů. Při kalibraci bylo dále v opodstatněných případech (změna geometrie příčného profilu) využito součinitelů místních ztrát. Hodnoty drsnostních součinitelů a součinitelů místních ztrát přiřazených konkrétním geometriím profilů jsou k nalezení na přiloženém CD (např. pro profil PR01 – soubor geometrie *PR01.txt*, soubor drsnostních součinitelů *n_PR01.txt*, vektor součinitelů místních ztrát *ksi_m.txt*, kdy i -tý člen datové řady je součinitel místní ztráty mezi profily s číselnými označeními $i-1$ a i). V práci jsou uvedeny pouze rozsahy použitých hodnot. Hodnoty součinitelů byly voleny s ohledem na rozsahy hodnot uváděných v literatuře [14][6][3].

Rozsahy hodnot drsnostních součinitelů pro koryto Berounky:

- kamenná dlažba na cementovou maltu: $n = 0,025 - 0,035$
- přirozené dno řečiště: $n = 0,027 - 0,045$
- svah zarostlý travním, keřovým, strom. porostem $n = 0,040 - 0,075$
- ocelové profily Larsen $n = 0,050$

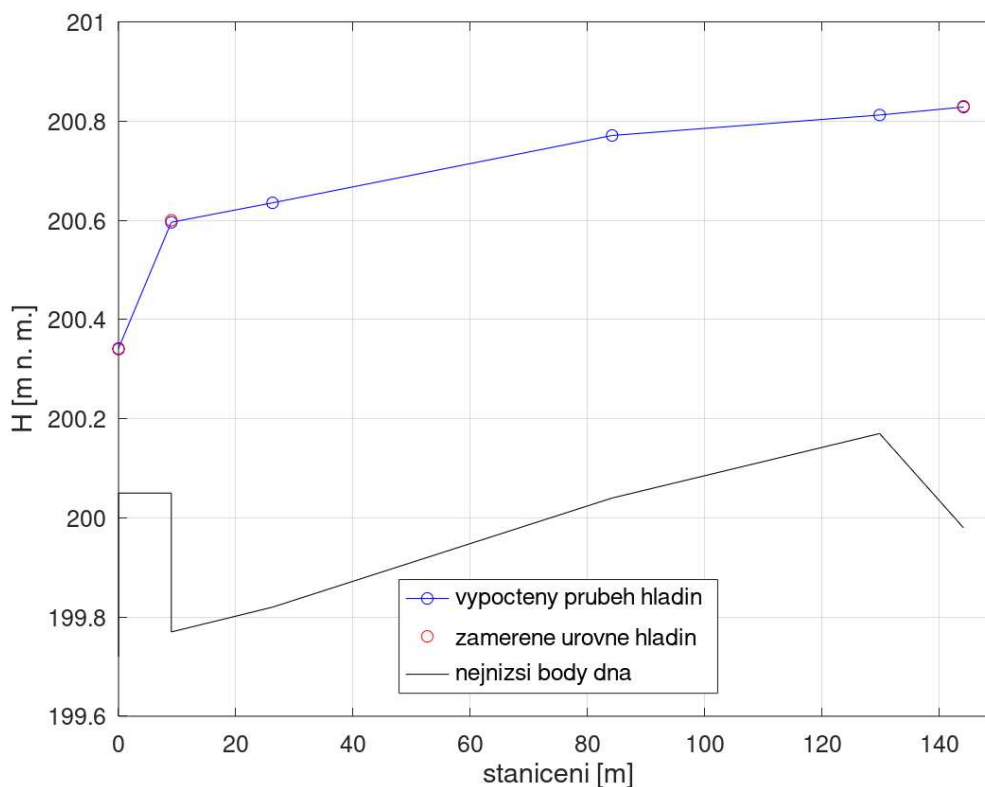
Rozsahy hodnot drsnostních součinitelů pro odpadní kanál:

- zdivo/dlažba z lomového kamene: $n = 0,020 - 0,035$
- betonové konstrukce $n = 0,017$
- skalní podloží: $n = 0,027 - 0,044$
- kamenný zához: $n = 0,035 - 0,044$

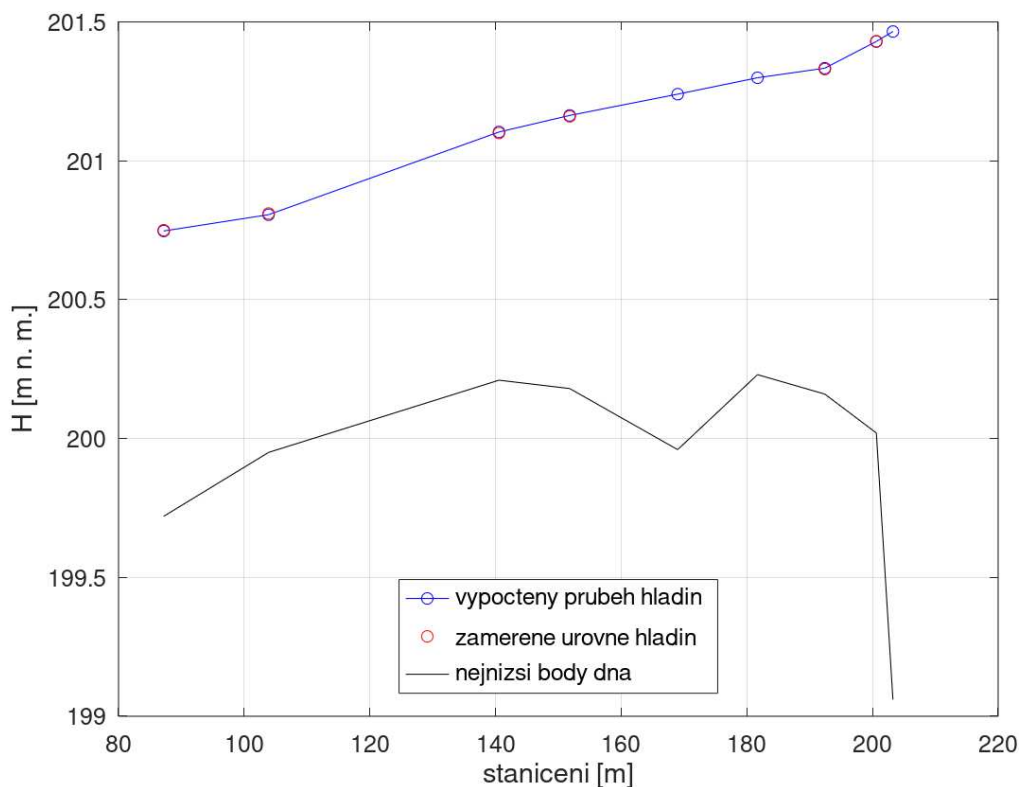
Uvažované hodnoty součinitelů místních ztrát vlivem změny průřezu:

- pozvolné zúžení koryta Berounky v podjezí: $\xi_m = 0,1$
- rozšíření profilu odp. kan. nad ústím (PR01-PR02): $\xi_m = 0,7$
- zúžení a snížení profilu pod savkami: $\xi_m = 0,5$

Průběh kalibrovaných hladin koryta Berounky (od brodu po podjezí) je patrný z obr. 4.4, průběh v odpadním kanálu poté z obr. 4.5.



obr. 4.4 – Kalibrovaný průběh hladin v podjezí řeky Berounky



obr. 4.5 – Kalibrovaný průběh hladin v odpadním kanálu

Kalibrace byla verifikována porovnáním vypočtených úrovní hladin pod savkou s měřením popsáním v kap. 4.1. Hodnoty jsou uvedeny v následující tab. 4.1, z níž vyplývá chyba výpočtu pro oba stavy 3 cm, která byla v rámci verifikace autorem tolerována.

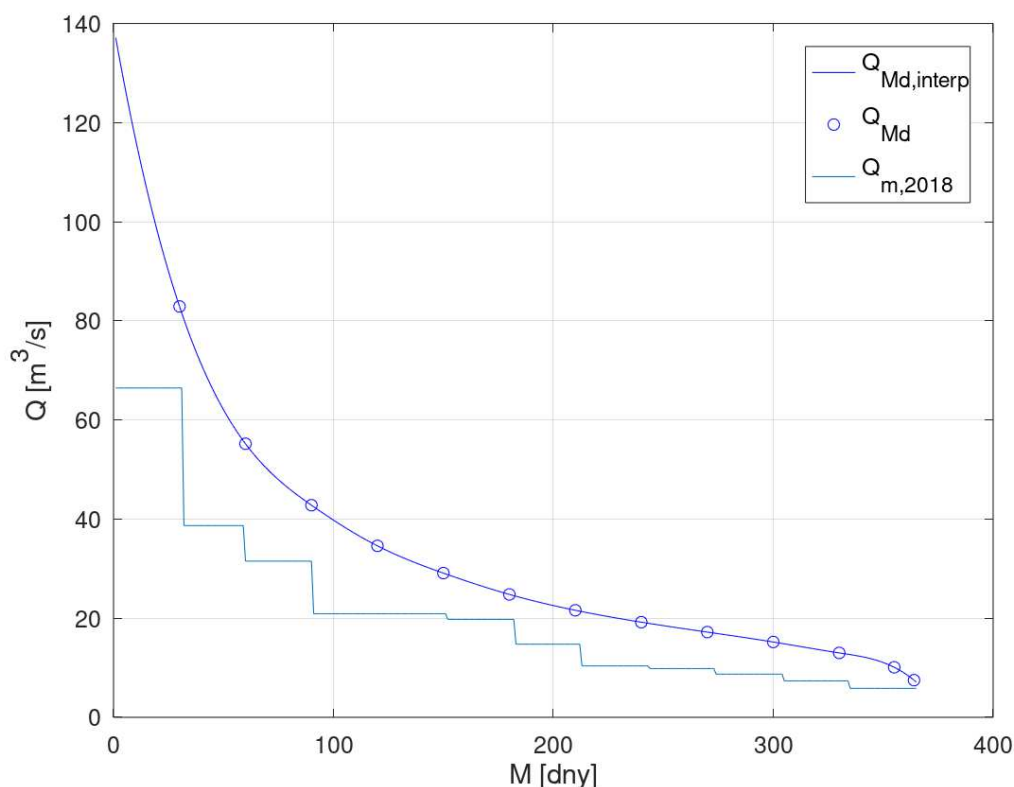
tab. 4.1 – Úrovně hladin pod savkou

Q_{VE} [m ³ /s]	H_{dol} [m n. m.]	
	měření	výpočet
5	201,18	201,15
10	201,50	201,47

4.2.2 Kalibrace parametrů technologické části modelu

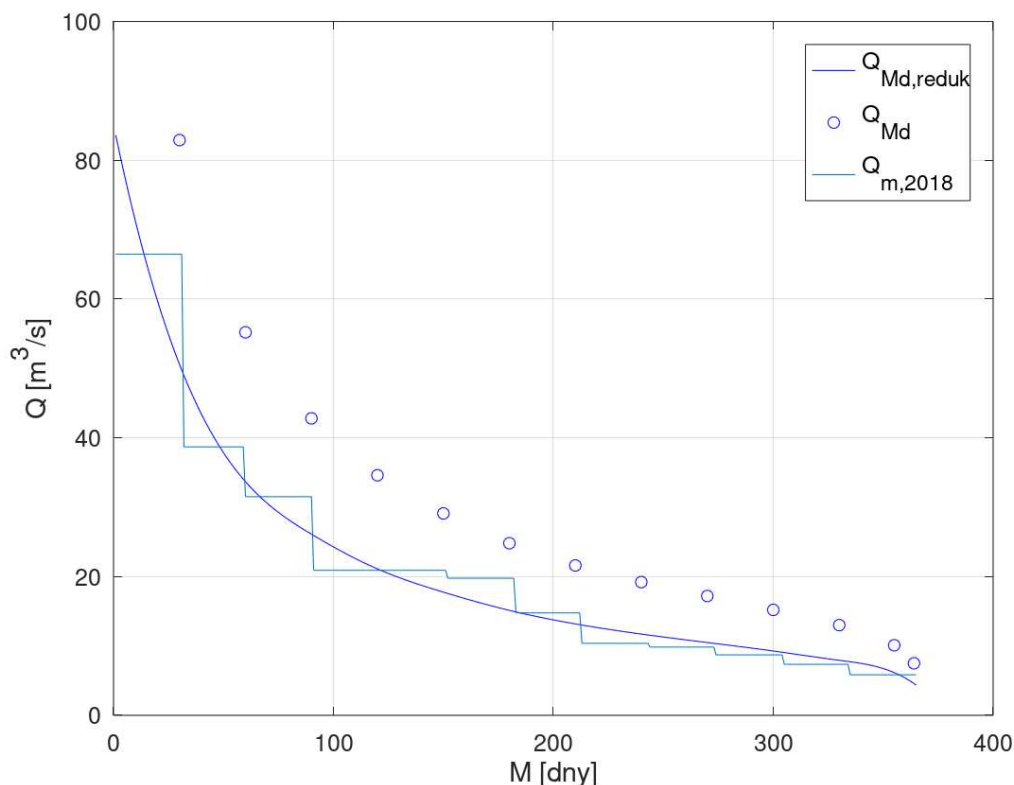
Parametry technologické části modelu se rozumí parametry přímo související s technologií MVE, které vstupují do výpočtu výkonu MVE. Jedná se o parametry vtoku a účinnosti jednotlivých technologií. Pro účely kalibrace byla autorovi správcem vodního díla poskytnuta informace o výrobě elektrické energie v roce 2018, jejíž hodnota činila 540 MWh.

Ze zprávy Povodí Vltavy, s.p. o hodnocení množství povrchových vod v dílčím povodí Berounky za rok 2018 [1] byly získány průměrné měsíční průtoky za rok 2018 ($Q_{m,2018}$) v měrném profilu Beroun, který se nachází cca 18 ř. km nad profilem jezu v Dobřichovicích. Na úseku mezi profily se nenachází žádný významnější přítok. Porovnáním dlouhodobých průměrných ročních průtoků v profilu Beroun $37,1 \text{ m}^3/\text{s}$ a v profilu jezu Dobřichovice $38,6 \text{ m}^3/\text{s}$ byl získán poměr 1,04. Touto hodnotou byly vynásobeny hodnoty $Q_{m,2018}$ v profilu Beroun a byl tak získán hrubý odhad $Q_{m,2018}$ na lokalitě MVE Dobřichovice. Seřazená průtoková řada $Q_{m,2018}$ od největšího po nejmenší je v porovnání s řadou Q_{Md} uvedena na obr. 4.6. Z grafu je patrné, že průběh $Q_{m,2018}$ nápadně připomíná průběh Q_{Md} . Průběh redukované řady Q_{Md} tak, aby její průměr byl roven průměru řady $Q_{m,2018}$, je uveden na obr. 4.7.



obr. 4.6 – Průměrné měsíční průtoky $Q_{m,2018}$ v porovnání s Q_{Md}

Parametry vtoku jsou dány jeho geometrií: Šířka polí 5,0 a 4,5 m, hloubka je dána rozdílem úrovně horní hladiny a úrovně dna 201,00 m n. m., parametry jemných česlí dle popisu vztahu 3.43 jsou do výpočtu zadány takto: Odklon jemných česlí od vodorovné roviny $\alpha_c = 60^\circ$, jejich tvarový součinitel dle obr. 3.8 $\beta = 2,42$, šířka česlic $s = 6 \text{ mm}$, světlá vzdálenost česlic $b = 30 \text{ mm}$, koeficient podpěrných prvků $k_p = 2$, koeficient zahrnující šikmost obtékání česlí $k_s = 1$, zanesení česlí bylo uvažováno 10 %.



obr. 4.7 – Redukovaná řada Q_{Md}

Součinitele vyjadřující účinnosti jednotlivých technologií byly na základě literatury [4][3][2] a konzultací se zkušenějšími odborníky stanoveny takto: Účinnost kašnové Francisovy turbíny $\eta_{\text{turb}} = 0,70$, účinnost generátoru $\eta_g = 0,90$, součin účinností kuželovým převodem a plochým řemenem $\eta_p = 0,92$, účinnost transformátoru $\eta_t = 1$ (MVE není vybavena transformátorem). Pro zjednodušení byly tedy veškeré účinnosti uvažovány jako konstanty.

Bod odstavení turbín byl definován minimální provozní hladinou $H_{\text{prov,min}} = 200,80$ m n. m., která odpovídá převýšení nejnižší položeného bodu stropu savky o cca 30 cm.

Minimální zůstatkový průtok byl uvažován dle povolení k nakládání s vodami $MZP = 4,65$ m³/s.

Dále musela být definována podmínka maximálního instalovaného výkonu vodní elektrárny 84 kW. Hodnoty výpočetně vyšší byly tedy sníženy na hodnotu 84 kW.

Výpočet výroby byl proveden jak pro průtokovou řadu $Q_{m,2018}$, tak pro řadu $Q_{Md,reduk}$. Vypočtené výroby jsou v porovnání se skutečnou výrobou v roce 2018 uvedeny v tab. 4.2. Rozdíl výsledů výpočtů je pravděpodobně největší mírou dán výpočtním odstavením turbín pro celý nejsušší měsíc řady $Q_{m,2018}$, zatímco v řadě $Q_{Md,reduk}$ je využita

i nezanedbatelná část tohoto měsíce. Dle podkladů byla vykazována nezanedbatelná část výroby 29,21 MWh právě v nejsušším měsíci roku 2018, což může vést k závěru, že je výpočet na základě $Q_{Md,reduk}$ přesnější, ale něco takového si autor neodvažuje tvrdit. Nicméně odchylky výsledků výpočtů od reálné výroby jsou menší než 5 %, což je uspokojivé a takto stanovené parametry modelu jsou považovány za dostatečně přesné.

tab. 4.2 – Srovnání skutečné a vypočtené výroby v roce 2018

Skutečná výroba v roce 2018 [MWh]	Vypočtená výroba na základě $Q_{m,2018}$ [MWh]	Vypočtená výroba na základě $Q_{Md,reduk}$ [MWh]
540,14	514,33	545,91

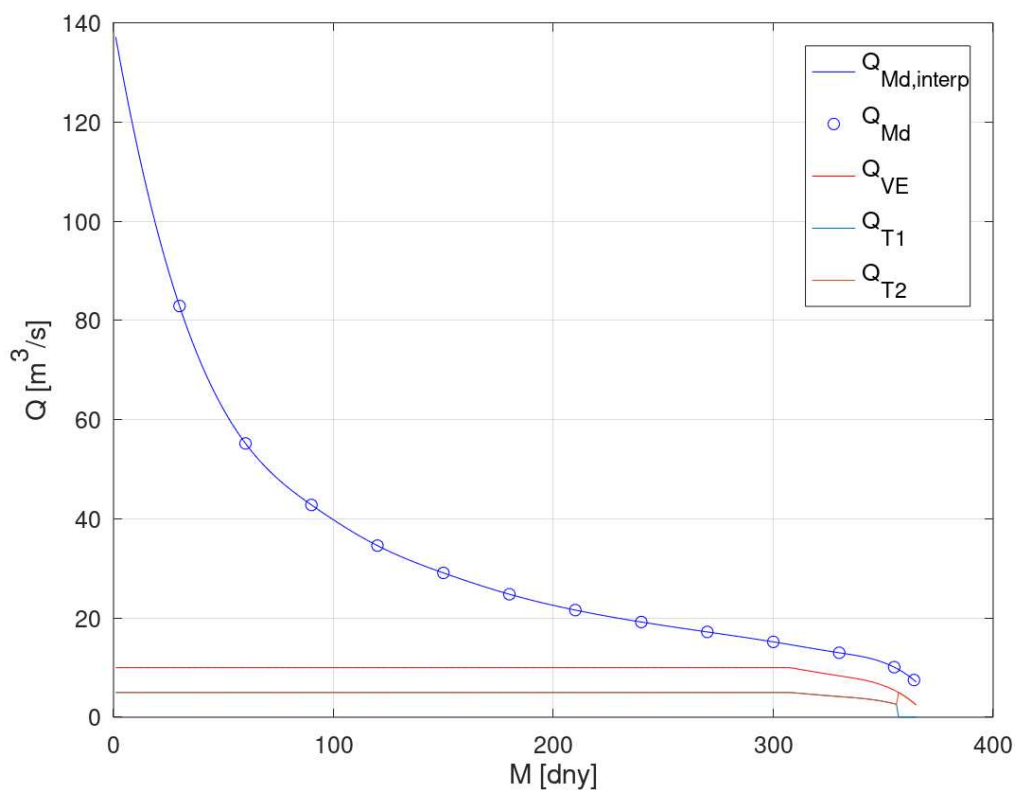
Poslední kontrola výpočetního modelu byla provedena na základě minimálního provozního výkonu. Dle výpočtu byl poslední zaznamenaný výkon před odstavením turbín $P_{VE,min} = 21,98$ kW. Skutečný minimální provozní výkon se dle správce MVE pohybuje v rozmezí 20 – 25 kW. Což opět vede k závěru dostatečně přesného nastavení výpočetních parametrů.

