



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra hydrotechniky**

**Energetické využití sanačního průtoku
Energy use of the sanitary flow**

Ing. Michael Mildner

ANOTACE

Tato práce přibližuje problematiku navrhování nízkospádových elektráren a optimalizaci návrhu pomocí matematických modelů proudění. Na konkrétním příkladu lokality Vranov nad Dyjí se využívá matematický model k optimalizaci návrhu drobných stavebních úprav pro využití stávajících konstrukcí pro energetické účely. Práce se dále zabývá návrhem soustrojí pro tuto lokalitu a odhadem energetického potenciálu navrženého řešení.

ANNOTATION

This thesis focuses on design optimization of low head power plants using computational fluid dynamics. Micro hydro power plant “Vranov nad Dyjí” was used for this study. Optimization was made with respect of minimized changes in civil structures due to very limited investment costs. The thesis also deals with the design of water turbine unit for this site and energetic potential of the proposed solution is estimated.

KLÍČOVÁ SLOVA

MVE, nízkospádové elektrárny, CFD, matematické modelování, sanační průtok

KEY WORDS

low head power plants, CFD, sanitary flow, computational fluid dynamics



1. Úvod

Cílem práce je navrhnout lepší využití sanačního průtoku na obtoku jezu náhonu v obci Vranov nad Dyjí, přiblížit jeho současný stav a navrhnout možnou koncepci jeho využití pro umístění malé vodní elektrárny. Důraz je kladen na co nejmenší zásahy do stávajících objektů a s tím spojenou minimalizaci nákladů na realizaci.

Práce se zabývá možnostmi úprav stávajícího obtoku umístěného na levém břehu pevného jezu ve Vranově nad Dyjí a jeho možným využitím pro vybudování nízkospádové MVE. Obtok byl zřízen pro zajištění sanitárního průtoku $1\text{--}2\text{ m}^3/\text{s}$. Vlevo vedle této propusti je voda vedena krátkým derivačním kanálem ke stávající MVE Vranov 3, z které je odváděna bývalým mlýnským náhonem. Náhon ústí cca 300 m níže po toku zpět do koryta řeky.

Soustrojí uvažované MVE je možné umístit přímo do potrubí obtoku, nebo do odpadní šachty. V obou případech bude nutné vtokový a výtokový objekt patřičně neinvazivně upravit vyvložkováním plechem, zkosením a odstraněním některých betonových hran objektů, popř. dotvarováním pomocí vodostavebního betonu. Při návrhu těchto úprav bude nutné dbát na vhodné hydraulické podmínky, zvláště ve vtokovém objektu a dle zvolené varianty případně i v objektu vyústění pod jezem. Dalšími neméně důležitými požadavky na navržené řešení bude jeho proveditelnost a možnost realizace v omezených prostorech stávajících objektů.

2. Matematický model

2.1. 3D model současného stavu

Na základě poskytnutých podkladů a podkladů z místního šetření byl vytvořen v programu Autodesk AutoCAD 2010 3D model současného stavu objektů a přilehlých částí koryta. Celý model byl pro potřeby matematické analýzy vytvořen v měřítku 1:1. Podrobnost modelu byla zvolena s ohledem na jeho další využití pro výpočty.

2.2. Tvorba výpočetní sítě

K tvorbě výpočetní sítě byla použita komponenta ICEM CFD, která je velice přehledným a funkčním nástrojem pro tento účel. ICEM CFD umožňuje mnoho pro jiné aplikace nestandardních operací, které významně usnadňují celý proces tvorby.

Vzhledem k dostupným výpočetním kapacitám je žádoucí, aby výsledná síť nepřesahovala velikost 2 000 000 elementů. Z tohoto důvodu je nutné vytvořit síť, která bude mít v různých částech různou hustotu elementů. Jemnější síť bude volena v samotném obtokovém objektu a jeho bezprostřední blízkosti. Hrubší naopak v korytě nad a pod objektem, kde se budou vyskytovat minimální rychlosti vzhledem k předpokládaným průtokům.

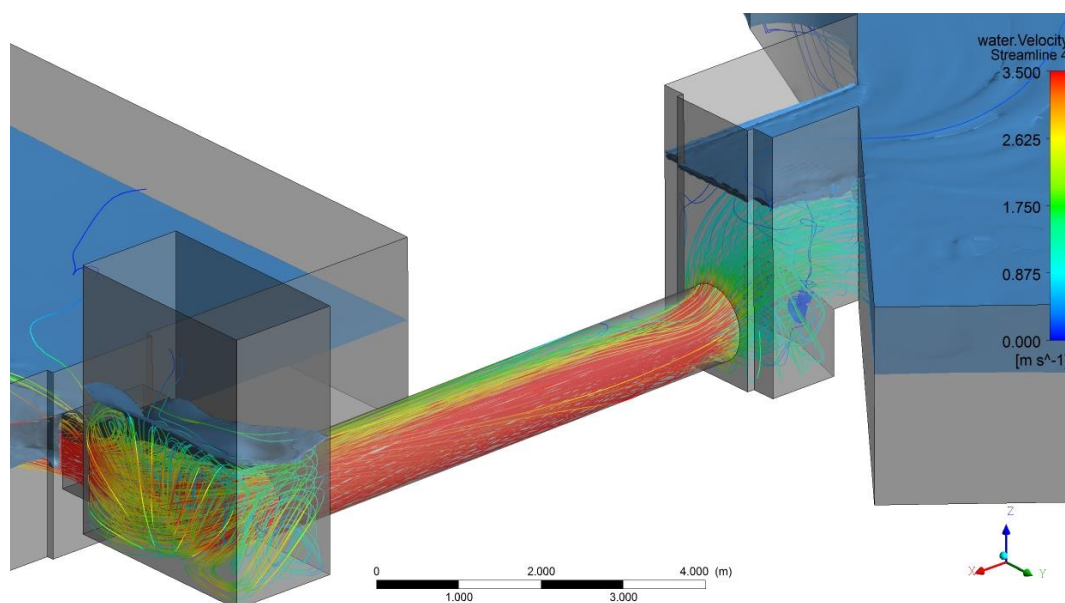
2.3. Nastavení výpočtu

Po vygenerování sítě je potřeba importovat vytvořenou výpočetní síť z ICEM CFD do komponenty ANSYS CFX. Následně je nezbytné nastavit všechny pro výpočet potřebné parametry. Mezi tyto parametry patří materiálové vlastnosti, okrajové podmínky, inicializační podmínky a je nezbytné nastavit parametry pro dvoufázové proudění.



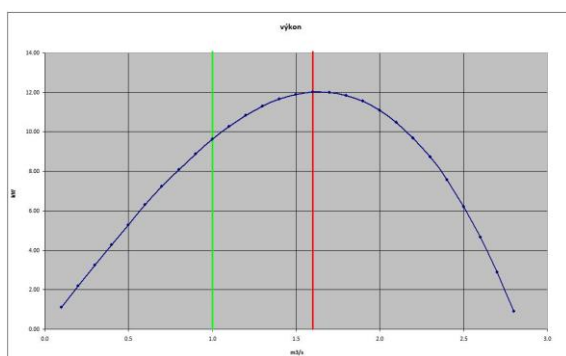
2.4. Výsledky výpočtu

Jako konvergenční kritérium pro výpočet bylo stanoveno ustálení průtoků na vstupu a výstupu z modelu na stejné hodnotě, nelišící se o více než jednotky procent. Celý výpočet proběhl bez problémů a zdárně se ustaloval.

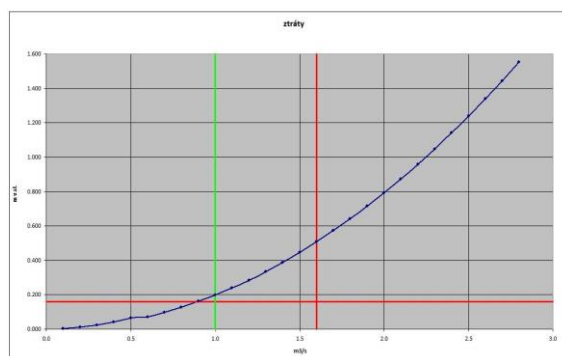


Obrázek 1 - Výsledky výpočtu obtokové objektu současný stav

Dalším důležitým údajem, který bylo potřeba zjistit, je kapacita celého obtoku. Kapacita objektu byla za pomoci matematického modelu stanovena na cca $2.8\text{m}^3/\text{s}$. Tento údaj byl ověřen jednoduchým výpočtem pomocí Bernoulliho rovnice, a potvrdilo se, že tato hodnota je reálná. Dále byl výpočtem MS Excel proveden odhad chování této konstrukce pro různé průtoky s tím, že výpočty byly optimalizovány dle výsledků dosažených v matematickém modelu.



Graf 1 - Průběh výkonu



Graf 2 - Průběh hydraulických ztrát

Z těchto grafů byl jako nejvhodnější návrhový průtok pro MVE stanoven průtok $1\text{m}^3/\text{s}$. Tato hodnota jednak zaručuje poměrně pěkný předpokládaný výkon cca 10kW , při této hodnotě průtoku jsou ještě poměrně nízké hydraulické ztráty a v neposlední řadě tento průtok odpovídá sanačnímu průtoku, který je třeba převádět do podjezí. Tímto bude tedy zajištěno, že navrhovaná MVE bude po celou dobu provozována na nominální výkon.

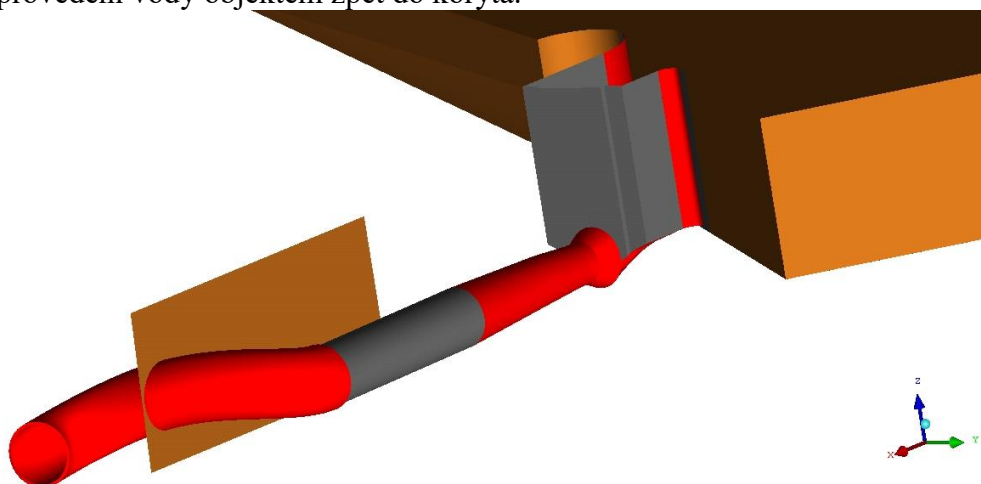


2.5. Návrh úprav geometrie

Z výsledků matematického modelu současného stavu je zřejmé, že proudění v objektech obtoku není ideální. Pro potřeby energetického využití těchto objektů je nezbytné jejich tvar optimalizovat a zajistit bezproblémové převádění návrhového průtoku. Velmi podstatné je také navrhnout umístění soustrojí.