4.2.3 Podrobný výpočet výroby stávající MVE v průměrném roce

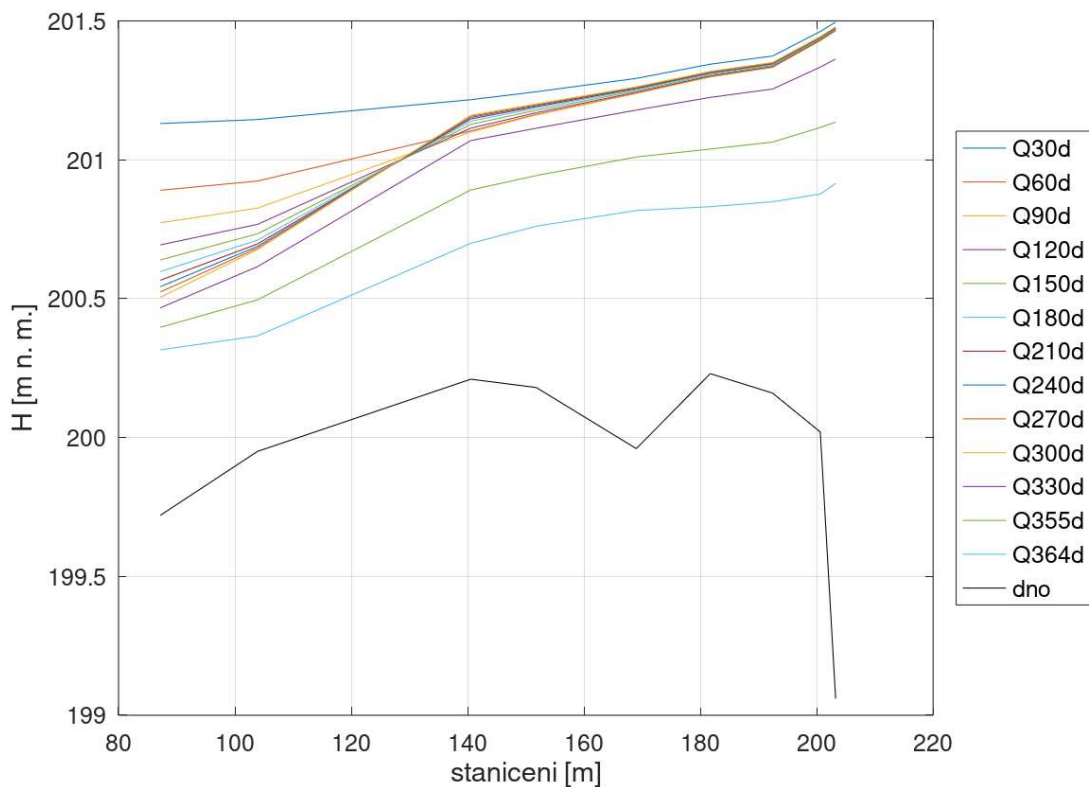
Výpočetní model je považován za zkalibrovaný a je možné přistoupit k výpočtu výroby elektrické energie malou vodní elektrárnou v průměrném roce. Grafické výstupy výpočtu jsou uvedeny na obr. 4.8, obr. 4.9, obr. 4.11 a obr. 4.12. V grafech nejsou vykreslovány hodnoty (průběhů hladin, spádů atp.) odpovídající stavu odstavení turbín. Průběh hladin v profilu mezi pilíři pod savkami je vykreslován pro výše položenou úroveň hladiny a stejně tak je vykreslována i čára trvání úrovně hladiny dolní vody (rozdíl při chodu obou turbín činí cca 1 cm, což vedlo ke splynutí čar a nemožnosti identifikace dle barev).

Z průběhu hladin (obr. 4.9) je patrné, že při stejném průtoku má průběh tendenci konvergovat k jedné výsledné hladině. Tento jev byl pro stejné výpočetní parametry pro kontrolu ověřen ve výpočetním prostředí HEC-RAS a výsledný průběh hladin (bez posledního úseku mezi pilíři) je pro srovnání přiložen na obr. 4.10. Ze srovnání je vidět, že se průběhy hladin řešené pravděpodobně podrobnějším postupem v softwaru HEC-RAS od tradiční metody po úsecích příliš neliší.

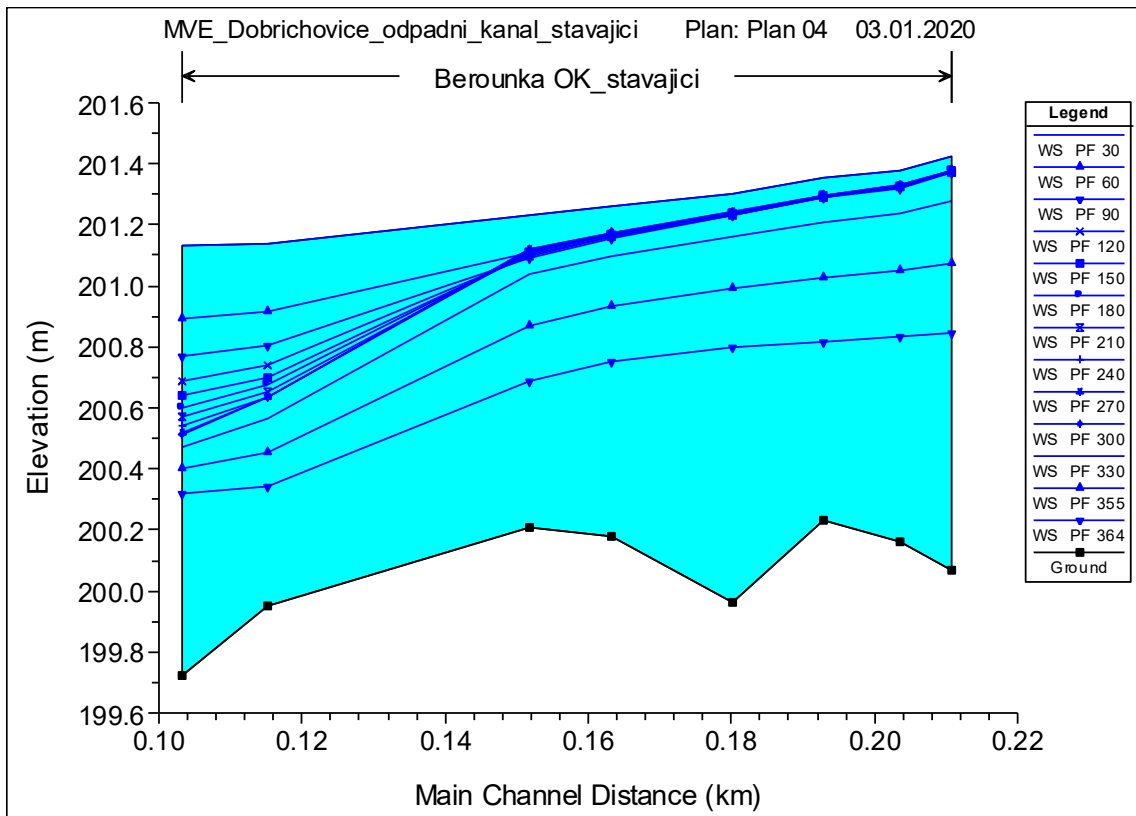
Z čar trvání průtoků využitých vodní elektrárnou na obr. 4.8 je patrné, že elektrárna za stávajícího stavu využívá jen malý podíl průtokového potenciálu a je zde tedy značný prostor pro navýšení.



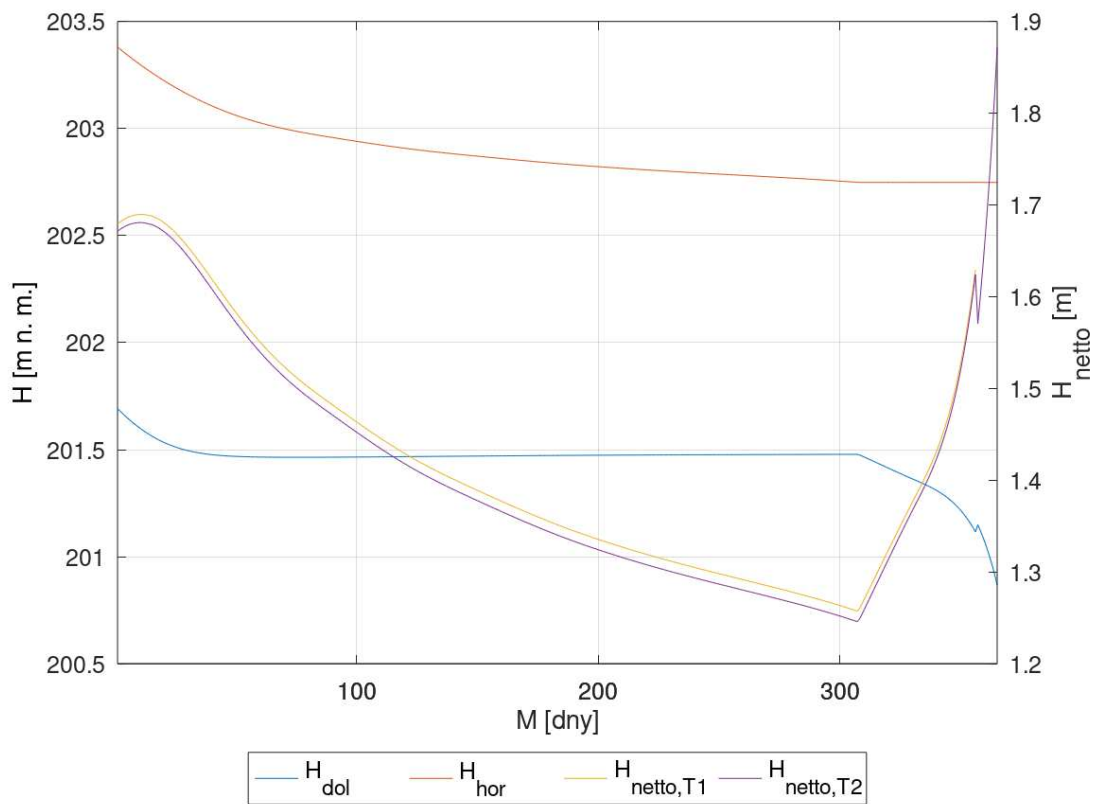
obr. 4.8 – Čáry trvání průtoků vodní elektrárnou a Q_{Md}



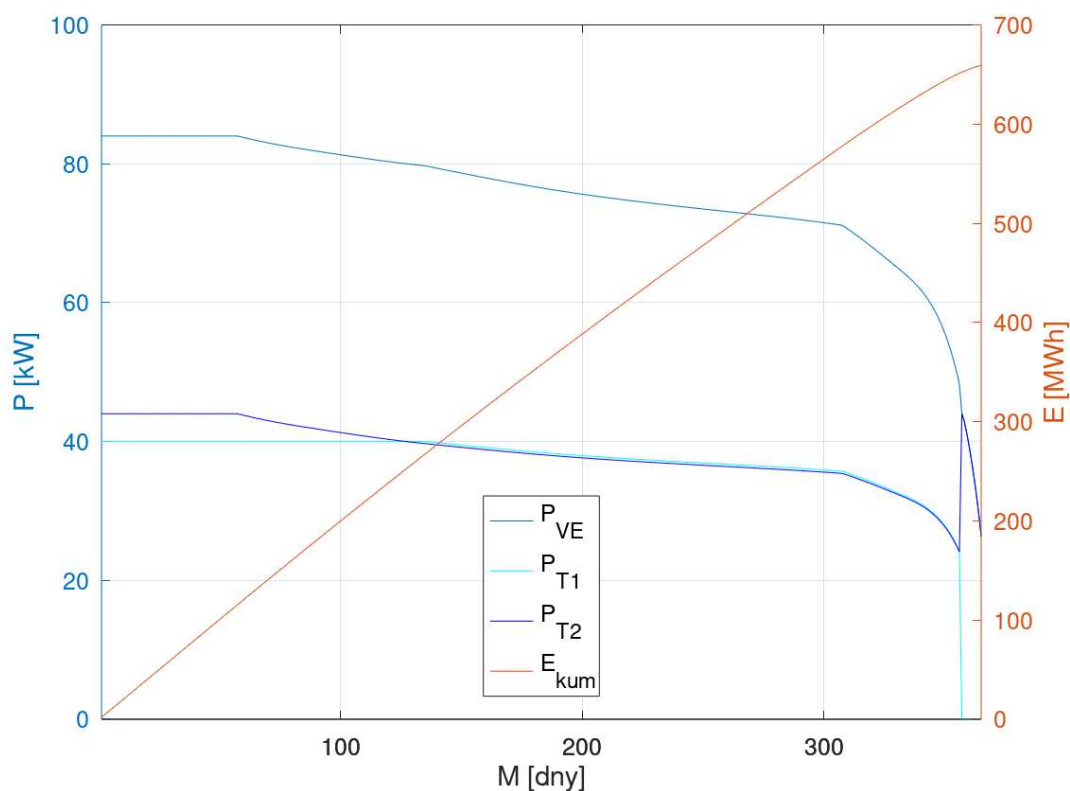
obr. 4.9 – Průběh hladin v odpadním kanálu metodou po úsecích



obr. 4.10 – Kontrolní výpočet průběhu hladin v odpadním kanálu v prostředí HEC-RAS



obr. 4.11 – Čáry trvání úrovně horní a dolní vody a čistých spádů turbín



obr. 4.12 – Čáry trvání výkonů a součtová čáry výroby

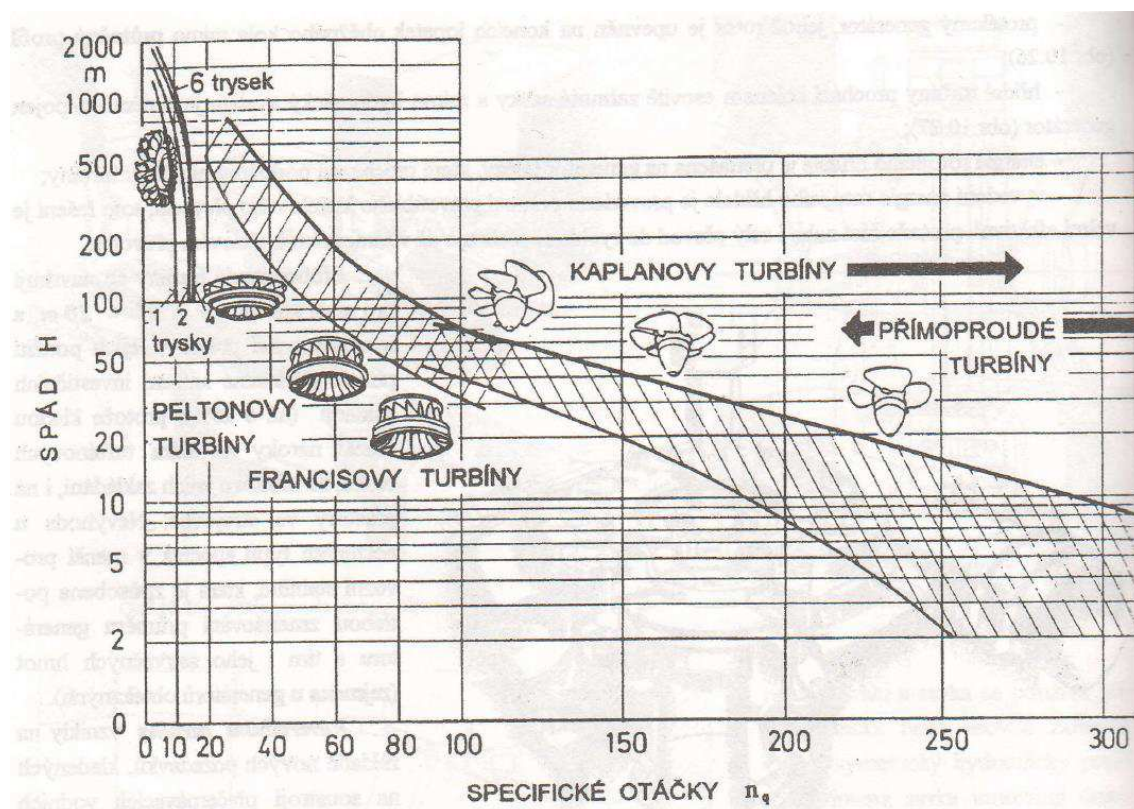
Vybrané číselné výsledky jsou uvedeny v tab. 4.3 níže.

tab. 4.3 – Vybrané výsledky výpočtu výroby MVE za stávajícího stavu

Veličina	Jednotka	Min. hodnota	Průměr	Max. hodnota
Průtok využitý MVE Q_{VE}	[m ³ /s]	2,45	9,59	10,0
Úroveň horní hladiny H_{hor}	[m n. m.]	202,75	202,89	203,38
Úroveň dolní hladiny H_{dol}	[m n. m.]	200,87	201,45	201,69
Čistý spád H_{netto}	[m]	1,25	1,42	1,87
Výkon MVE P_{VE}	[kW]	26,37	75,25	84,00
Celková výroba v prům. roce E	[MWh]	659,15		

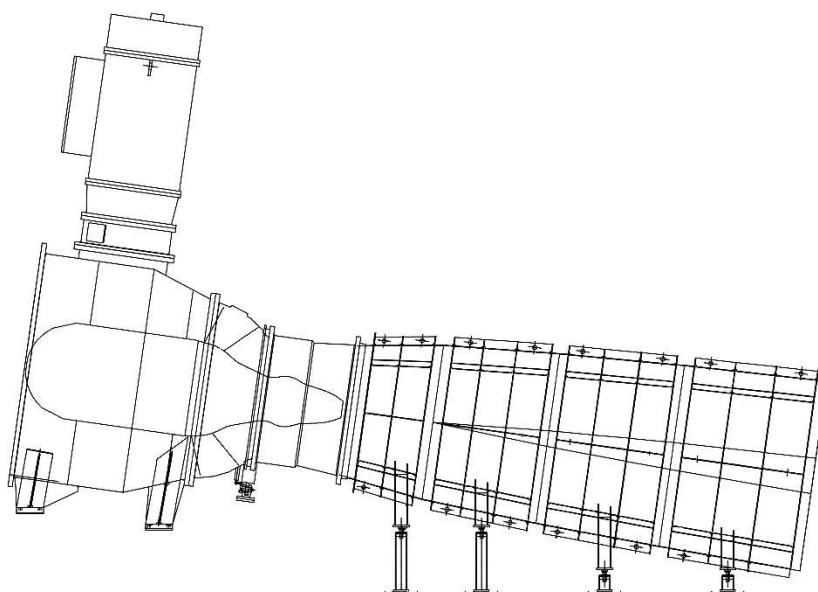
5 Výběr vhodného typu turbíny pro lokalitu

Před přístupem k vlastnímu návrhu řešení rekonstrukce MVE je nejprve definováno, jaké typy turbín budou při jednotlivých návrzích uvažovány. V kapitole jsou dále definovány základní parametry vybraného typu turbíny. Dle grafu na obr. 5.1 je patrné, že pro lokalitu MVE Dobřichovice, kde se potenciální spád pohybuje okolo hodnoty 2 m, a to spíše v optimističtějších případech, se jako nejvhodnější ukazuje výběr turbíny v přímoproudém uspořádání.



obr. 5.1 – Rozsahy využitelnosti hlavních typů vodních turbín [3]

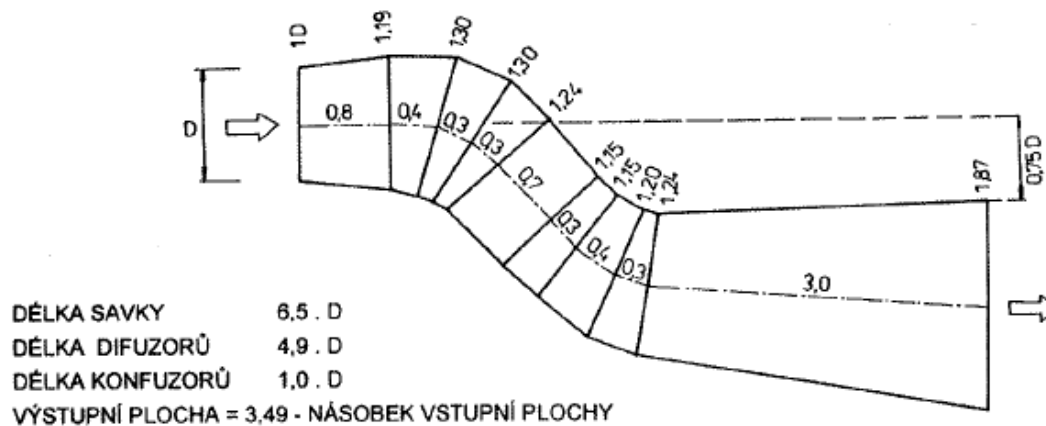
Pro předběžné návrhy studie proveditelnosti byla uvažována přímoproudá Kaplanova turbína – výrobce Strojírny Brno, a.s. – s osou odkloněnou od horizontální roviny o 8° (možnost navýšení na max. 10°). Turbína je vybavena kónicky se rozšiřující savkou a vnějším generátorem s osou v normále osy turbíny. Převod mezi hřídelí turbíny a hřídelí generátoru je proveden kuželovým soukolím. Skica uspořádání je uvedena na obr. 5.2. Pro turbínu je charakteristická možnost natáčení lopatek jak oběžného, tak rozváděcího kola, což vede k poměrně plochému průběhu účinností turbíny. Nespornou výhodou turbíny je také možnost úplného uzavření rozváděcího kola, které díky tomu může být využíváno jako provozní uzávěr.