2.5.1. Varianta 1

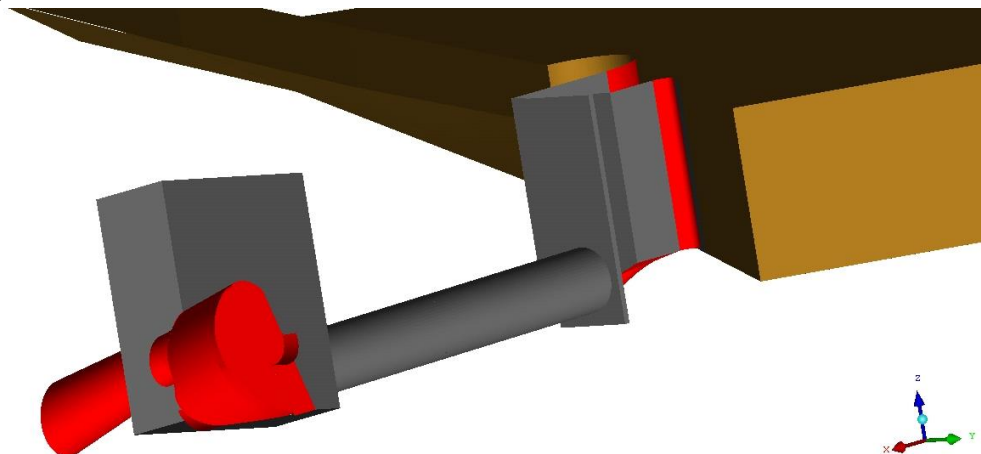
Jednou z možností je umístit soustrojí do vtokového objektu. Varianta 1 bude tedy koncipována tak, že budou provedeny úpravy vtokového objektu, aby se zde dalo umístit soustrojí. Úpravy výtokového objektu se pak budou omezovat pouze na co nejméně ztrátové provedení vody objektem zpět do koryta.



Obrázek 2 - Úpravy objektů varianta 1

2.5.2. Varianta 2

Druhou z možností je umístit soustrojí do výtokového objektu. Varianta 2 bude tedy koncipována tak, že budou provedeny nezbytné úpravy vtokového objektu, aby zde vznikly pokud možno co nejideálnější hydraulické podmínky. Úpravy výtokového objektu se pak zaměří na návrh co nejvhodnějšího způsobu navedení vody na zde umístěné soustrojí.



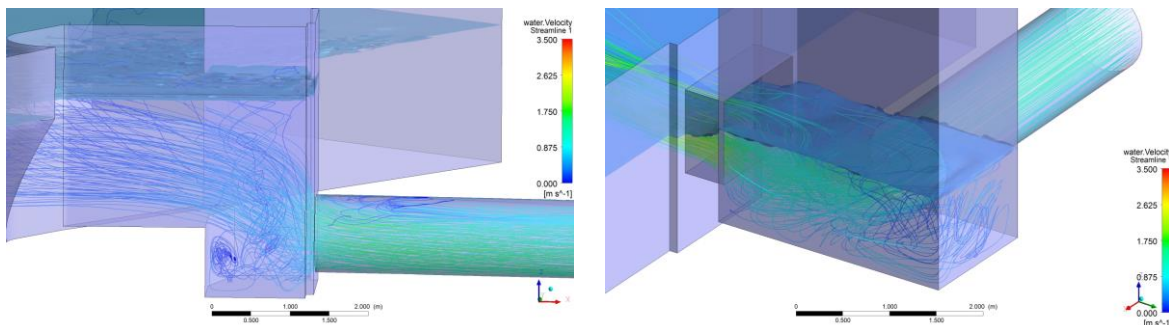
Obrázek 3 - Úpravy objektů varianta 2



2.6. Výsledky výpočtu s úpravami geometrie

2.6.1. Současný stav

Model současného stavu byl znovu analyzován pomocí matematického modelu, tentokrát při návrhovém průtoku $1\text{ m}^3/\text{s}$. Tato analýza byla provedena pro lepší srovnatelnost výsledků s výsledky proudění v návrhových variantách s úpravami.

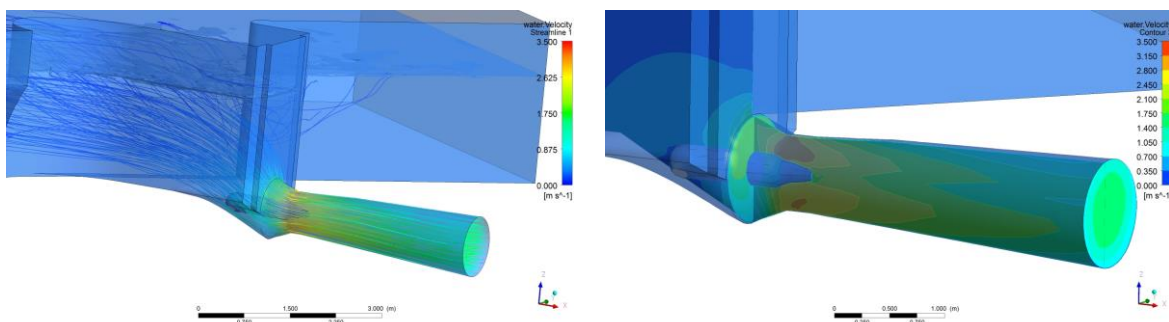


Obrázek 4 - Výsledky výpočtu vtokového objektu současný stav, $Q=1\text{ m}^3/\text{s}$

Obrázek 5 - Výsledky výpočtu výtokového objektu současný stav, $Q=1\text{ m}^3/\text{s}$, zadní pohled

2.6.2. Varianta 1

V zásadě lze říci, že po hydraulické stránce se tato varianta jeví velmi příznivě. Z hlediska provedení však není příliš reálná. Problémem je umístění všech potřebných technologií do stísněných prostor vtokového objektu. Další nevýhoda je i nutnost odstranění stávajícího uzávěru a jeho náhrada jiným, umístěným ve výtokovém objektu.



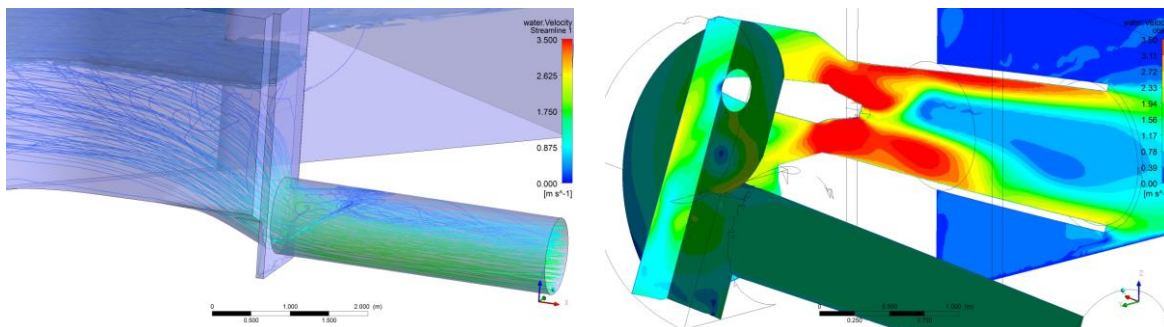
Obrázek 6 - Výsledky výpočtu vtokového objektu varianta 1, $Q=1\text{ m}^3/\text{s}$, pohled ze strany

Obrázek 7 - Výsledky výpočtu vtokového objektu varianta 1, $Q=1\text{ m}^3/\text{s}$, rychlosti

Celkově je tedy možno shrnout, že koncepčně by takto systém mohl fungovat, ale je zde velké množství komplikací, které hovoří jasně proti této variantě.

2.6.3. Varianta 2a

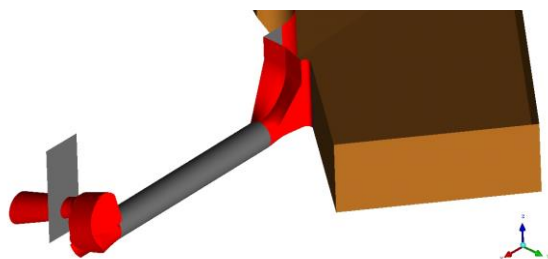
Navržené řešení spirály ve výtokové šachtě potvrzuje reálnost konceptu tohoto řešení. V zásadě lze říci, že po hydraulické stránce se tato varianta jeví dobře, ale jsou zde nezbytné další úpravy geometrie. Z hlediska provedení je tato varianta velmi reálná a bude proto dále optimalizována (viz. Varianta 2b).



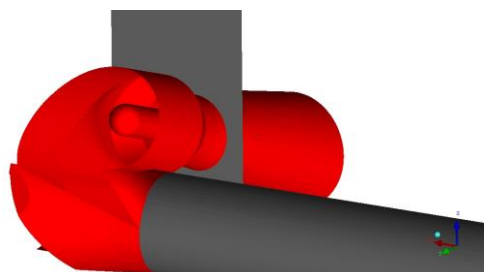
Obrázek 8 - Výsledky výpočtu vtokového objektu variantu 2, $Q=1\text{m}^3/\text{s}$, pohled ze strany
Obrázek 9 - Výsledky výpočtu výtokového objektu variantu 2, $Q=1\text{m}^3/\text{s}$, rychlosti

2.6.4. Varianta 2b

Model úprav objektů pro variantu 2 byl po prozkoumání výsledků simulace proudění upraven v místech nejzávažnějších problémů s prováděním návrhového průtoku.

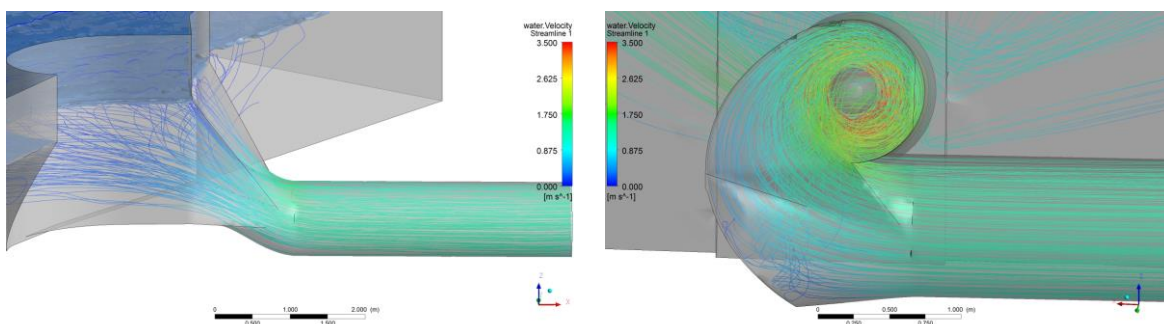


Obrázek 10 - Úpravy objektů variantu 2b



Obrázek 11 - Soustrojí ve výtokovém objektu varianty 2b

Po provedení všech potřebných úkonů a nastavení byl model s úpravami geometrie varianty 2b podroben matematické analýze. Při návrhovém průtoku $1\text{m}^3/\text{s}$ byla sledována vhodnost navržených úprav provedených na geometrii a bylo vyhodnoceno, zda bylo dosaženo požadovaných zlepšení.