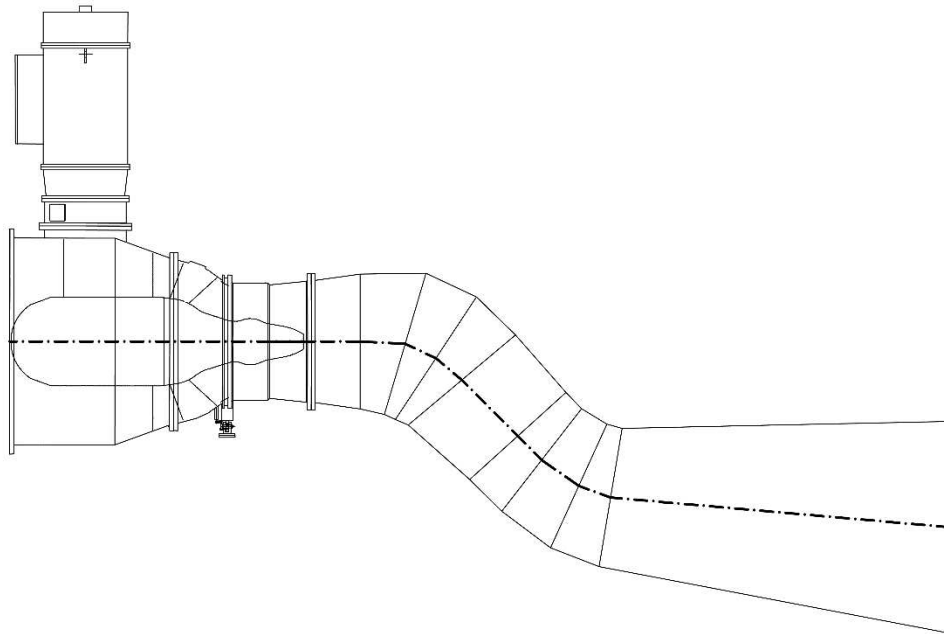
obr. 5.2 – Přímoproudá Kaplanova turbína (výrobce Strojírny Brno, a.s.)

Dále byla v práci uvažována přímoproudá turbína v „S“ uspořádání. Ta byla pro potřeby studie proveditelnosti „vytvořena“ nahrazením stávající savky turbíny na obr. 5.2 savkou tvaru „S“, která byla navržena na základě literatury (viz obr. 5.3). Skica turbíny v „S“ uspořádání je uvedena na obr. 5.4.

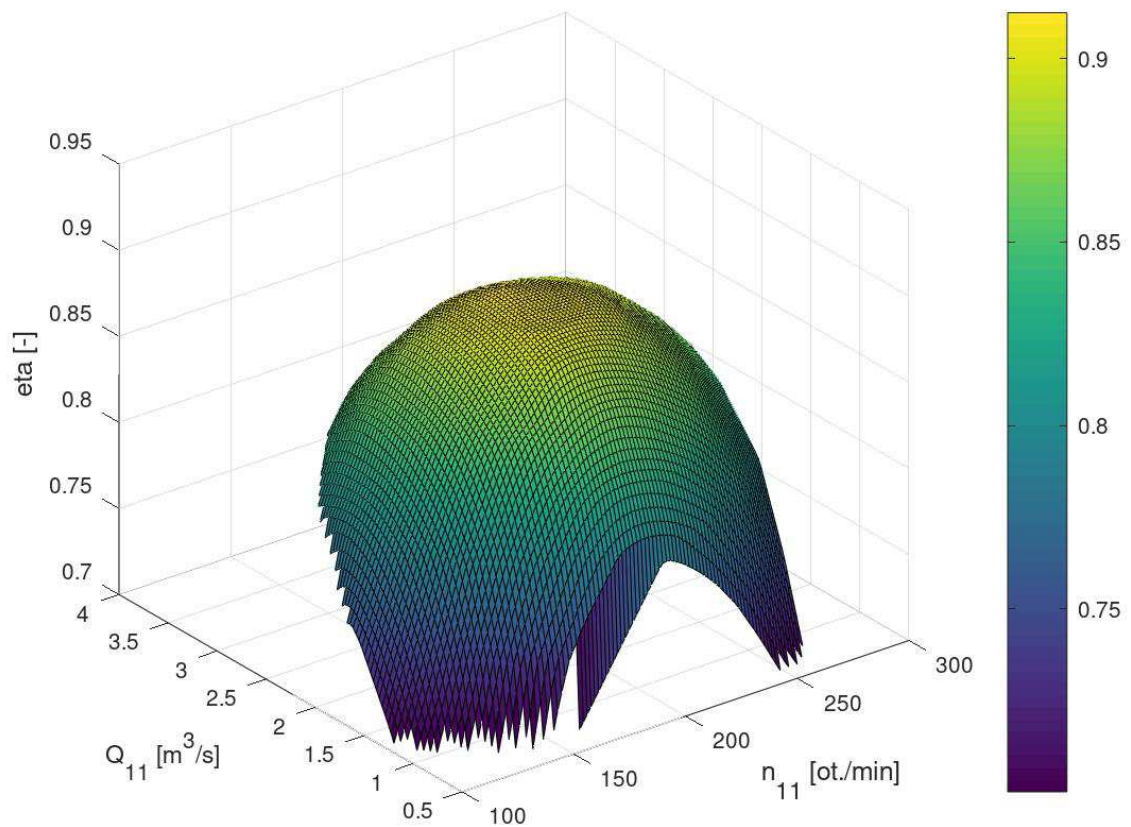
Jako podklad pro výpočet účinnosti turbíny a průměru oběžného kola byla výrobcem poskytnuta hlavní univerzální charakteristika přímoproudé turbíny (obr. 5.6). Podle pokynů výrobce je možné pro větší průměry oběžných kol (od cca 1 m) navýšit účinnost turbíny o 2 až 3 %. Tato operace byla provedena pouze při uvažování klasického přímoproudého uspořádání, v případě „S“ uspořádání byly s ohledem na menší hydraulickou účinnost savky nenavýšené hodnoty účinností. Pro potřeby výpočtu v prostředí Octave byl graf hlavní univerzální charakteristiky digitalizován (obr. 5.5).



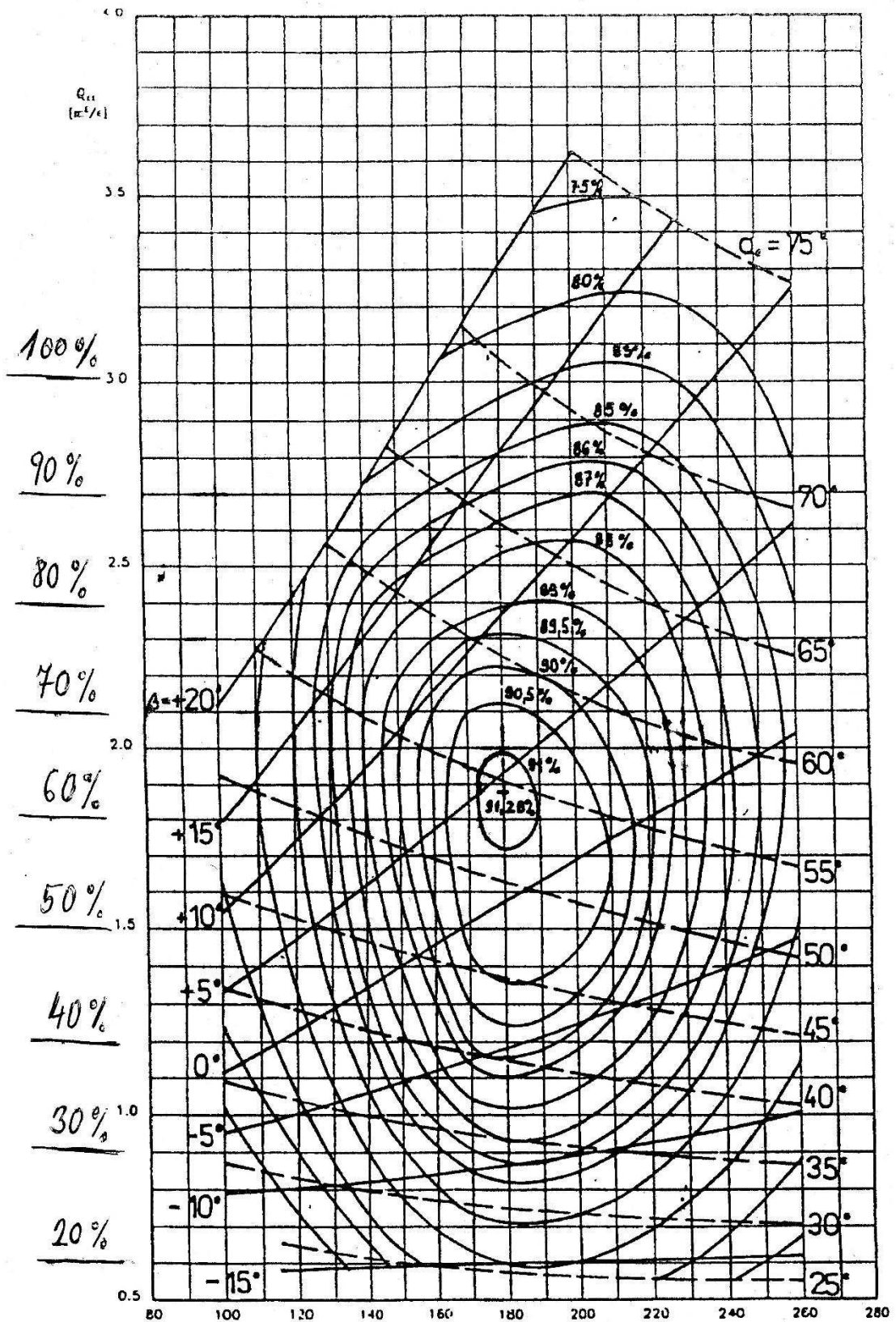
obr. 5.3 – Savka přímoproudé S turbíny podle návrhu KHT ČVUT Praha [4]



obr. 5.4 – Přímoproudá turbína v „S“ uspořádání



obr. 5.5 – Digitalizovaná hlavní univerzální charakteristika přímoproudé turbíny



obr. 5.6 – Hlavní univerzální charakteristika přímoproudé Kaplanovy turbíny

6 Variantní návrh řešení rekonstrukce MVE Dobřichovice

Pro návrh rekonstrukce MVE Dobřichovice byly uvažovány dvě varianty řešení. Jednou je zachování stavby stávající strojovny a návrh nové technologie včetně přidružených stavebních úprav. Druhou variantou pak je demolice stávající strojovny a návrh nové elektrárny jezového typu. Pro obě varianty je zváženo několik dílčích variant řešení, kdy je pro každou variantu vybrána nejvhodnější dílčí varianta pro podrobnější zpracování, které obnáší návrh stavebních úprav, podrobný výpočet výroby elektrické energie v průměrném roce a odhad nákladů stavby.

Jedním z cílů diplomové práce bylo pro nejvýhodnější variantu řešení zpracování výkresové dokumentace na úrovni DSP. Jelikož ale s ohledem na zásadní rozdílnost variant řešení není prakticky možné určit, která varianta je výhodnější a výběr je spíše záležitostí investora, byla zpracována výkresová dokumentace pro obě varianty, jejíž úroveň byla s ohledem na rozsah práce přiměřeně zjednodušena.

6.1 Varianta I – zachování stávající strojovny

Jak již bylo předesláno, první uvažovanou variantou je zachování stavby stávající strojovny a návrh nové technologie turbín. S ohledem na dispozice stávající strojovny byly vždy uvažovány dvě přímoproudé turbíny dle kapitoly 5, kdy limitujícím faktorem pro volbu hltnosti turbín, a tedy i průměru oběžného kola, se ukázaly být rozměry spodní stavby strojovny definované jejím podélným řezem. Pro navýšení spadu je uvažováno zkapacitnění odpadního kanálu.

6.1.1 Předběžné návrhy řešení

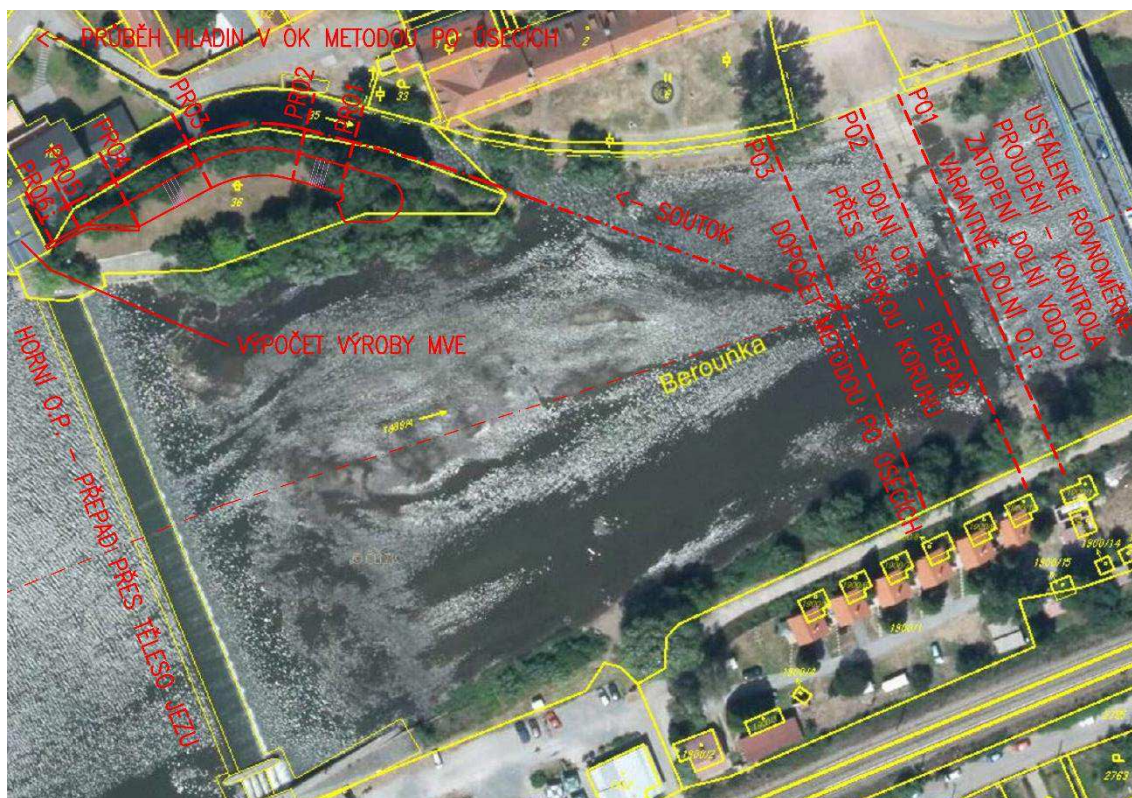
V předběžných výpočtech bylo zváženo několik variant úprav úseku pod elektrárnou. Variantou označenou jako A je zkapacitnění odpadního kanálu jeho rozšířením a prohloubením. Prohloubení je navrženo tak, aby niveleta nového dna byla napojena na stávající úroveň dna v profilu ústí 199,50 m n. m. a byla vedena směrem ke strojovně ve sklonu 3 ‰, což má za následek prohloubení o místy až 0,5 m. Rozšíření bylo navrženo tak, aby šířka odpadního kanálu ve dně odpovídala šířce výtoku pod elektrárnou a nedocházelo tak ke zúžení příčného profilu, což odpovídá šířce ve dně cca 11 m (proměnná s ohledem na nepravidelnost levobřežního opevnění). Opevnění při

levém břehu v podobě opěrných stěn je tedy zachováno a rozšíření je provedeno zásahem do pravého břehu. Nová pravá dnová hrana přibližně odpovídá stávající pravé břehové hraně. Nový pravý svah je navržen ve sklonu 1:1,25, což dle literatury [12] odpovídá maximálnímu možnému sklonu svahu opevněném kamenným záhozem, který je ve výpočtu předpokládán.

Variantou označenou jako B je rozšíření odpadního kanálu po vzoru varianty A, ale jeho prohloubení se nepředpokládá. Je navrženo pouze mírné zarovnění povrchu dna v podélném sklonu 3 ‰.

Pro obě varianty byly provedeny předběžné výpočty výroby (schéma modelu viz obr. 6.1), a to jak za předpokladu odstranění brodu způsobujícího vzduť dolní vody (A1, B1), tak za předpokladu zachování brodu (A2, B2). Výsledky předběžných výpočtů pro hltnosti turbín 2x 5 m³/s, 2x 6 m³/s a 2x 7 m³/s jsou uvedeny v tab. 6.1.

V případě nátoky na elektrárnu je předpokládáno zachování stávající konstrukce dělících pilířů a jemných česlí.



obr. 6.1 – Schéma výpočetního modelu var. I [18]

Parametry výpočtu byly zvoleny následovně:

Parametry jezu, česlí, zachovaných částí profilů odpadního kanálu a podjezí včetně dolních okrajových podmínek byly zachovány dle kalibrace v kap. 4.2.1. Drsnostní součinitelé nových konstrukcí odpadního kanálu byly odhadnuty na základě literatury [3][14] – pro kamenný zához $n = 0,038$; pro nové betonové konstrukce $n = 0,013$. Součinitel místní ztráty vtokem do tlakové části včetně zahrnutí změny profilu průřezu $\xi_{\text{vtok}} = 0,25$. Účinnost turbín η_{turb} byla pro každý provozní stav interpolována z hlavní univerzální charakteristiky, účinnost generátoru byla definována jako konstanta $\eta_g = 0,93$, účinnost převodu kuželovým soukolím $\eta_p = 0,98$, účinnost transformátoru $\eta_t = 0,9875$. Hodnoty η_g , η_p a η_t , byly odhadnuty na základě literatury [4][3][2] a zkušeností z jiných lokalit. Optimální průtok $Q_{\text{turb,opt}}$ byl volen jako 85 % hlnosti turbíny, optimální spád H_{opt} byl volen iteračně. Vypočtený průměr oběžného kola byl zaokrouhlen na cm.

tab. 6.1 – Vybrané výsledky předběžných výpočtů

Var	$Q_{\text{turb,max}}$ [m ³ /s]	H_{opt} [m]	D_{OK} [m]	H_{dol} [m n. m.]		$P_{\text{VE,max}}$ [kW]	E [MWh]
				min.	max.		
A1	2x5	2,05	1,25	200,37	201,53	170,1	1411,0
	2x6	2,00	1,38	200,38	201,53	198,7	1614,2
	2x7	2,00	1,49	200,38	201,54	225,5	1781,3
A2	2x5	2,05	1,25	200,28	201,63	172,0	1413,5
	2x6	2,00	1,38	200,29	201,63	200,01	1614,9
	2x7	2,00	1,49	200,30	201,64	225,91	1780,3
B1	2x5	1,75	1,30	200,46	201,54	158,2	1272,7
	2x6	1,75	1,43	200,49	201,55	184,5	1426,8
	2x7	1,70	1,55	200,51	201,57	209,3	1548,9
B2	2x5	1,75	1,30	200,44	201,64	157,04	1267,3
	2x6	1,75	1,43	200,49	201,65	182,36	1420,4
	2x7	1,70	1,55	200,49	201,66	206,03	1542,0

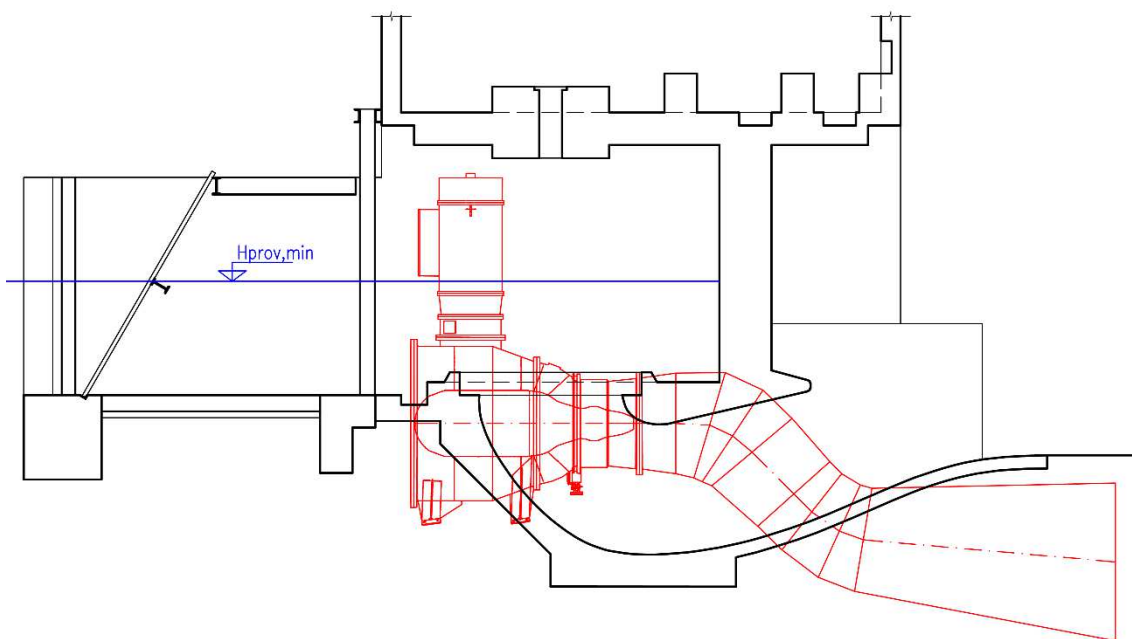
Pozn. $H_{\text{dol,min}}$ je určena na základě výpočetního bodu odstavení turbín; pro variantu s brodem uvažovány turbíny optimální pro variantu bez brodu (víceméně odpovídá)

Z tab. 6.1 je patrné, že vzdutí brodem má na výsledné výroby v průměrném roce minimální vliv. Varianta A, jak bylo předpokládáno, vykazuje příznivější hodnoty výsledků, nicméně z hlediska proveditelnosti je oproti variantě B mnohem problematictější. Dno odpadního kanálu je tvořeno skalním podloží, což by při návrhu jeho prohloubení vedlo k nepoměrnému navýšení stavebních nákladů. Dalším

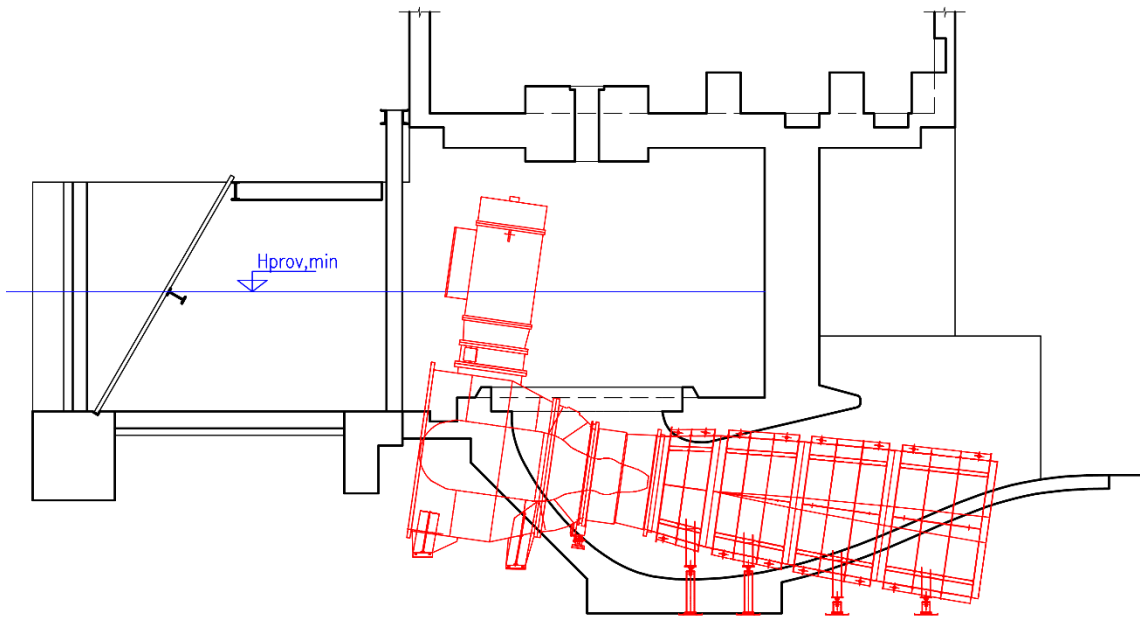
souvisejícím konstrukčním problémem je zahloubení dna odpadního kanálu pod základovou spáru stávajících levobřežních konstrukcí, které by pravděpodobně bylo nutné zajistit tak, aby nedošlo ke ztrátě stability konstrukcí, což by opět vedlo k navýšení stavebních a projekčních nákladů. Z těchto důvodů byla pro podrobnější zpracování vybrána varianta B, kdy je odpadní kanál pouze rozšířen.

Nyní přistupme k volbě typu a velikosti turbíny. Pro vypočtené velikosti oběžných kol 1,30, 1,43 a 1,55 m bylo vytvořeno několik skic umístění turbín do stávající strojovny s ohledem na vypočtené minimální zanoření vtoku (viz obr. 6.2, obr. 6.3, obr. 6.4 a obr. 6.5). Z porovnání obr. 6.2 a obr. 6.3 je zřejmé, že turbína v „S“ uspořádání by byla mnohem náročnější na výkopové práce a související stabilizaci okolních konstrukcí. Dále tedy byly zvažovány pouze přímoproudé turbíny v šikmém uspořádání.

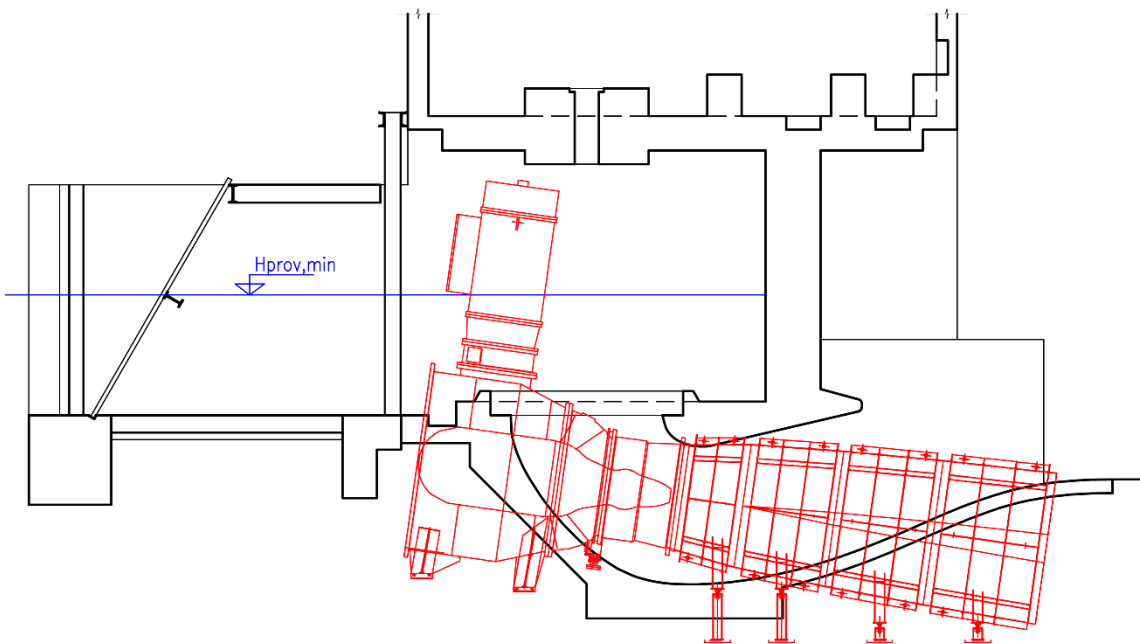
Nakonec byla s ohledem na poměr velikosti soustrojí ku stávající strojovně, na požadavek minimální zahloubení pod základy stávající stavby a snahu minimalizace výkopových prací ve skalním podloží pro podrobnější návrh autorem vybrána varianta turbín hltností $2 \times 5 \text{ m}^3/\text{s}$, jejichž odklon od horizontální roviny byl z důvodu požadavku dostatečného zanoření savek zvýšen na 10° . Vlivem rekonstrukce tedy nedojde k navýšení využití průtokového potenciálu, nicméně vlivem navýšení spádu a účinností technologií dojde k téměř zdvojnásobení průměrné roční výroby malou vodní elektrárnou.



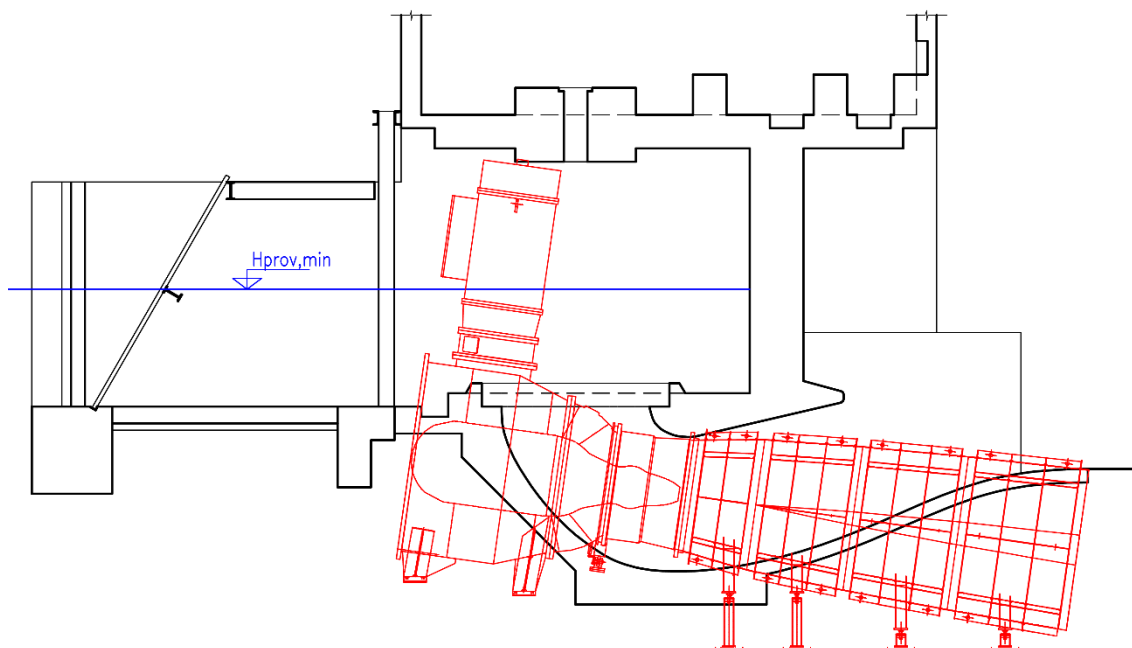
obr. 6.2 – Skica S turbíny $D_{OK} = 1,30 \text{ m}$ ve stávající strojovně



obr. 6.3 – Skica přímoproudé turbíny $D_{OK} = 1,30$ m ve stávající strojovně



obr. 6.4 – Skica přímoproudé turbíny $D_{OK} = 1,43$ m ve stávající strojovně



obr. 6.5 – Skica přímoproudé turbíny $D_{OK} = 1,55 \text{ m}$ ve stávající strojovně

6.1.2 Základní popis stavebně technických úprav

Stávající konstrukce spodní stavby bude v polích turbín mezi hlavními pilíři vybourána včetně konstrukce železobetonového stropu. Předpokládá se zachování stávajícího horního příčného prahu nátoky, na který bude napojena nová základová deska. Nátoková část je tedy zachována včetně technologie česlí. Pouze dojde k přestavbě obslužné lávky, na které je umístěn stírací stroj česlí.

Základová spára je v nejnižším bodě (v profilu savky) navržena na kótě 198,48 m n. m., 0,57 m pod stávající předpokládanou základovou spárou. Směrem proti vodě je poté stupňovitě navyšována tak, aby základová deska tvořila podporu pod turbínou. Výškové rozměry základové desky a základové spáry jsou patrné z podélného řezu ve výkresové části. Prakticky v celé délce stavby dochází k nezanedbatelnému zahloubení pod stávající základy dělicích pilířů a je tedy nutné uvažovat jejich podchycení. V příčném směru, kdy největší průměr turbíny je 2,34 m a užší pole má světlost 4,5 m, z čehož vychází z každé strany 1,08 m prostoru mezi pilířem a turbínou, je dostatek prostoru pro provedení např. mikropilotové stěny po celé délce stavby, čímž by mělo dojít k zajištění stávajících základů a k umožnění pokračování hloubení základové spáry.

V profilu pod savkou dojde oproti stávajícímu stavu k zahloubení o až 2,42 m, což vede k výraznému podhloubení pod základy vedlejší budovy. Zajištění je opět předpokládáno pilotovou stěnou vytvořenou před zahájením výkopových prací.

Vtokový objekt je proveden jako železobetonový, na který je napojena nová turbína. Vstupní profil vtoku je navržen jako obdélníkový, kdy je šířka dána šířkou pole mezi pilíři a výška je v kolmici ke dnu 2875 mm. Horní plocha vtoku je navržena jako zaoblená o proměnném poloměru tak, aby v místě vstupního profilu tvořila tečnu ke svislé rovině a v místě napojení na turbínu tečnu ke sklonu turbíny 10°. Vtok je v celé délce shora zakryté části navržen jako přechodový kus z obdélníkového profilu do kruhového průměru 2,34 m. Základová deska v odkryté části je na lícové straně opět zaoblena do hydraulicky vhodného tvaru (dle prostorových možností).

Napojení profilu pod savkou na dno odpadního kanálu je provedeno železobetonovou základovou deskou ve sklonu 1:4. Před šikmou částí je v délce 2 m pod savkou základová deska vodorovná pro usměrnění proudu a umístění provizorního hrazení. V této délce jsou za stavbu strojovny vytaženy nové dělicí pilíře, které jsou napojeny na stávající a odpovídají jejich rozměrům. Pouze pravý pilíř není v profilu přechodu na šikminu ukončen, ale pokračuje a v celkové délce 34 m tvoří pravou nábrežní stěnu.

Pro uzavření spodní stavby strojovny jsou navrženy svislé stěny, a to přibližně v místech stávajících svislých konstrukcí. V oblasti předsunuté horní před spodní stavbu nad profily savek je navržen nový železobetonový strop, který v horní stavbě tvoří ohoz. V prostorách spodní stavby není strop rekonstruován, aby mohlo v případě oprav a revizí dojít k vytažení technologických celků ze stavby strojovny jeřábem. Z tohoto důvodu se také předpokládá návrh nové odnímatelné střechy, která není v rámci diplomové práce dále rozebírána. Pouze je zahrnuta v odhadu nákladů stavby.

Veškeré betonové konstrukce jsou navrženy ze železobetonu C30/37 XF3-XA1-XC4 s výztuží B500B, krytí výztuže 40 mm. Podkladní beton je navržen z betonu C12/16 X0. Předpokládané dimenze konstrukcí viz výkresová část.

Navrženým typem turbín jsou dvě přímoproudé Kaplanovy turbíny s průměrem oběžného kola 1,30 m, s kónickou savkou a osou odkloněnou od horizontální roviny o 10°. Konstrukce turbín i savky je, jak již bylo předesláno, kotvena do základové desky. Savky jsou navíc stabilizovány masivním betonovým tížným blokem. Umístění

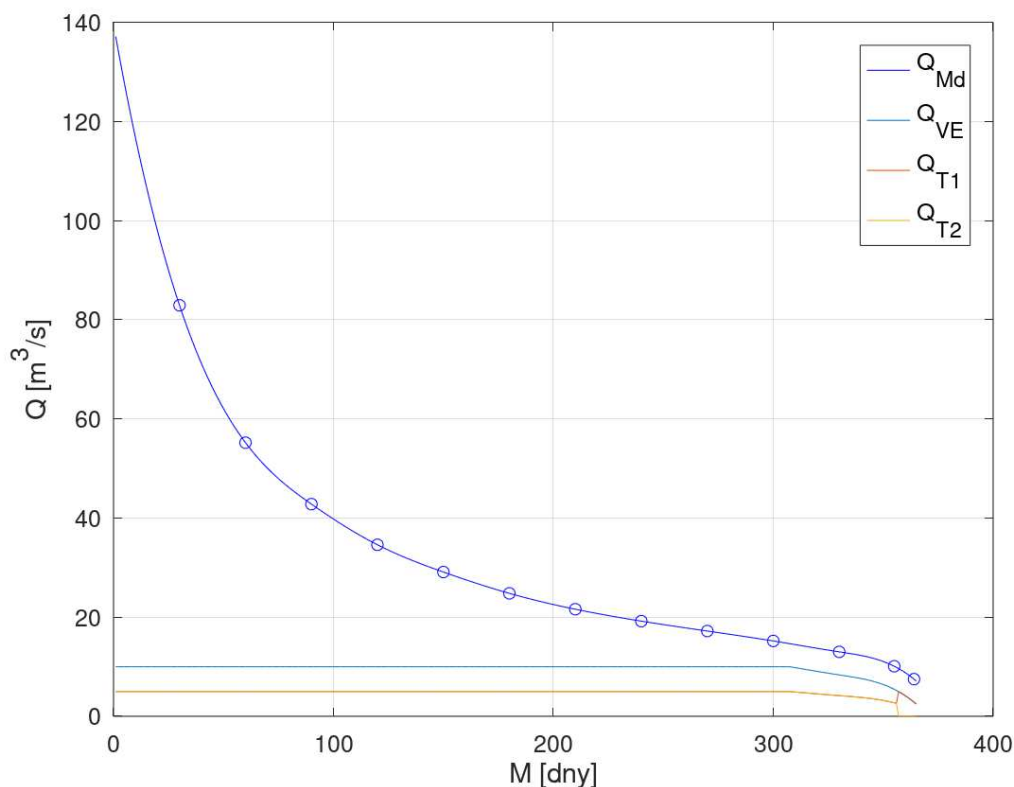
elektrotechnických rozvaděčů, mazacích a hydraulických agregátů se předpokládá v horní stavbě.