Obrázek 12 - Výsledky výpočtu vtokového objektu variantu 2b, $Q=1\text{m}^3/\text{s}$, pohled ze strany
Obrázek 13 - Výsledky výpočtu výtokového objektu variantu 2b, $Q=1\text{m}^3/\text{s}$

Navržené řešení spirály ve výtokové šachtě již nevykazuje problém s tvořením dvou úplavů jako ve variantě 2a.

Jak již bylo dříve zmíněno, z hlediska provedení je tato varianta velmi reálná. Do vtokového objektu bude potřeba umístit hrubé a jemné česle s automatickým shrabovákem, a ke shrabovákům příslušející žlab na shrabky. Úpravy geometrie by se provedly v dnové části dobetonováním a nad horní usměrňovací štít z oceli by se umístil

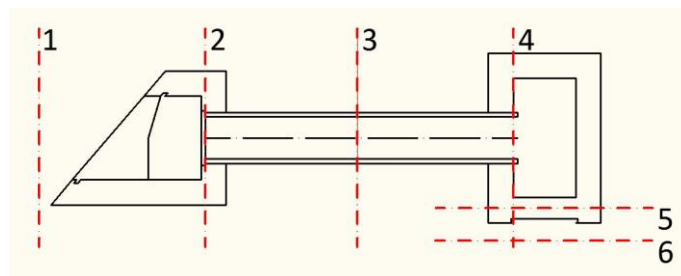


žlab na shrabky. Ve výtokovém objektu by se dolní část spirály a ukotvení samotného soustrojí provedlo betonáží, horní část spirály by se vyrobila z oceli. To by umožnilo velice dobrou přístupnost pro montáž soustrojí a i případná údržba nebo opravy by byly relativně pohodlné. Další výhodou je i dříve zmiňovaná možnost ponechání stávajícího uzávěru a jeho využití jako provozního uzávěru turbíny.

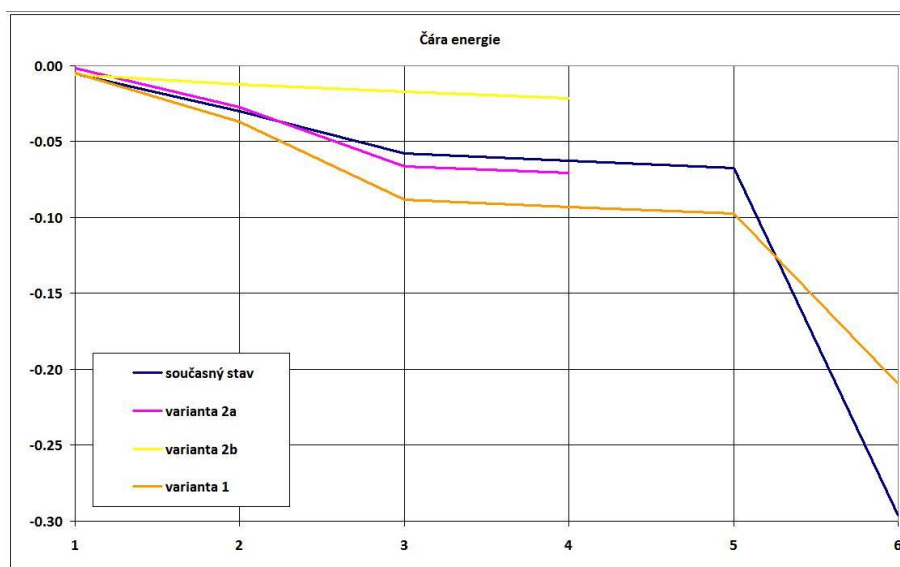
Celkově je tedy možno shrnout, že koncepčně by tento systém velmi dobře fungoval a jeví se velmi slibně i po konstrukční a provozní stránce. Náklady na vybudování a na údržbu tohoto systému by se měly dát udržet ve velmi rozumných mezích.

2.7. Srovnání návrhových variant a současného stavu

Pro lepší možnost srovnání byly z dat, vypočítaných matematickým modelem, vytvořeny čáry energie jednotlivých variant. V geometrii objektů bylo pro tento účel určeno 6 řezů, v kterých byly z programu ANSYS získány potřebné informace.



Obrázek 14 - Schéma umístění řezů konstrukcí pro výpočet čáry energie



Graf 3 - Čáry energie jednotlivých variant

Celkově lze variantu 2b vyhodnotit jako nejideálnější.

3. NÁVRH SOUSTROJÍ PRO MVE

Po zvolení nejvhodnější varianty úprav a umístění soustrojí je zapotřebí navrhnout komponenty pro soustrojí samotné. Bude použito turbíny s ponořeným generátorem. Tento koncept byl vybrán z důvodu co nejsnadnějšího provedení celého zařízení a zároveň řeší



problémy s místem, jelikož umístění klasického generátoru by vyžadovalo suchou strojovnu.

3.1. Návrhové parametry soustrojí

Jak již bylo zmíněno, bude se hledat ponorný generátor s vhodnými otáčkami. Otáčky generátoru budou muset vyhovět požadavkům tak, aby bylo dosaženo ideální velikosti oběžného kola pro zpracování návrhového průtoku $1\text{ m}^3/\text{s}$ při spádu okolo 1,5 m, a zároveň musí splnit podmínky rychloběžnosti stroje. Dalšími důležitými parametry jsou cena zařízení, vhodný výkon, v tomto případě ideálně mezi 10 - 15 kW a také nutnost, aby bylo zařízení možné montovat pod úhlem a nikoliv jen ve vodorovné pozici.

Jelikož bude potřeba zařízení pomaloběžné a ceny generátorů s vyšším počtem pólových párů jsou drahé, bude se pravděpodobně jednat o generátor s převodovkou. Pro tento účel se ukázalo, že by mohlo být vhodné použít ponorné přímoproudé čerpadlo nebo ponorné míchadlo v reverzním režimu.

Po provedení rešerše na trhu běžně dostupných zařízení byl vytvořen seznam zařízení, z kterých byl dále vyhledáván vhodný stroj pro potřebu této elektrárny. [1] [2]

Jako požadavek pro výběr z tohoto seznamu bylo stanoveno, že zařízení by mělo mít výkon mezi 10-15 kW, mělo by mít měrné otáčky okolo 200 min^{-1} a oběžné kolo by mělo mít průměr okolo 0,7 m. Tato kritéria zredukovala počet vhodných zařízení na 4 varianty od výrobců EISELE a ABS.

Tabulka 1 - Vhodné stroje

Míchadlo				Motor			Turbína					
výrobce	označení	otáčky [min^{-1}]	váha [kg]	označení	výkon hřídel [kW]	otáčky [min^{-1}]	otáčky generátor [min^{-1}]	otáčky hřídel [min^{-1}]	měrné otáčky n_q [min^{-1}]	Q= 1 m ³ /s H= 1.50 m		
										průměr kola D_k [m]	jednotkový průtok $Q_{1.1}$ [m^3/s]	jednotkové otáčky $n_{1.1}$ [min^{-1}]
ABS	XRW 900	238	260	PA110/4	11	1428	1572	262	193	0.7	1.67	150
ABS	XRW 900	238	295	PA150/4	15	1428	1572	262	193	0.7	1.67	150
EISELE	GTWS 1540	240	260	x	11	1460	1540	253	187	0.7	1.67	145
EISELE	GTWS 204	240	260	x	15	1460	1540	253	187	0.7	1.67	145

Jelikož u výrobce ABS nebylo možné získat podrobnější informace o produktu, není možné doložit, zda splňuje všechny požadované parametry a k dispozici není ani cenové srovnání s konkurencí.

Výrobce EISELE poskytl všechny potřebné podklady, z kterých bylo zjištěno, že jejich produkt je montovatelný do sklonu 15° , což je dostatečná hodnota pro tuto aplikaci. Jelikož je toto zařízení určeno pro trvalý provoz jako míchadlo kejdy, měla by být jeho odolnost dostatečná. Cena se u obou provedení pohybuje okolo 5500 €. Jelikož mezi oběma zařízeními je minimální cenový rozdíl a váha i rozměry jsou totožné, bylo by vhodné použít silnější variantu GTWS 204. Součásti tohoto zařízení budou dimenzované na větší síly, a tím by se měla prodloužit životnost stroje.



4. VÝPOČET HYDROENERGETICKÉHO POTENCIÁLU A ZHODNOCENÍ INVESTICE

4.1. Výpočet hydroenergetického potenciálu

Tabulka 2 - Hydroenergetický potenciál

H bruto	1.6 m
Q	1 m ³ /s
η turbína	0.83 -
η generátor	0.85 -
výkup dle ERÚ	3.23 Kč/kWh

hydraulické ztráty

hrubé česle	0.005 m
jemné česle	0.030 m
dle Ansys	0.022 m
suma H ztráty	0.056 m
H ztráty rel.	3.5%

H netto	1.544 m
P	10.68 kW
provozní doba	7920 hod/rok
roční výroba	84 609 kWh/rok
roční výnos	273 286 Kč/rok
provozní náklady	23 000 Kč/rok
čistý výnos před zdaněním	250 286 Kč/rok

Vypočítaný roční výnos je spočítán za předpokladu současné výkupní ceny dle energetického regulačního úřadu pro MVE v nových lokalitách. [15] Náklady na provoz MVE byly odhadnuty na 23 000 Kč/rok, jelikož se bude v podstatě jednat o rozšíření stávající MVE Vranov 3 o jedno soustrojí a tudíž nároky na obsluhu nebudou dramaticky navýšeny. Předpokládaný čistý výnos se dá tedy předpokládat okolo 250 000 Kč/rok.

4.2. Zhodnocení investice

V této kapitole bude zhodnocena návratnost investice do navrhované MVE. Za tímto účelem bude stanoven předběžný rozpočet stavby a odhadnuta cena položek potřebných k realizaci tohoto projektu.

Cena realizace celého projektu by se měla pohybovat okolo 2 000 000 Kč bez DPH. Odhadovaný čistý roční výnos byl stanoven na cca 250 000 Kč. Z toho vyplývá, že prostá doba návratnosti je 8 let.

Lepší vypovídající hodnotu však má výpočet reálné doby návratnosti. Při uvažování 4,25 % diskontní míry, vychází reálná doba návratnosti 10 let, což je také ještě hraničně únosná hodnota.

Pro dokreslení představy o finanční rozvaze tohoto projektu byla vypočtena čistá současná hodnota projektu. Při předpokladu životnosti díla 30 let a stejné diskontní míry jako pro výpočet reálné doby návratnosti, se čistá současná hodnota dostává na cca 2 200 000 Kč. Tento výsledek taktéž poukazuje na hraniční výhodnost této investice. Výnos tohoto projektu je srovnatelný s běžným využitím aktiv na peněžních trzích.

Z ekologického hlediska ovšem tento projekt představuje model využití čisté vodní energie v lokalitách, které doposud nebyly nikdy využívány.