Odpadní kanál je zásahem do pravého břehu rozšířen ve dně na šířku cca 11 m. Opevnění pravého svahu je navrženo z kamenného záhozu ve sklonu 1:1,25. Podélný sklon dna je navržen od koncového profilu základové desky 0,3 %, což vede pouze ke stržení skalních výchozů a zahloubení se nepředpokládá.

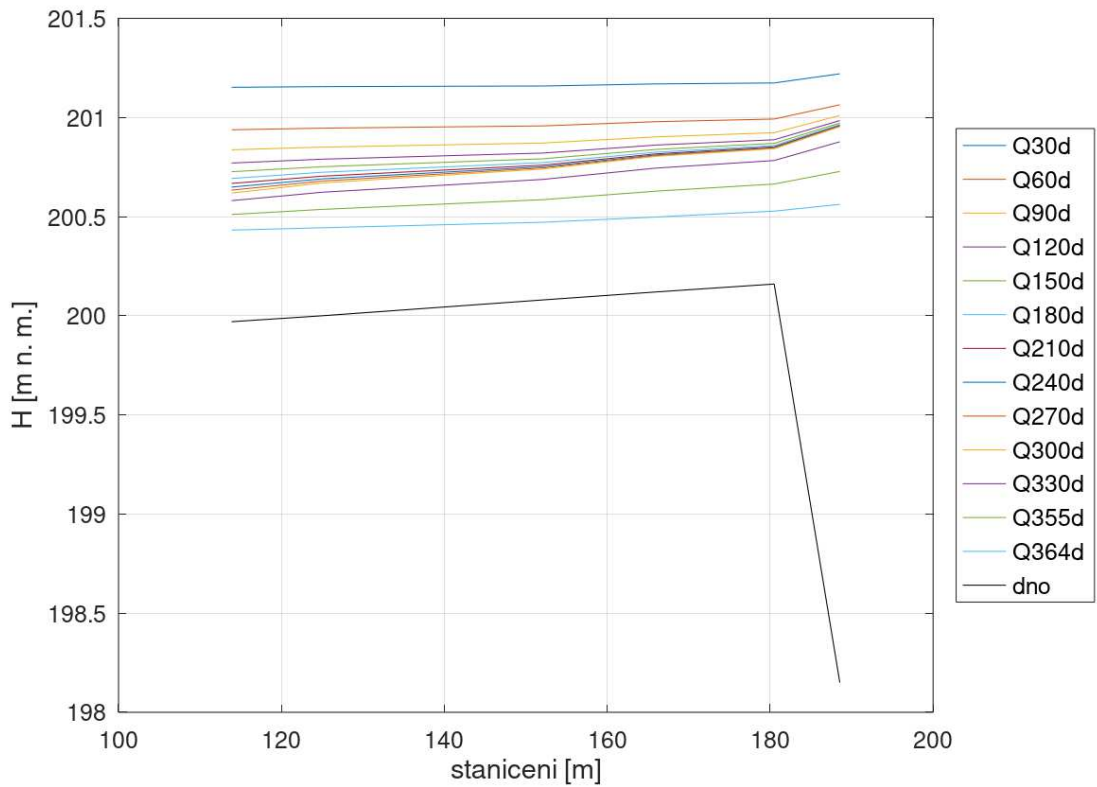
Převedení vody za stavby je navrženo zajímkováním vtoku elektrárny a dolního profilu odpadního kanálu zemními hrázkami z místních materiálů. Takovýmto způsobem byla zajímkována stavba rybích přechodů na lokalitě jezu stejného typu v sousední obci Řevnice, také na toku Berounky. Zajímkování hrázkami fungovalo bez výrazných průsaků, a proto bylo navrženo i na této lokalitě.

6.1.3 Podrobný výpočet výroby

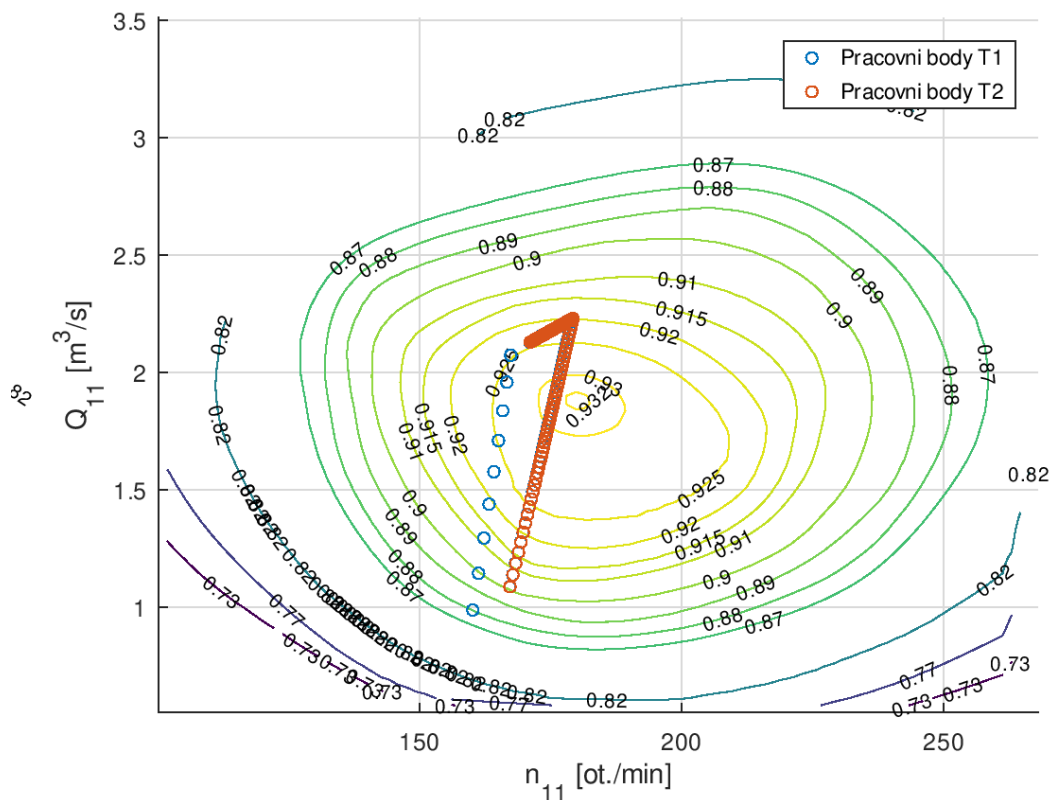
Výpočetní parametry byly definovány v kap. 6.1.1. Oproti předběžným výpočtům byla pouze dopravena geometrie profilů pod savkou dle stavebně technického návrhu. Výpočet byl proveden pro variantu bez brodu. Grafické výstupy výpočtu jsou uvedeny na obr. 6.6 až obr. 6.11 , vybrané výsledky pak v tab. 6.2.



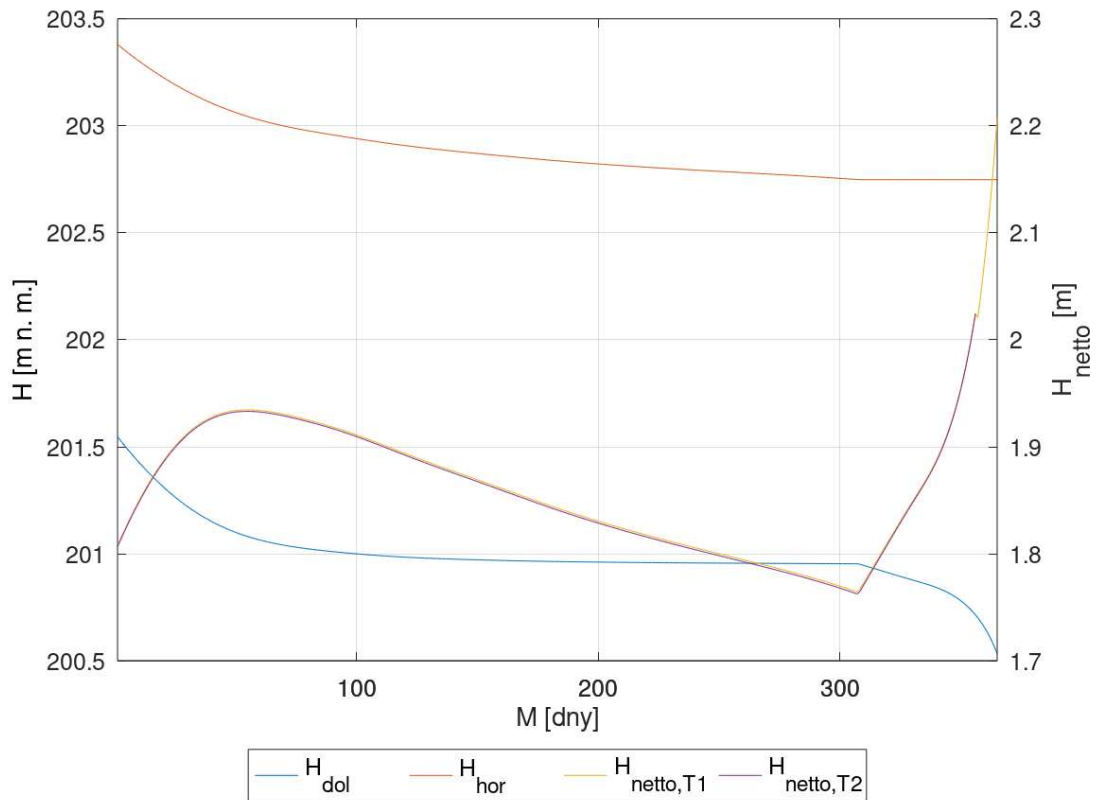
obr. 6.6 - Čáry trvání průtoků vodní elektrárnou a Q_{Md}



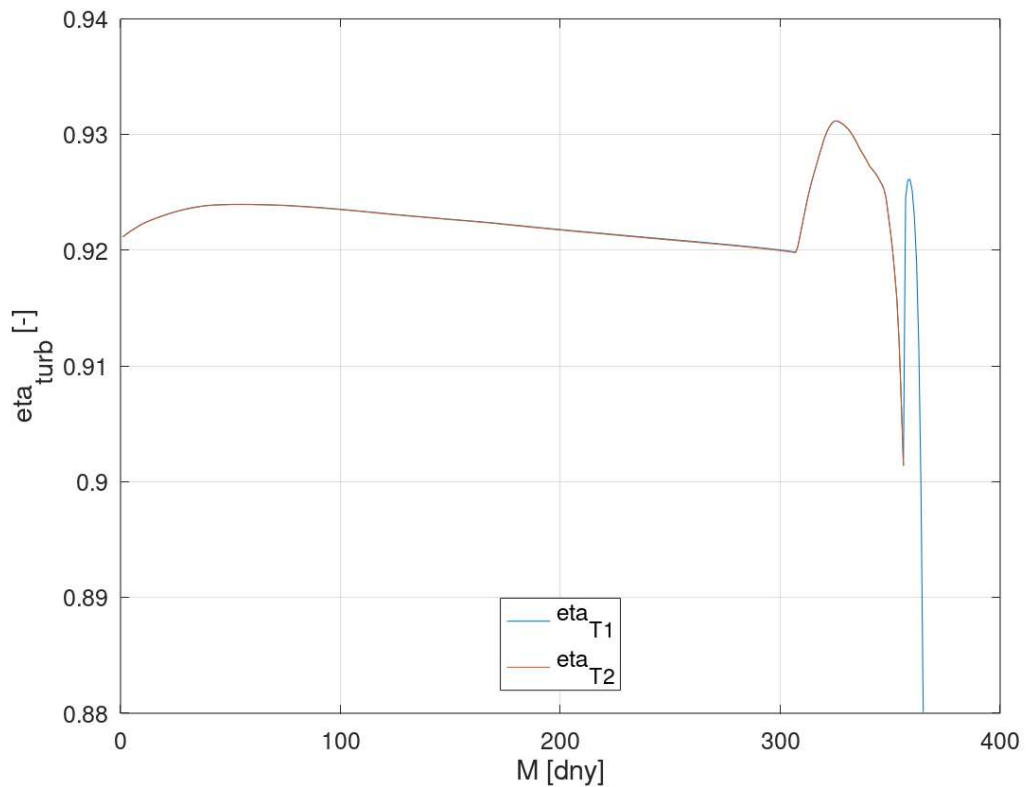
obr. 6.7 – Průběh hladin v odpadním kanálu



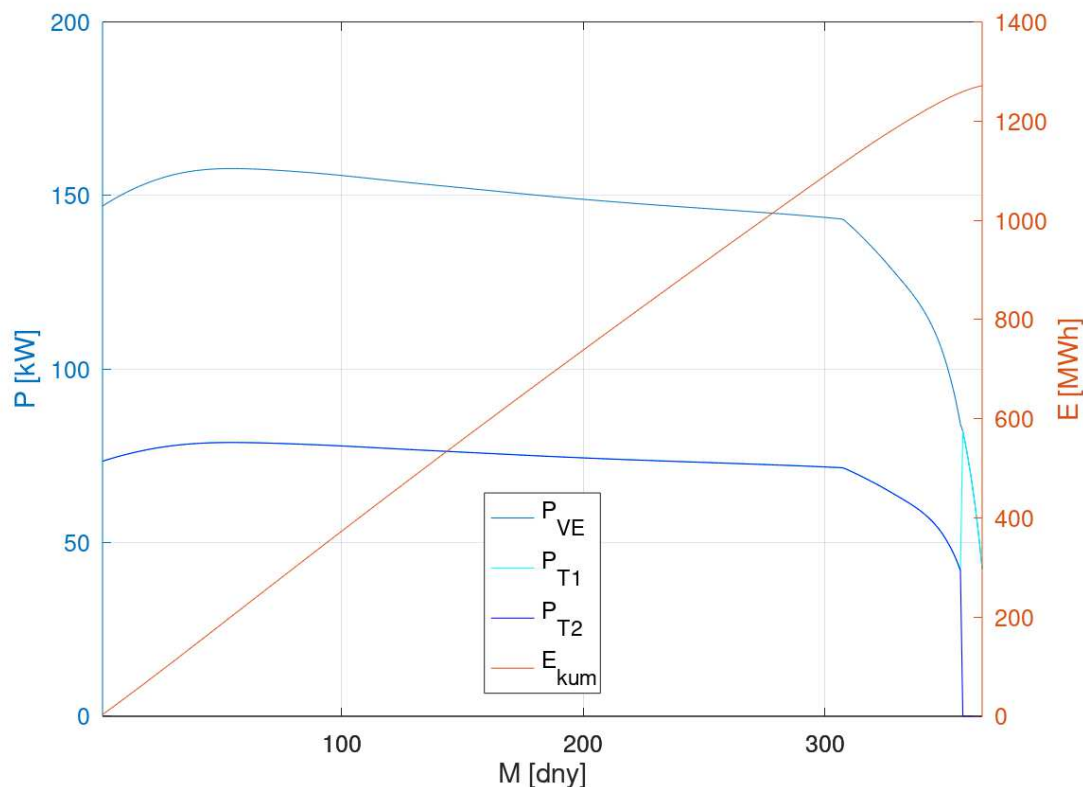
obr. 6.8 – Pracovní body turbín zakreslené do hlavní univerzální charakteristiky



obr. 6.9 – Čáry trvání úrovně horní a dolní vody a čistých spádů turbín



obr. 6.10 – Čáry trvání účinností turbín



obr. 6.11 – Čáry trvání výkonů a součtová čáry výroby na prahu VE

tab. 6.2 – Vybrané výsledky výpočtu výroby MVE v průměrném roce – varianta I

Veličina	Jednotka	Min. hodnota	Průměr	Max. hodnota
Průtok využitý MVE Q_{VE}	[m ³ /s]	2,45	9,59	10,0
Úroveň horní hladiny H_{hor}	[m n. m.]	202,75	202,89	203,38
Úroveň dolní hladiny H_{dol}	[m n. m.]	200,53	201,00	201,55
Čistý spád H_{netto}	[m]	1,76	1,86	2,21
Výkon MVE P_{VE}	[kW]	44,50	145,13	157,76
Celková výroba v prům. roce E	[MWh]	1271,3		

6.1.4 Odhad investičních nákladů stavby

Odhad investičních nákladů je rozdělen do 4 oddílů: Projektové a průzkumné práce, provozní soubory, základní rozpočtové náklady (ZRN), a rezerva + ostatní náklady + NUS (náklady na umístění stavby). Náklady prvního a čtvrtého oddílu byly odhadnuty na základě výše ZRN. Hrubý odhad cen provozních souborů byl poskytnut potenciálními dodavateli. Odhad ZRN byl proveden autorem na základě konzultací se zkušenějšími kolegy. Výsledky jsou uvedeny v následujících tabulkách.

tab. 6.3 – I. Projektové a průzkumné práce

Honorářová zóna	Započitatelné náklady	procentní sazba	cena bez DPH
III	23 500 000	7.5%	1 762 500

tab. 6.4 – II. Provozní soubory

PS 01	Technologie turbín		
	Turbína průměr oběžného kola 1.3 m včetně montáže, generátoru a agregátů		
	Cena:	9 800 000	Kč/ks
	Počet:	2	ks
	Cena celkem bez DPH:	9800000*2	= 19 600 000 Kč
PS 02	Elektrotechnické vybavení		
	2x silový rozvaděč, 1x kompenzační rozvaděč, 1x řídicí rozvaděč, kompletní rozvody a čidla, trafostanice		
	Cena:	1 850 000	Kč/ks
	Počet:	1	ks
	Cena bez DPH:	1850000*1	= 1 850 000 Kč

tab. 6.5 – III. Základní rozpočtové náklady

ZRN 01	Zemní práce, demolice, zakládání stavby, převedení vody za stavby	
	Cena celkem bez DPH:	12 400 000 Kč
ZRN 02	Nové železobetonové konstrukce, nová odnímatelná střecha	
	Cena celkem bez DPH:	11 100 000 Kč
ZRN 03	Úprava odpadního kanálu	
	Cena celkem bez DPH:	2 340 000 Kč

tab. 6.6 – IV. Rezerva, ostatní náklady a náklady na umístění stavby

ZRN	rezerva + ostatní náklady + NUS	
[Kč] (bez DPH)	[%]	[Kč] (bez DPH)
25 840 000	25	6 460 000

tab. 6.7 – Souhrn nákladů

Oddíl	Název nákladu	Bez DPH [Kč]
I.	Projektové a průzkumné práce	1 762 500
II.	Provozní soubory	21 450 000
III.	Stavební objekty (ZRN)	25 840 000
IV.	Rezerva + ostatní náklady + NUS	6 460 000
Celkem		55 512 500

V předchozí podkapitole byla vypočtena průměrná roční výroba el. energie 1271,3 MWh, což za předpokladu výkupní ceny včetně dotací 3,30 Kč/kWh odpovídá **průměrné roční výrobě 4 194 300 Kč**. Podílem nákladů a průměrné roční výroby je získána **prostá návratnost investice 13,24 let**.

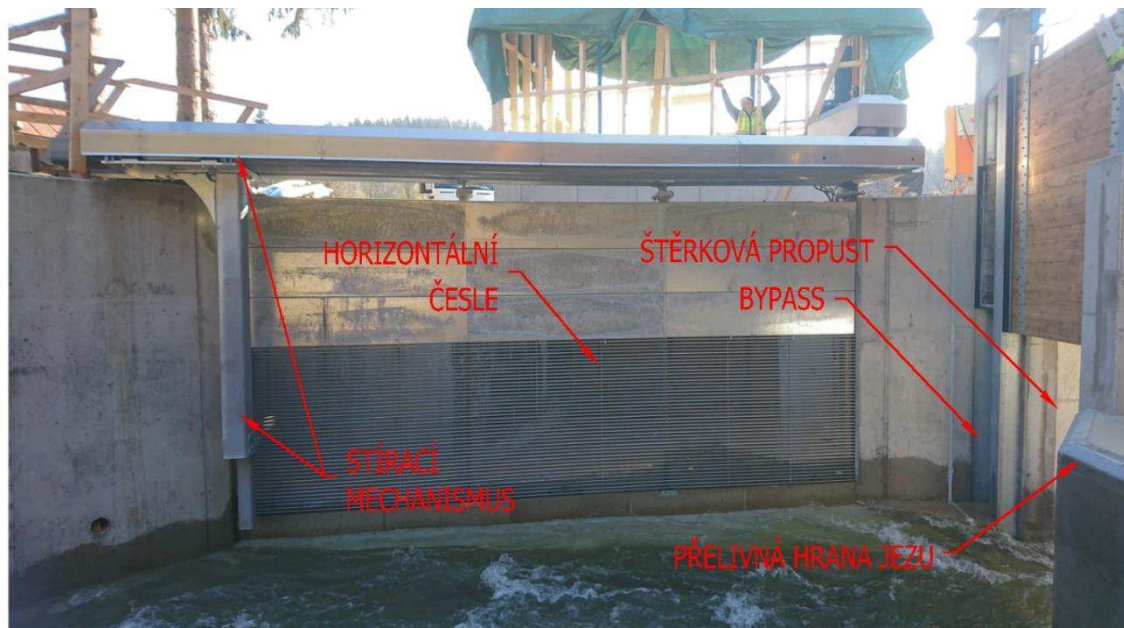
6.2 Varianta II – nová strojovna

Druhá varianta řešení rekonstrukce MVE Dobřichovice je ze stavebně technického hlediska poněkud náročnější. Jedná se o úplnou přestavbu strojovny MVE. Jelikož se předpokládá několikanásobné navýšení celkové hltnosti elektrárny, bylo v tomto případě od derivačního schématu upuštěno, aby mohl být využit kapacitní potenciál širokého profilu řeky Berounky. Nová elektrárna byla tedy navrhována jako jezová.

V rámci návrhu se předpokládá požadavek Povodí Vltavy, s.p., popřípadě Agentury ochrany přírody a krajiny na vybudování rybího přechodu, a proto byl uvažován v dispozičním návrhu nové strojovny. Typ rybího přechodu byl navržen jako přírodního charakteru a jeho situování je předpokládáno do koryta stávajícího odpadního kanálu. Více rybí přechod není v práci rozebírán, pouze je zahrnut do výpočtů výroby el. energie vodní elektrárnou jako přírůstek k minimálnímu zůstatkovému průtoku, který byl odhadnut jako $MZP_{RP} = 0,6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Opět je zváženo několik dílčích variant řešení. Ve všech je předpokládáno vybavení vtoku technologií horizontálních česlí (příklad instalace viz obr. 6.12), jejichž hlavní výhodou je umožnění poproudové migrace ryb a stírání česlí v horizontálním směru, díky čemuž odpadá problém vzniku odpadů vlivem vytažení shrabků z řečiště, a navíc nedochází k ochuzení toku o přirozený tok živin. Shrabky jsou totiž proplachování hrazenou propustí (bypass), která je při čistícím cyklu částečně otevírána tak, aby došlo k „proplachu“ ryb a zároveň shrabků do podjezí. Konstrukce česlí je zároveň postavena na prahu ve dně, který zabraňuje vstupu dnových splavenin do vtokového objektu. Z důvodu proplachu sedimentů nad prahem je předpokládán návrh šterkové propusti. Česlice horizontálních česlí jsou navrženy ze speciálně válcovaných profilů hydraulického tvaru. Podpěry česlic jsou řešeny jako vertikální.

Dalším společným znakem dílčích variant je návrh celkové hltnosti vodní elektrárny $Q_{VE,max} = 30 \text{ m}^3/\text{s}$, což odpovídá Q_{150d} .



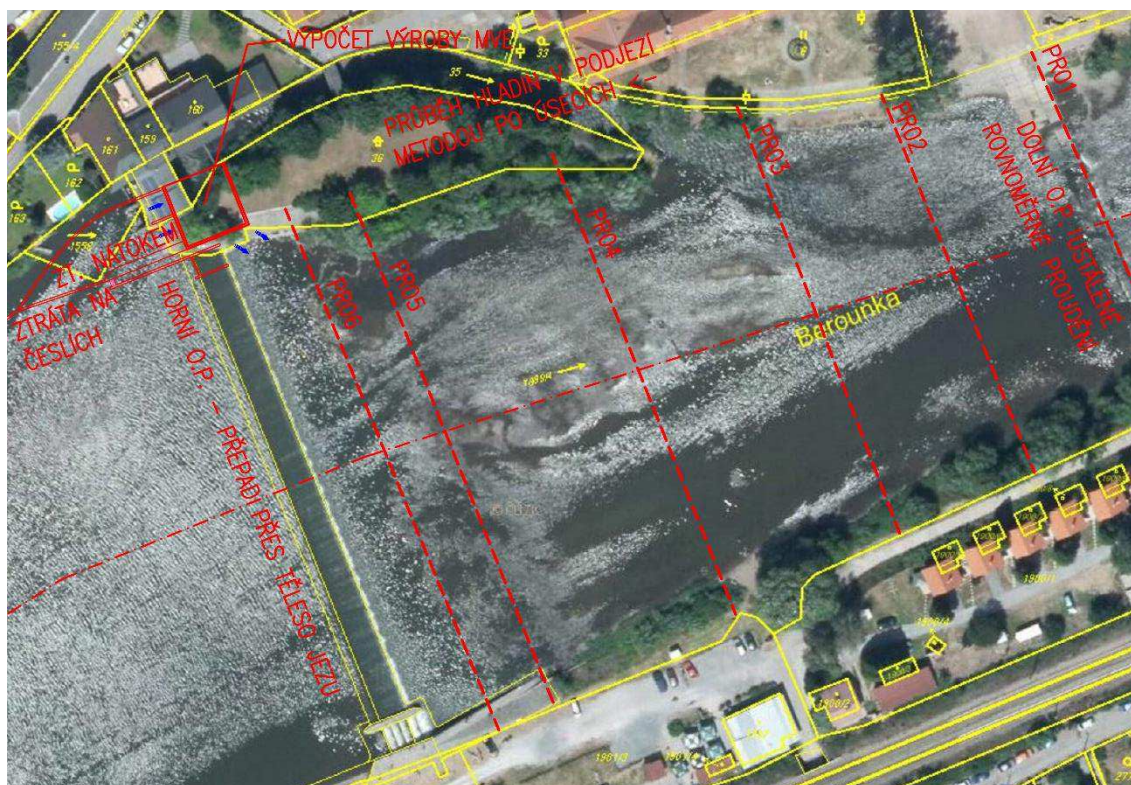
obr. 6.12 – Horizontální česle instalované na lokalitě MVE Vilémov

6.2.1 Předběžné návrhy řešení

V případě varianty II se jako limitující faktor pro návrh dispozičního řešení ukázalo půdorysné uspořádání, proto byly skici prvotních návrhů řešeny jako půdorysná schémata. Navrhovaným typem turbín ve variantě II byly vždy dvě přímoproudé turbíny v „S“ uspořádání, kdy bylo horní koleno savky v horizontální ose natočeno tak, aby došlo i k půdorysné změně směru proudění. Varianta s jednou turbínou nebyla uvažována z důvodu nemožného využití celého rozsahu průtokového potenciálu jednou turbínou s ohledem na požadavek co nejvyšších hodnot účinností turbíny. Navíc dle literatury [4] je pro MVE této velikosti doporučen návrh minimálně dvou turbín. Varianta tří turbín nebyla uvažována z důvodu nedostatku prostoru pro jejich vhodné dispoziční rozmístění.

V předběžných výpočtech bylo předpokládáno odstranění brodu, dolní okrajová podmínka tedy byla vypočtena na základě předpokladu ustáleného rovnoměrného proudění v profilu pod stávajícím brodem. Dalším výpočetním předpokladem bylo vyvedení odpadu elektrárny přímo pod jez. Dolní hladina byla tedy vypočtena metodou po úsecích od dolní okrajové podmínky po profil podjezí, kdy parametry profilů byly voleny na základě kalibrace v kap. 4.2.1. Schéma výpočetního modelu je uvedeno na obr. 6.13. Výpočet úrovně horní hladiny byl upraven o zkrácení jezu, které má za následek i

snížení MZP (předpokládán jako požadavek mokré celé přelivné hrany), a to z toho důvodu, že je odbourána ta část jezů, jejíž přelivná hrana dosahuje nejvyšších nadmořských výšek. MZP je tedy nově definován úrovní hladiny v nadjezí 200,70 m n. m. K MZP je dále připočten sanační průtok rybím přechodem odhadnutý jako 0,6 m³/s.



obr. 6.13 – Schéma výpočetního modelu

Parametry technické části modelu byly stanoveny obdobně jako u var I. Rozdílné jsou parametry česlí, jejichž plocha je $S_c = 25 \text{ m}^2$, rozteč česlic $b = 28 \text{ mm}$, tloušťka česlic $s = 7 \text{ mm}$, tvarový součinitel dle obr. 3.8 $\beta = 1,64$, koeficient podpěrných prvků byl uvažován $k_p = 2$ a koeficient zohledňující šikmost obtékání česlic $k_\delta = 2$. Dále byla odhadnuta ztráta nátokem mezi česlemi a vtokem do tlakové části. Ta byla definována jako:

$$h_{z,natok,i} = K Q_{VE,i}^2 \quad (6.1)$$

kde $K = 8 \cdot 10^{-5}$. Ztráta nátokem při plné hltnosti pak je $h_{z,natok,max} = 7,2 \text{ cm}$. Pokud bude varianta do budoucna zpracovávána podrobněji, je autorem doporučeno provést hydraulický výzkum nátoku pomocí matematického, popř. fyzikálního modelu.

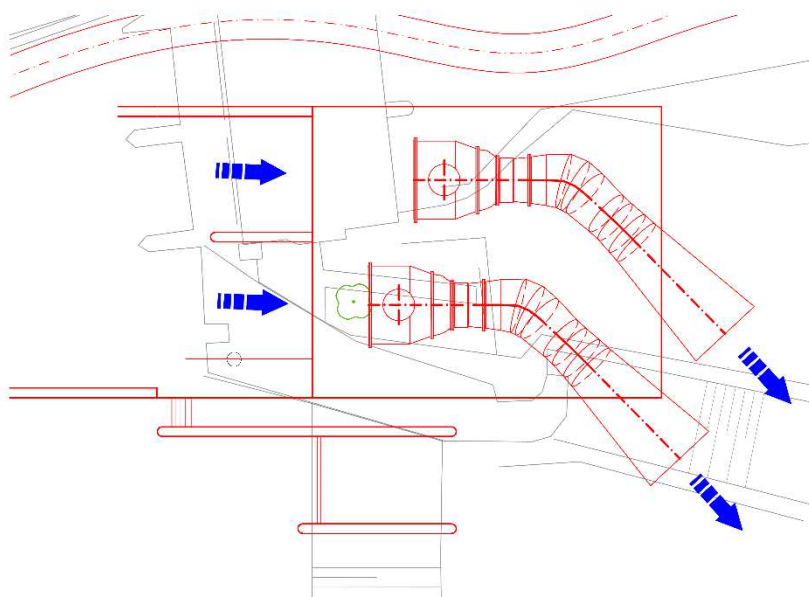
Pro výpočet byly zvažovány dvě varianty. Rozdělení hltnosti elektrárny $Q_{VE,max} = 30 \text{ m}^3/\text{s}$ do dvou stejných turbín v poměru 1:1 (A), ve druhé pak bylo uvažován

návrh jedné větší a jedné menší turbíny, kdy je hltnost elektrárny rozdělena na turbíny v poměru 2:1 (B). Vybrané výsledky výpočtu viz tab. 6.8.

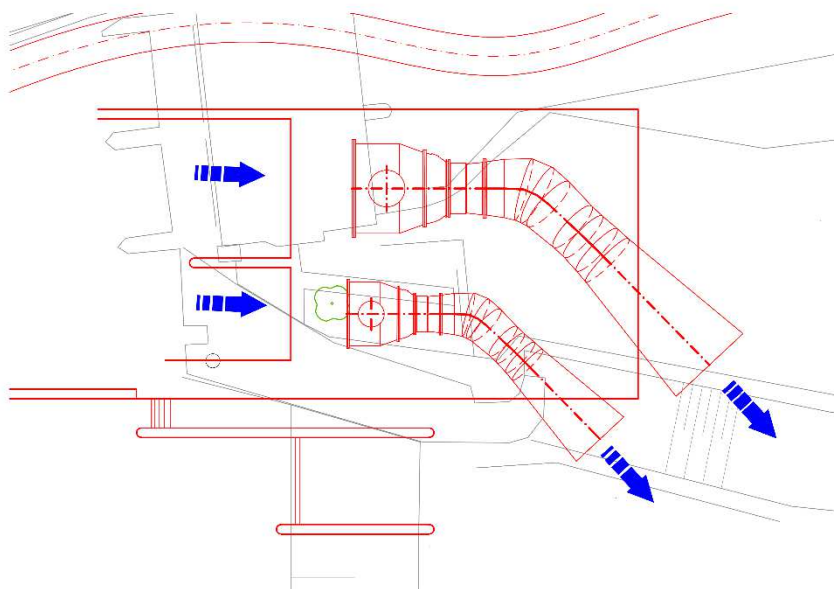
tab. 6.8 – Vybrané výsledky předběžných výpočtů

Var	$Q_{\text{turb,max}}$ [m ³ /s]	H_{opt} [m]	D_{OK} [m]	H_{dol} [m n. m.]		$P_{\text{VE,max}}$ [kW]	E [MWh]
				min.	max.		
A	2x15	1,93	2,20	200,38	201,49	430,90	2916,9
B	20	1,93	2,54	200,38	201,49	429,93	2917,1
	10	2,30	1,76				

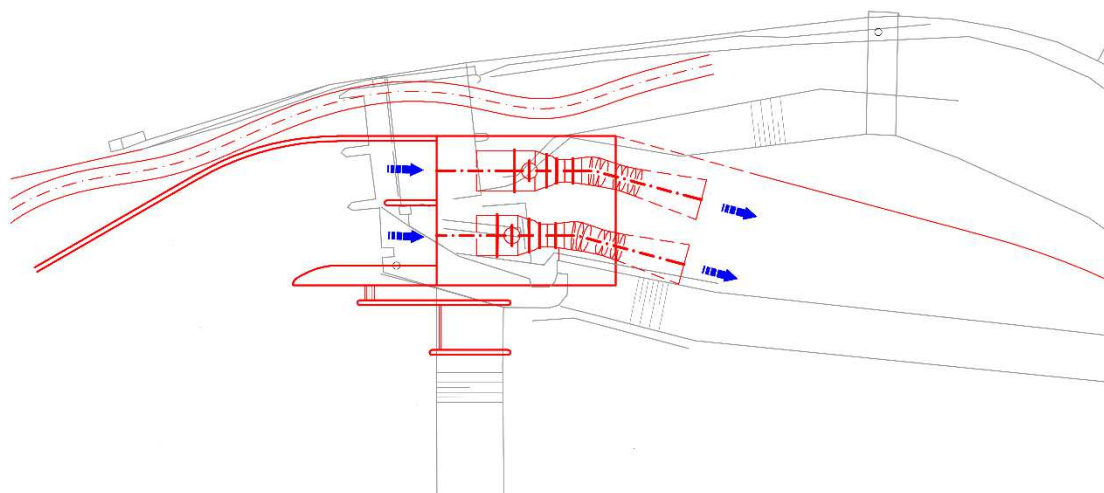
Z tab. 6.8 je patrné, že rozdíl výsledků v průměrném roce je prakticky zanedbatelný. Většího rozdílu by bylo pravděpodobně dosaženo v suchém roce, kdy by varianta B měla vykazovat lepší výsledky. Větší průměr oběžného kola velké turbíny ve var. B vede k nižší úrovni základové spáry, a tedy i k prodražení výkopových prací, proto byla pro dispoziční schémata uvažována spíše varianta A, ale např. na obr. 6.15 má var. B své dispoziční opodstatnění. V prvních návrzích bylo uvažováno s půdorysným odklonem savek od osy turbíny o 45° (obr. 6.14, obr. 6.15), nicméně tato varianta vede k významnému zásahu odpadu turbín do podjezí a odpadů propustí. Proto byla zvážena varianta půdorysného odklonu osy savky od osy turbíny o 15° za předpokladu „obětování“ výrazné části ostrova (obr. 6.16). Tato varianta se dispozičně ukázala jako vhodná a je vybrána k podrobnějšímu zpracování.



obr. 6.14 – Skica 2x „S“ turbína $D_{\text{OK}} = 2,20$ m, odklon savky 45°



obr. 6.15 – Skica 2x „S“ turbína $D_{OK,1} = 2,54$ m, $D_{OK,2} = 1,76$ m, odklon savky 45°



obr. 6.16 – Skica 2x „S“ turbína $D_{OK} = 2,20$ m, odklon savky 45°

6.2.2 Základní popis stavebně technického řešení

Nová strojovna je situována návodní stěnou rovnoběžně s osou jezu tak, aby líc stěny byl ve stejné rovině s rovinou přelivné hrany jezu. Půdorysné rozměry strojovny jsou 15×15 m. Základová spára je navržena na kótě 194,84 m n. m, což vede k rozsáhlému zahloubení do skalního podloží.

Vtokový objekt je proti vniku plavenin chráněn horizontálními česlemi šířky 25 m a výšky 1 m. Práh horizontálních česlí je na kótě 201,70. Převýšení prahu je 0,25 m plus šikmina před prahem, jejíž výška vychází z geometrie. Na šikminu kolmou k prahu navazuje železobetonová deska, která je provedena ve sklonu 1 % směrem ke šterkové propusti, jejíž práh je na kótě 201,00 m n. m. Šterková propust je hrazena dvoudílným

stavidlem, které nebylo v rámci diplomové práce podrobněji rozebíráno. Pro správnou funkci česlí je navržena propust – „bypass“ hrazená klapkovým uzávěrem. Propust také nebyla podrobněji rozebírána.

Za horizontálními česlemi je situován nátokový železobetonový kanál přivádějící vodu ke vtoku do tlakové části. Kanál je rozdělen do dvou polí středním pilířem. Pro revizní zahrazení polí jsou navrženy stavidlové uzávěry po jednom kusu v každém poli. Zakrytí kanálu je od česlí po profil 4 m v ose za stavidly navrženo pororošty na ocelových nosnících, a to hlavně z důvodu umožnění relativně snadného odkrytí a vstupu do kanálu. Po toku dále je kanál uzavřen železobetonovým stropem, aby celkově tvořil tuhý rám, což vede k příznivějším dimenzím stěn v nejhlubším bodě. Pro případné potřeby proplachu ledových ker, které se mohou za česlemi vytvořit jsou navrženy v každém poli stavítka s prahy v úrovni 202,00 m n. m. šířky 1,5 m. Proplach z pravého pole je prováděn do propusti bypass, proplach z levého pole pak do rybího přechodu.

Vtok je proveden jako železobetonový s hydraulickým zaoblením stěn a stropu. Od vstupního profilu je v délce 4 m navržena přechod z obdélníkového profilu na kruhový o průměru 4,02 m. Za koncovým kruhovým profilem navazuje zabetonované ocelové potrubí, jehož příruba vyčnívá do prostoru strojovny pro relativně pohodlné napojení turbíny.