5. ZÁVĚR

Pomocí matematického modelu byly nasimulovány podmínky proudění ve stávajících konstrukcích. Byla zjištěna nejproblematictější místa, způsobující nejvýraznější zhoršení proudění v těchto objektech. Také byla zjištěna maximální kapacita obtoku.

Na základě získaných dat byl stanoven návrhový průtok pro plánovanou vodní elektrárnu a byly představeny dvě varianty úprav objektů pro umístění MVE. Tyto návrhové varianty byly také podrobeny matematické analýze.

Výsledná verze úpravy (varianta 2b), vykazovala velmi dobré proudové podmínky. Její technická proveditelnost je také velmi realistická. Při porovnání výsledků z matematického modelu také vykazovala nejnižší úroveň hydraulických ztrát. Z hlubší analýzy výsledků také vyplynulo, že některé úpravy geometrie nepřinášejí výraznější zlepšení, a ve výsledném návrhu od nich bylo kvůli minimalizaci nákladů na realizaci upuštěno.

Dalším krokem bylo najít vhodné soustrojí pro navrhovanou MVE. Za tímto účelem byl vytvořen seznam běžně dostupných zařízení, která by mohla vyhovovat všem požadavkům. Jako nejvhodnější zařízení se ukázalo ponorné míchadlo kejdy od výrobce EISELE, které by bylo pro MVE využito v reverzním režimu jako generátor s převodovkou.

Následoval návrh umístění všech potřebných technologií pro bezproblémový provoz MVE do stísněných prostor stávajících objektů. Byl představen návrh uspořádání všech potřebných prvků do hydraulicky optimalizovaných stávajících objektů.

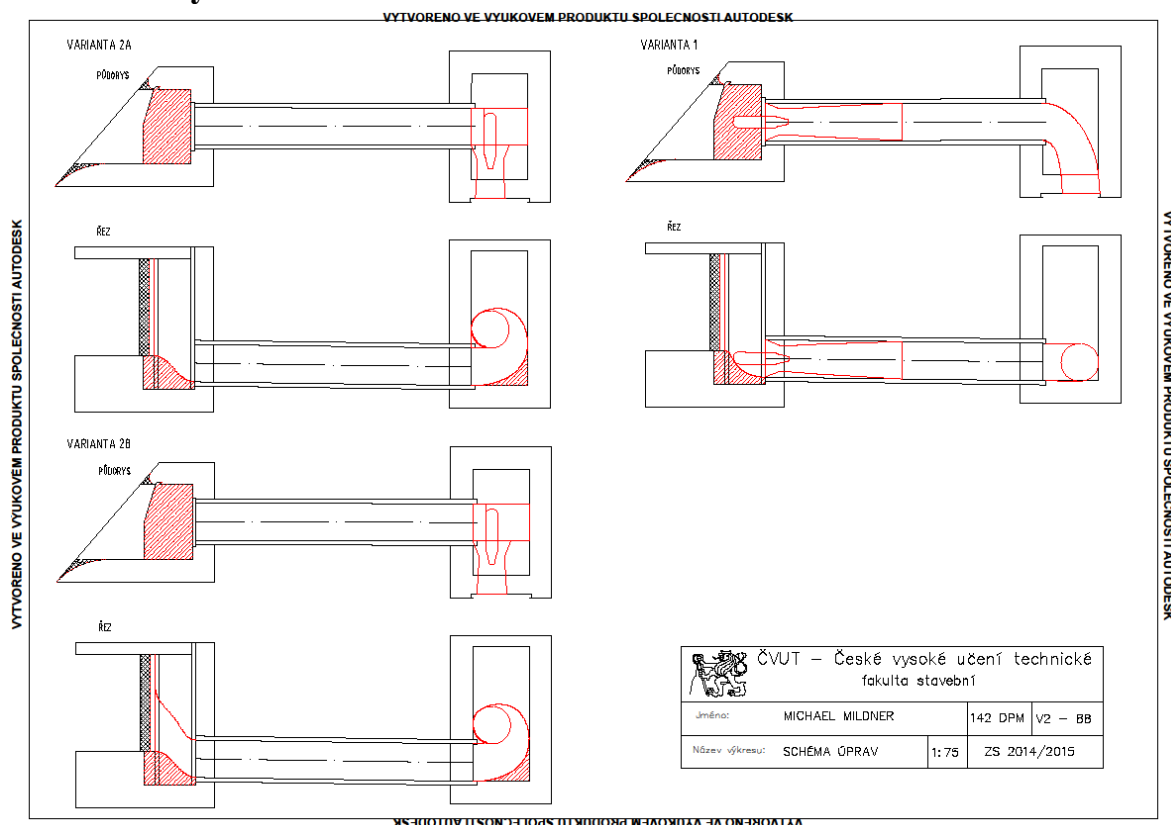
Jako další krok byl stanoven předběžný odhad nákladů na realizaci celého záměru. Celková částka na realizaci tohoto projektu se vyšplhala na 2 002 930 Kč bez DPH. Z toho vyplývá prostá doba návratnosti pro tento projekt 8 let. Jedná se tedy o velmi krajně přijatelnou investici. Dalším faktorem hovořícím proti tomuto projektu je fakt, že náklady na jeho realizaci se mohou oproti teoretickému odhadu ještě výrazně navýšit, jelikož při jeho realizaci se může objevit mnoho dalších problémů, jejichž řešení by si vyžádalo další investice.