Spodní stavba strojovny je navržena jako železobetonová, založená na skalním podloží. Dimenze viz výkresová část. Horní stavba je navržena opět jako železobetonová se vstupem nad úroveň hladiny stoleté vody 206,70 m n. m. Hladina Q_{100} byla odhadnuta na základě map záplavových území a digitálního modelu terénu. Bezpečnostní převýšení nad touto hladinou je 30 cm. Úroveň vstupu do strojovny tedy je na kótě 207,00 m n. m. Navržená úroveň terénu před vstupem je 205,20 m n. m. a vzniklé převýšení je překonáno ocelovým schodištěm šířky 1,5 m. Vstupní dveře do strojovny jsou navrženy jako dvoukřídlé šířky 900 + 550 mm a výšky 1980 mm. Vstup je situován u rohu stavby ze strany savky a podjezí. Ve strojovně je za vstupem na jezové straně navrženo ochoz tvořený železobetonovou konzolou šířky 2,0 m. Přes něj je možné projít na návodní stranu strojovny, kde ochoz pokračuje ve směru kolmém ke směru proudění. Zde je pochozí konstrukce rozšířena na 4,95 m, což je dostatek prostoru pro uložení elektrotechnických rozvaděčů a hydraulických a mazacích agregátů, a to bezpečně nad úroveň Q_{100} . Z této strany je dále možné dveřmi šířky 900 mm a výšky 1980 mm přes ocelové schodiště projít na uzavřenou konstrukci přívodního kanálu. Uvnitř stavby je dále v ochozu navržena otvor

pro umístění ocelového schodiště, kterým se dá sestoupit do spodní stavby na „podestu“ tvořenou betonovou konstrukcí vtoku. Odtud je možné sestoupit až k turbínám po žebříkovém schodišti umístěném mezi turbínami.

Turbíny jsou navrženy jako přímoproudé v „S“ uspořádání, ve kterém jsou kolena savky navrženy tak, aby za turbínou došlo ke změně směru o 15° jak ve vertikální, tak v horizontální rovině. Savky jsou vyvedeny za půdorysný profil strojovny a jsou stabilizovány masivním tížným betonovým blokem. Turbína je kotvena přes železobetonové sloupky do základové desky. Kotvení savky do základové desky je také předpokládáno, přestože není ve výkresech vyznačeno. Tížný blok savek je zasypán na navrženou úroveň terénu 205,20 m n. m., což odpovídá stávající úrovni vozovky lávky. Z návodních stran je terén stabilizován opěrnými železobetonovými stěnami, které jsou kotveny do tížného bloku savek.

Pod výtoky savek navazuje vodorovná základová deska na úrovni 195,54 m n. m., délky 2,0 m a svislé pilíře se zaobleným dolním zhlavím. V tomto profilu jsou navrženy drážky provizorního hrazení, jehož realizace se předpokládá vložením stavidlových tabulí do drážek pomocí autojeřábu. Dále je základová deska vedena po proudu ve sklonu 1:4 až do průsečíku s navrhovaným dnem na úrovni 200,00 m n. m.

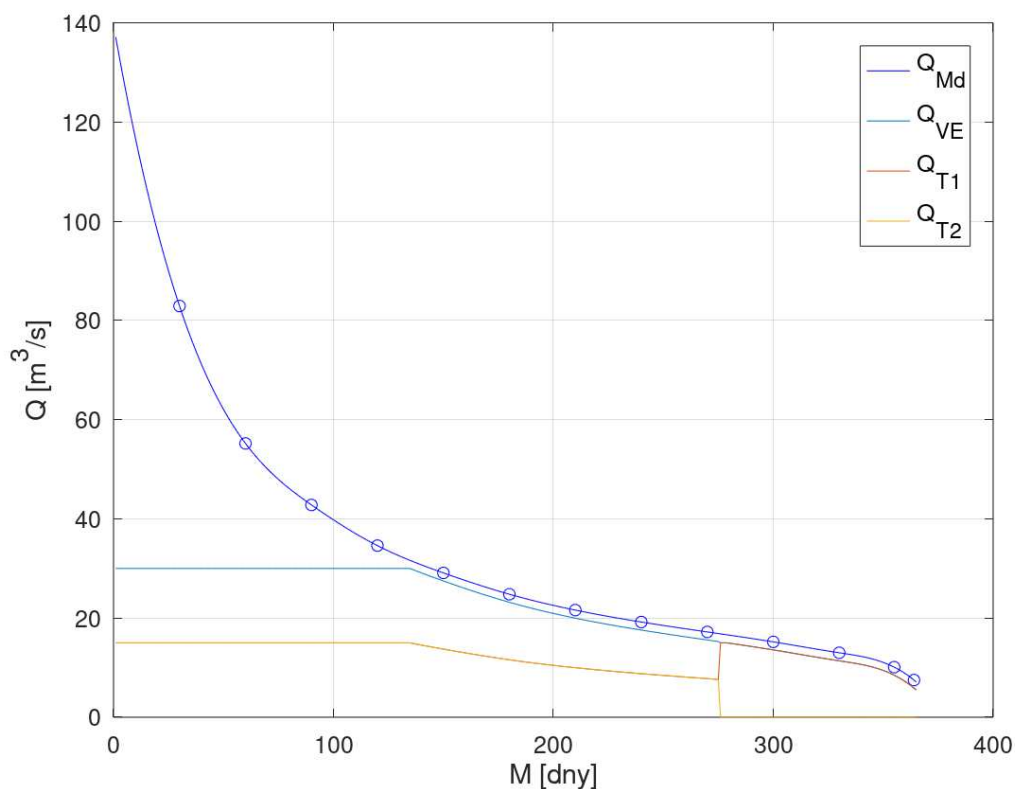
Převedení vody za stavby je navrženo zajímkováním vtoku elektrárny a dolního profilu odpadního kanálu zemními hrázkami z místních materiálů. Takovýmto způsobem byla zajímkována stavba rybních přechodů na lokalitě jezu stejného typu v sousední obci Řevnice, také na toku Berouňky. Zajímkování hrázkami fungovalo bez výrazných průsaků, a proto bylo navrženo i na této lokalitě. Pro konstrukci hrázek je doporučena zonace použitého materiálu – případné jílovité zeminy umisťovat do středu a pro stabilizační část použít hrubozrný materiál získaný prohrábkou v podjezí. V případě hrázky v podjezí je nutné provést stabilizaci návodní paty svahu těžkým kamenným záhozem, popřípadě je v případě odstranění brodu možné využít betonových panelů, které brod tvoří.

Pro dostatečný příjezd ke stavbě strojovny je nutné stabilizovat zbývající části ostrova opěrnými stěnami tak, aby vznikla dostatečná průjezdná šířka pro pojezd autojeřábu. Z těchto důvodů je nutné zkrátit konstrukci lávky (převařením hlavních nosníků), popř. navrhnout novou lávku.

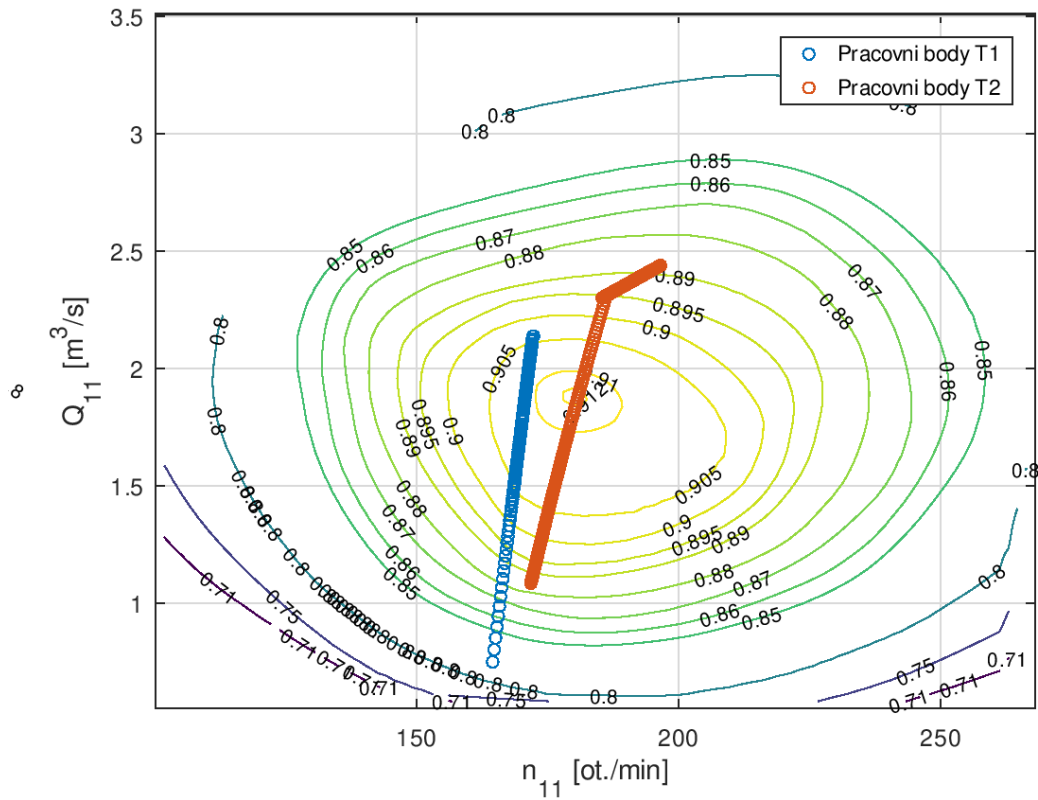
6.2.3 Podrobný výpočet výroby

Uvedené výsledky jsou platné pro schéma na obr. 6.13 – výpočet varianty A dle kap. 6.2.1. Autor si uvědomuje vzniklou chybu výpočtem dolní hladiny, nicméně takto definovaný soutok je pro výpočet metodou po úsecích příliš složitý. Dle autora je přesnost výpočtu pro prvotní odhady dostačující, ale pokud by se přistoupilo k podrobnějšímu návrhu, je autorem doporučeno posouzení výtoku z elektrárny ideálně 3D matematickým modelem, popřípadě fyzikálním modelem. Dále je autorem doporučeno provedení podrobného zaměření podjezí i nadjezí včetně průběhů hladin, ideálně pro 3 a více hodnot průtoků.

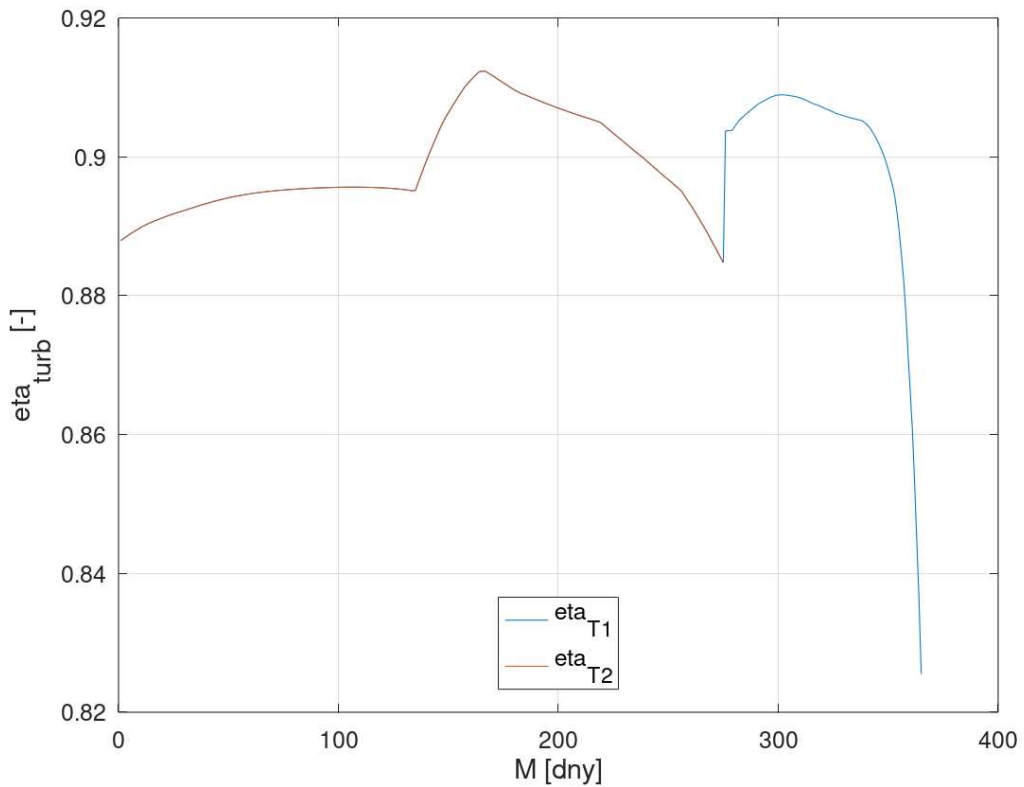
Grafické výstupy jsou uvedeny na obr. 6.17 až obr. 6.21. Vybrané výsledky jsou vypsány v tab. 6.9.



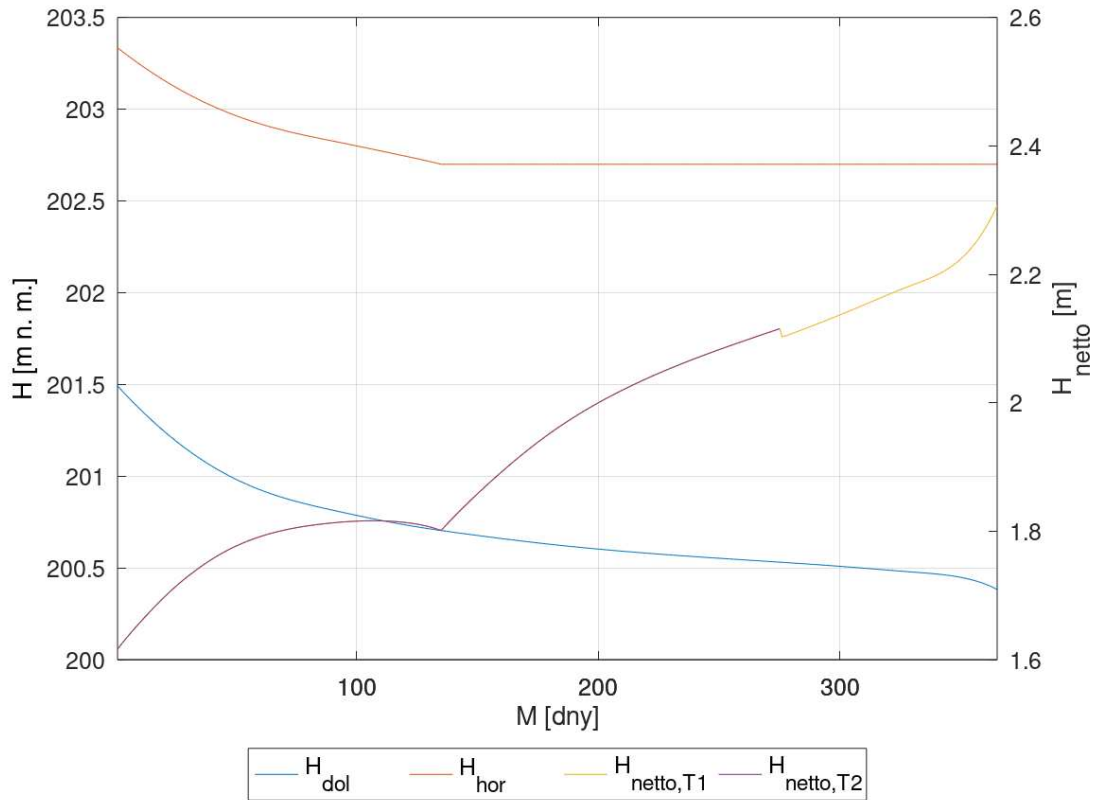
obr. 6.17 – Čáry trvání průtoků vodní elektrárnou a Q_{Md}



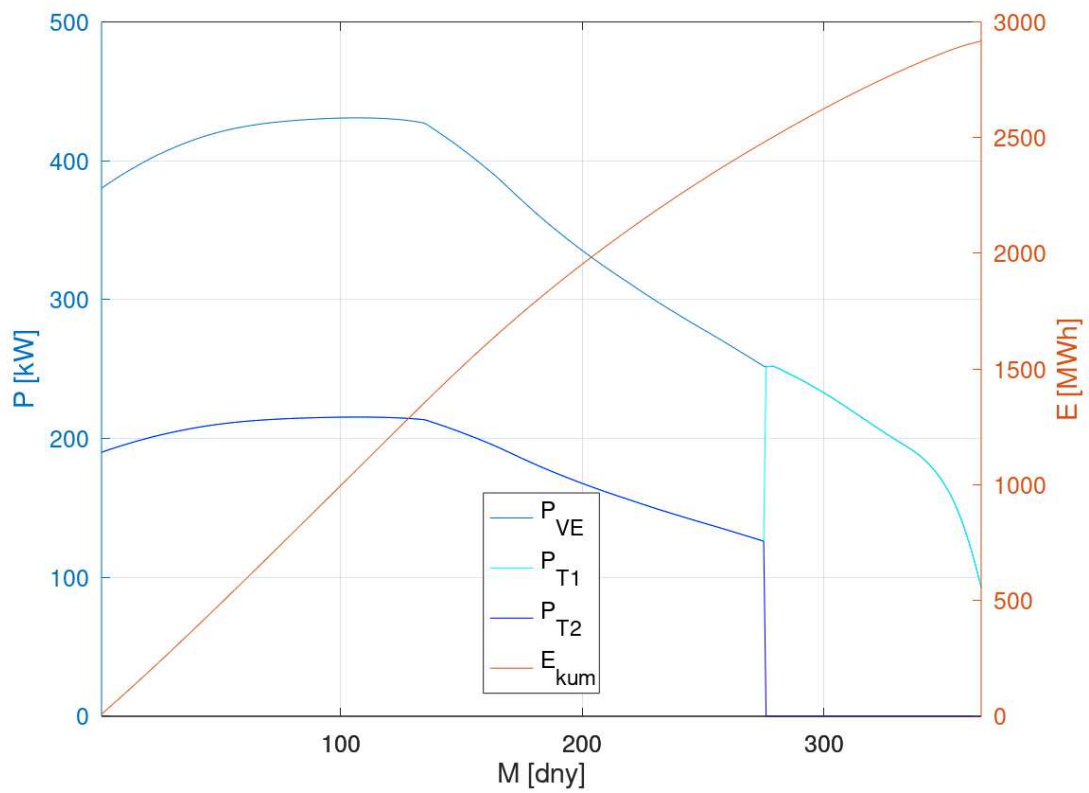
obr. 6.18 – Pracovní body turbín zakreslené do hlavní univerzální charakteristiky



obr. 6.19 – Čáry trvání účinností turbín



obr. 6.20 – Čáry trvání úrovně horní a dolní vody a čistých spádů turbín



obr. 6.21 – Čáry trvání výkonů a součtová čáry výroby na prahu VE

tab. 6.9 – Vybrané výsledky výpočtu výroby MVE v průměrném roce – varianta II

Veličina	Jednotka	Min. hodnota	Průměr	Max. hodnota
Průtok využitý MVE Q_{VE}	[m ³ /s]	5,51	22,11	30
Úroveň horní hladiny H_{hor}	[m n. m.]	202,70	202,79	203,33
Úroveň dolní hladiny H_{dol}	[m n. m.]	200,38	200,71	201,49
Čistý spád H_{netto}	[m]	1,62	1,96	2,31
Výkon MVE P_{VE}	[kW]	92,560	332,98	430,90
Celková výroba v prům. roce E	[MWh]	2916,9		

6.2.4 Odhad investičních nákladů

Odhad investičních nákladů je rozdělen do 4 oddílů: Projektové a průzkumné práce, provozní soubory, základní rozpočtové náklady (ZRN), a rezerva + ostatní náklady + NUS (náklady na umístění stavby). Náklady prvního a čtvrtého oddílu byly odhadnuty na základě výše ZRN. Hrubý odhad cen provozních souborů byl poskytnut potenciálními dodavateli. Odhad ZRN byl proveden autorem na základě konzultací se zkušenějšími kolegy. Výsledky jsou uvedeny v následujících tabulkách:

tab. 6.10 – I. Projektové a průzkumné práce

Honorářová zóna	Započitatelné náklady	procentní sazba	cena bez DPH
III	68 800 000	7.5%	5 160 000

tab. 6.11 – II. Provozní soubory

PS 01	Technologie turbín			
	Turbína průměr oběžného kola 2,2 m včetně montáže, generátoru a agregátů			
	Cena:	17 000 000	Kč/ks	
	Počet:	2	ks	
	Cena celkem bez DPH:	17000000*2	=	34 000 000 Kč
PS 02	Elektrotechnické vybavení			
	2x silový rozvaděč, 1x kompenzační rozvaděč, 1x řídicí rozvaděč, kompletní rozvody a čidla, trafostanice			
	Cena:	2 550 000	Kč/ks	
	Počet:	1	ks	
	Cena bez DPH:	2550000*1	=	2 550 000 Kč

PS 03	Stavidla, horizontální česle, klapka, provizorní hrazení		
Cena:	13 300 000	Kč/ks	
Počet:	1	ks	
Cena bez DPH:	13300000*1	=	13 300 000 Kč

tab. 6.12 – III. Základní rozpočtové náklady

ZRN 01	Zemní práce, zakládání stavby a převedení vody za stavby		
Cena celkem bez DPH:		10 300 000	Kč
ZRN 02	Spodní + horní stavba strojovny, nátok, výtok, terénní úpr.		
Cena celkem bez DPH:		58 500 000	Kč

tab. 6.13 – IV. Rezerva, ostatní náklady a náklady na umístění stavby

ZRN	rezerva + ostatní náklady + NUS	
[Kč] (bez DPH)	[%]	[Kč] (bez DPH)
68 800 000	5	3 440 000

tab. 6.14 – Souhrn nákladů

Oddíl	Název nákladu	Bez DPH [Kč]
I.	Projektové a průzkumné práce	5 160 000
II.	Provozní soubory	49 850 000
III.	Stavební objekty (ZRN)	68 800 000
IV.	Rezerva + ostatní náklady + NUS	3 440 000
Celkem		127 250 000

V předchozí podkapitole byla vypočtena průměrná roční výroba el. energie 2916,9 MWh, což za předpokladu výkupní ceny včetně dotací 3,30 Kč/kWh odpovídá **průměrné roční výrobě 9 625 770 Kč**. Podílem nákladů a průměrné roční výroby je získána **prostá návratnost investice 13,22 let**.

Závěr

V diplomové práci byl popsán a posouzen stávající stavebně technický stav malé vodní elektrárny Dobřichovice. Z pohledu stavební stránky jsou stavební objekty provozuschopné a dle vizuálního průzkumu nebyl nalezen žádný prvek způsobující havarijný stav stavby. Z hydraulického hlediska se však stavba ukázala jako značně poddimenzovaná. Elektrárnou je využíván jen malý zlomek průtokového potenciálu lokality a odpadní kanál elektrárny byl vyhodnocen jako značně nekapacitní, a to v takovém rozsahu, že zde derivační schéma prakticky škodí. V práci byla zvážena možnost zachování stávající technologie a provedení pouze zkapacitnění odpadního kanálu, což výpočetně sice vedlo ke snížení úrovně hladiny dolní vody a navýšení spádu, ale zároveň by takováto úprava vedla k odhalení stropů savek a pravděpodobnému strhávání vzduchu k turbínám. To by mělo za následek jejich kavitaci.

Pro výpočet výroby elektrické energie průběžnou vodní elektrárnou byl autorem práce vytvořen výpočetní skript a několik funkcí ve výpočetním prostředí Octave, který není nic jiného než open source alternativou výpočetního programu MATLAB. Autor se pro potřeby výpočtu poměrně do hloubky zabýval metodou po úsecích a metodikou výpočtu výroby vodní elektrárnou včetně stanovení místních ztrát na česlích, vtoku atp. Vytvořený výpočetní skript za podpory autorem definovaných funkcí počítá komplexní úlohu výpočtu výroby. Do výpočtu je zahrnut výpočet průběhu hladin pod elektrárnou v závislosti na definici dolní okrajové podmínky a parametrů dolního koryta, výpočet horní hladiny v závislosti na horní okrajové podmínce a následný výpočet čistých spádů, výkonů a výroby. To vše pro prakticky jakoukoliv zadanou průtokovou řadu. V práci byly uvažovány pouze roční řady průtoků interpolované pro každý den v roce. Parametry programu byly pro stávající stav zkalibrovány na základě geodetického zaměření lokality a následně byl využit pro výpočty zmíněných veličin pro stávající stav a navrhovaná řešení v průměrném roce pro řadu M-denních průtoků.

Pro stávající stav v průměrném roce byly vypočteny hodnoty: Průměrný čistý spád 1,42 m, průměrný výkon na prahu MVE 75,25 kW, výroba el. energie 659,15 MWh.

Dále bylo přistoupeno k variantnímu návrhu řešení rekonstrukce MVE Dobřichovice. Jak je uvedeno v úvodu, byly zvažovány dvě varianty. Pro každou variantu bylo dále zváženo několik dílčích variant řešení.

Variantou I je zachování stávající strojovny, návrh nové technologie turbín a zkapacitnění odpadního kanálu. V této variantě se jako limitující prvek ukázala velikost stávající strojovny, kdy po zvážení dílčích variant autor přistoupil k návrhu dvou přímoproudých Kaplanových turbín s osou odkloněnou od horizontální roviny o 10° hltnosti $2 \times 5 \text{ m}^3/\text{s}$, což odpovídá stávajícímu stavu. K navýšení průtokového potenciálu tedy nedošlo, ale vlivem navýšení účinnosti technologií a vlivem zkapacitnění odpadního kanálu přesto došlo k výraznému zlepšení výsledků výpočtu výroby v průměrném roce: Průměrný čistý spád 1,86 m (navýšení 0,44 m), průměrný výkon na prahu vodní elektrárny 145,13 kW (navýšení 69,88 kW) a výroba 1271,3 MWh (navýšení 612,15 MWh). Odhadované investiční náklady pro tuto variantu jsou 55 512 500 Kč, což při uvažování výkupní ceny včetně dotací 3,30 Kč vede k návratnosti investice 13,24 let (stávající výroba není ve výpočtu uvažována).

Variantou II je demolice stávající strojovny a výstavba nové elektrárny na lokalitě. Pro tuto variantu bylo zvoleno jezové schéma a celková hltnost elektrárny $30 \text{ m}^3/\text{s}$, což cca odpovídá Q_{150d} . Po zvážení dílčích variant autor vybral pro návrh dvě přímoproudé Kaplanovy turbíny v „S“ uspořádání, kdy horní koleno savky je navrženo a pootočeno tak, aby došlo ke změně směru proudění v horizontálním i vertikálním směru o 15° . Dolní koleno následně vyrovnává pouze změnu směru ve vertikální rovině, jak je zvykem. Navržené hltnosti turbín jsou $2 \times 15 \text{ m}^3/\text{s}$. V tomto případě byly výsledky výpočtu výroby v průměrném roce: Průměrný čistý spád 1,96 m (navýšení 0,54 m), průměrný výkon na prahu vodní elektrárny 332,98 kW (navýšení 257,73 kW) a výroba 2 916,9 MWh (navýšení 2 257,75 MWh). Odhadované investiční náklady pro tuto variantu jsou 127 250 000 Kč, což při uvažování výkupní ceny včetně dotací 3,30 Kč vede k návratnosti investice 13,22 let (stávající výroba není ve výpočtu uvažována).

Z výpočtu návratností je tedy patrné, že výběr nejvýhodnější varianty je spíše záležitostí investora.

S ohledem na nedefinovatelnost nejvýhodnější varianty a na rozsah práce se autor rozhodl vypracovat zjednodušenou výkresovou dokumentaci pro obě varianty, která je uvedena v přílohové části.

Použité zdroje

Podklady a odborná literatura:

- [1] BREJCHA, Ivo. *Zpráva o hodnocení množství povrchových vod v dílčím povodí Berounky za rok 2018*. Praha: Povodí Vltavy, s.p., 2019.
- [2] BROŽA, Vojtěch. *Využití vodní energie*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1990.
- [3] GABRIEL, Pavel a Jitka KUČEROVÁ. *Navrhování vodních elektráren*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 80-01-01304-9.
- [4] GABRIEL, Pavel, František ČIHÁK a Petr KALANDRA. *Malé vodní elektrárny*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01812-1.
- [5] *Geologický a hydrogeologický průzkum lokality*. Autor neznámý.
- [6] HAVLÍK, Vladimír a Ivana MAREŠOVÁ. *Hydraulika: Příklady*. Díl 1. Praha: České vysoké učení technické, 1994. ISBN 80-01-01162-3.
- [7] HAVLÍK, Vladimír, Ivana MAREŠOVÁ a České vysoké učení technické v Praze. Stavební fakulta. *Hydraulika 20: Příklady*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02355-9
- [8] JOVANOVIČKOVÁ, Jana. *Hydrologické údaje povrchových vod*. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2014
- [9] KOLÁŘ, Václav, Cyril PATOČKA a Jiří BÉM. *Hydraulika*. Vyd. 1. Praha; Bratislava;: Nakladatelství techn. lit, 1983. ISBN 04-718-83.
- [10] KOVÁŘ, Pavel. *Vertikální česle*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [11] LEBEDA, František. *MVE Dobřichovice, k.ú. Dobřichovice, okres Praha – západ*. Polohopisný a výškopisný plán: Podklad pro projekt. Strakonice: Geodetická kancelář Ing. František Lebeda, 2014
- [12] MAREŠ, Karel. *Úpravy toků: navrhování koryt*. 1. vyd. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1985.
- [13] MARTAN, Pavel. *Povolení k nakládání s povrchovými vodami pro MVE Dobřichovice – Berounka ř. km 16,117, č. h. p. 1-11-05-042*. Praha: Městský úřad Černošice, 2011
- [14] MATTAS, Daniel. *Výpočet průtoku v otevřených korytech*. 1. vyd. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., 2014. ISBN 978-80-87402-27-6.

- [15] MEDŘICKÝ, Vladimír a Petr VALENTA. *Hydrotechnické stavby 1: navrhování jezů*. Vyd. 2., přeprac. Praha: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04309-7.
- [16] MELICHAR, Jan, Jan VOJTEK a Jaroslav BLÁHA. *Malé vodní turbíny: konstrukce a provoz*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01808-0.

Online zdroje:

- [17] KRÁL, Pavel. *Jez v Dobřichovicích*. [online]. [cit. 9.12.2019]. Dostupné z: https://zakladani.cz/casopis/archiv/3_00/casbody06.htm
- [18] *Nahlížení do katastru nemovitostí*. © Český úřad zeměměřický a katastrální, 2004 – 2019, [online]. [cit. 9.12.2019]. Dostupné z: <https://nahlizeni.dokn.cuzk.cz/VyberKatastrMapa.aspx#>
- [19] SEDLÁK, Jan. *Změna č. 2 územního plánu sídelního útvaru Dobřichovice*. © Ing. arch. Jan Sedlák projekční ateliér, 2006. [online]. [cit. 09.12.2019]. Dostupné z: <https://www.dobrichovice.cz/samosprava/uzemne-planovaci-dokumentace/platny-uzemni-plan/>
- [20] *Výpis atributu objektu z tematických vrstev – point (-755822 -1059402)*. © AOPK ČR. [online]. [cit. 09.12.2019]. Dostupné z: http://webgis.nature.cz/AopkReport/Report.aspx?S_RepType=01&S_ShpDefTy pe=shape&S_ShpDef=point%28-755822%20-1059402%29
- [21] ZEMĚMĚŘIČSKÝ ÚŘAD. *12-41 Beroun*. [online databáze]. Základní vodohospodářská mapa ČR. 1:50 000. 4. vyd. Praha: Český úřad zeměměřický a katastrální, 1995. [cit. 9.12.2019]. Dostupné z: <https://heis.vuv.cz/data/webmap/datovesady/HEIS/ZVM50/mapovelistyn/1241.tif>

Normy:

- [22] ČSN 75 1400. *Hydrologické údaje povrchových vod*. Praha: Český normalizační institut, 2014.
- [23] ČSN 75 2601. *Malé vodní elektrárny – Základní požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2010.

Seznam obrázků

obr. 1.1 – Zakreslení lokality do hydrotechnické mapy [21].....	7
obr. 1.2 – Uspořádání objektů vodního díla – katastrální mapa [17].....	8
obr. 1.3 – Výřez z hlavního výkresu územního plánu města Dobřichovice [19]	9
obr. 1.4 – Lokalita geologického průzkumu	10
obr. 2.1 – Dobřichovický jez v době rekonstrukce [17]	14
obr. 2.2 – Pohled proti vodě na jez Dobřichovice	14
obr. 2.3 – Vtokový objekt MVE	16
obr. 2.4 – Oprava výtoku pod elektrárnou v roce 2011	17
obr. 2.5 – Soustrojí T2 v horní stavbě.....	17
obr. 2.6 – Pohled z lávky na odpadní kanál proti vodě.....	18
obr. 2.7 – Pohled z lávky na odpadní kanál po vodě	19
obr. 2.8 – Brod přes řeku Berounku pod soutokem s odpadním kanálem MVE	19
obr. 3.1 – Srovnání uživatelského prostředí Octave (vlevo) a MATLAB (vpravo)	20
obr. 3.2 – Bernoulliho rovnice pro úsek otevřeného koryta	21
obr. 3.3 Energetická výška E v závislosti na hloubce y [14]	26
obr. 3.4 – Algoritmus výpočtu průběhu hladin metodou po úsecích	28
obr. 3.5 – Schéma k popisu f_{char_pr} na konkrétním příkladě.....	29
obr. 3.6 – Součinitel zatopení dolní vodou pro přepad přes širokou korunu [6]	33
obr. 3.7 – Porovnání metod interpolace M-denních průtoků	36
obr. 3.8 – Tvarový součinitel česlic β [10]	39
obr. 3.9 – Čáry trvání výkonů dvou stejných turbín při manuálním rozdělení průtoků 1:1	42
obr. 3.10 - Čáry trvání výkonů dvou stejných turbín při použití optimalizační funkce..	42
obr. 3.11 – Čáry trvání výkonů dvou turbín – poměr hltností 2:1 – při použ. optim. funkce	43
obr. 4.1 – Orientační zakreslení zaměřených úrovní hladin do fotografie odst. stavu ...	46
obr. 4.2 – Zakreslení zaměřených úrovní hladin do skici koncového profilu savky	46
obr. 4.3 – Praktické schéma výpočetního modelu [18].....	47
obr. 4.4 – Kalibrovaný průběh hladin v podjezí řeky Berounky	51
obr. 4.5 – Kalibrovaný průběh hladin v odpadním kanálu	52
obr. 4.6 – Průměrné měsíční průtoky $Q_{m,2018}$ v porovnání s Q_{Md}	53
obr. 4.7 – Redukovaná řada Q_{Md}	54
obr. 4.8 – Čáry trvání průtoků vodní elektrárnou a Q_{Md}	56
obr. 4.9 – Průběh hladin v odpadním kanálu metodou po úsecích	56
obr. 4.10 – Kontrolní výpočet průběhu hladin v odpadním kanálu v prostředí HEC-RAS	57
obr. 4.11 – Čáry trvání úrovně horní a dolní vody a čistých spádů turbín	57
obr. 4.12 – Čáry trvání výkonů a součtová čáry výroby.....	58
obr. 5.1 – Rozsahy využitelnosti hlavních typů vodních turbín [3].....	59
obr. 5.2 – Přímoproudá Kaplanova turbína (výrobce Strojírny Brno, a.s.)	60
obr. 5.3 – Savka přímoproudé S turbíny podle návrhu KHT ČVUT Praha [4]	60
obr. 5.4 – Přímoproudá turbína v „S“ uspořádání.....	61
obr. 5.5 – Digitalizovaná hlavní univerzální charakteristika přímoproudé turbíny	61
obr. 5.6 – Hlavní univerzální charakteristika přímoproudé Kaplanovy turbíny	62
obr. 6.1 – Schéma výpočetního modelu var. I [18].....	64
obr. 6.2 – Skica S turbíny $D_{OK} = 1,30$ m ve stávající strojovně	66
obr. 6.3 – Skica přímoproudé turbíny $D_{OK} = 1,30$ m ve stávající strojovně.....	67
obr. 6.4 – Skica přímoproudé turbíny $D_{OK} = 1,43$ m ve stávající strojovně.....	67

obr. 6.5 – Skica přímoproudé turbíny $D_{OK} = 1,55$ m ve stávající strojovně.....	68
obr. 6.6 - Čáry trvání průtoků vodní elektrárnou a Q_{Md}	70
obr. 6.7 – Průběh hladin v odpadním kanálu	71
obr. 6.8 – Pracovní body turbín zakreslené do hlavní univerzální charakteristiky.....	71
obr. 6.9 – Čáry trvání úrovně horní a dolní vody a čistých spádů turbín	72
obr. 6.10 – Čáry trvání účinností turbín.....	72
obr. 6.11 – Čáry trvání výkonů a součtová čáry výroby na prahu VE.....	73
obr. 6.12 – Horizontální česle instalované na lokalitě MVE Vilémov	76
obr. 6.13 – Schéma výpočetního modelu.....	77
obr. 6.14 – Skica 2x „S“ turbína $D_{OK} = 2,20$ m, odklon savky 45°	78
obr. 6.15 – Skica 2x „S“ turbína $D_{OK,1} = 2,54$ m, $D_{OK,2} = 1,76$ m, odklon savky 45°	79
obr. 6.16 – Skica 2x „S“ turbína $D_{OK} = 2,20$ m, odklon savky 45°	79
obr. 6.17 – Čáry trvání průtoků vodní elektrárnou a Q_{Md}	82
obr. 6.18 – Pracovní body turbín zakreslené do hlavní univerzální charakteristiky.....	83
obr. 6.19 – Čáry trvání účinností turbín.....	83
obr. 6.20 – Čáry trvání úrovně horní a dolní vody a čistých spádů turbín	84
obr. 6.21 – Čáry trvání výkonů a součtová čáry výroby na prahu VE.....	84

Seznam tabulek

tab. 1.1 – M-denní průtoky v profilu jezu dle ČHMÚ	9
tab. 4.1 – Úrovně hladin pod savkou	52
tab. 4.2 – Srovnání skutečné a vypočtené výroby v roce 2018.....	55
tab. 4.3 – Vybrané výsledky výpočtu výroby MVE za stávajícího stavu.....	58
tab. 6.1 – Vybrané výsledky předběžných výpočtů	65
tab. 6.2 – Vybrané výsledky výpočtu výroby MVE v průměrném roce – varianta I.....	73
tab. 6.3 – I. Projektové a průzkumné práce	74
tab. 6.4 – II. Provozní soubory.....	74
tab. 6.5 – III. Základní rozpočtové náklady	74
tab. 6.6 – IV. Rezerva, ostatní náklady a náklady na umístění stavby	74
tab. 6.7 – Souhrn nákladů	74
tab. 6.8 – Vybrané výsledky předběžných výpočtů	78
tab. 6.9 – Vybrané výsledky výpočtu výroby MVE v průměrném roce – varianta II	85
tab. 6.10 – I. Projektové a průzkumné práce	85
tab. 6.11 – II. Provozní soubory.....	85
tab. 6.12 – III. Základní rozpočtové náklady	86
tab. 6.13 – IV. Rezerva, ostatní náklady a náklady na umístění stavby	86
tab. 6.14 – Souhrn nákladů	86

Výkresová část

- 6.1 Var. I – Situační výkres
- 6.2 Var. I – Podélný řez strojovnou
- 6.3 Var. II – Situační výkres
- 6.4 Var. II – Podélný řez A-A