V případě využití sanačního průtoku ve Vranově nad Dyjí se díky matematickému modelování prokázalo, že tento záměr je minimálně po hydrotechnické stránce realizovatelný. Byl představen fungující koncept MVE umístěný ve zdánlivě bezvýhodně stísněném prostoru stávajících objektů, který jen minimálně zasahuje do konstrukce těchto stávajících objektů. Je zde zajištěna i velmi dobrá přístupnost všech prvků pro údržbu a servis a celé dílo je skryto pod úrovní terénu, takže nebude nikterak narušovat současný vzhled místa.

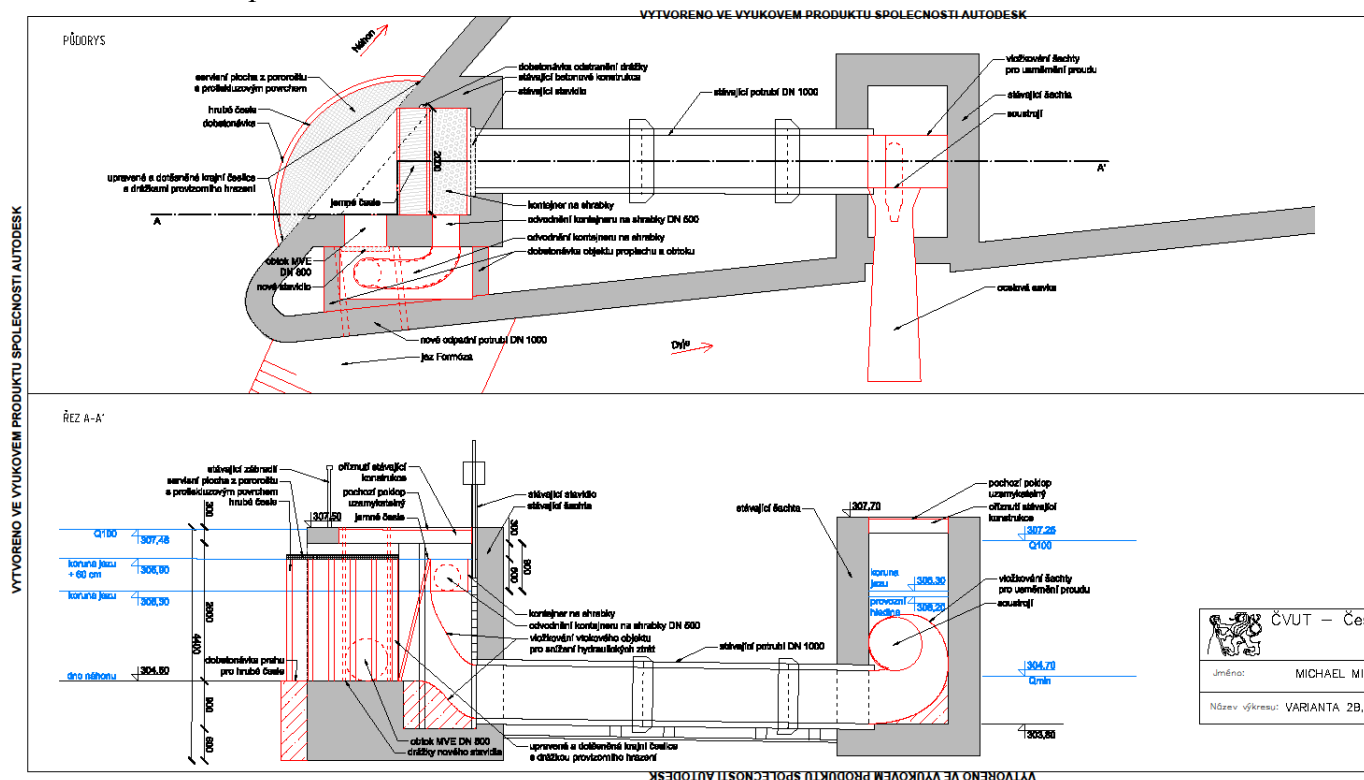
Závěrem lze říci, že na projektu této MVE se ukázalo, že 3D matematická analýza představuje velice mocný nástroj pro navrhování a optimalizaci vodních konstrukcí. Díky výstupům z matematického modelu lze efektivně navrhovat úpravy konstrukcí pro jejich ideální hydraulické působení i v místech, kde by se jinak jen velmi těžko dala odhadovat jejich reálná vhodnost. Je to také vhodná metoda jak ověřit, zda má vůbec význam se daným problémem dále zabývat a rozvíjet ho, nebo se daného konceptu raději vzdát.



6. Přílohy



Příloha 1, Schéma úprav



Příloha 2, Varianta 2b



7. SEZNAM ZDROJŮ

- [1] J. Melichar, J. Vojtek, J. Bláha: Malé vodní turbíny, konstrukce a provoz, Vydavatelství ČVUT, Praha, 1998
- [2] M. Nechleba, J. Hušek: Hydraulické stroje, SNTL, Praha, 1966
- [3] J. Melichar: Hydraulické a pneumatické stroje, část vodní turbíny, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2013
- [4] P. Gabriel, F. Čihák, P. Kalandra: Malé vodní elektrárny, Vydavatelství ČVUT, Praha, 1998
- [5] J. Drozda, H. Hasníková, V. Jirsák, E. Mašová: Příručka ANSYS Workbench, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2012
- [6] www.cuzk.cz
- [7] V. Matoušek, Přednášky - Hydraulika 3 - pro magisterské studium 141HY3V, ČVUT
- [8] A. Havlík, Přednášky - Hydraulika 2 - pro bakalářské studium 141HY2V, ČVUT
- [9] E. Škařupová, Modelování plnění plavební komory České Vrbné, Praha, 2012, Diplomová práce, ČVUT
- [10] mve.energetika.cz
- [11] ANSYS, Inc. ANSYS CFX Tutorials, Release 13.0. U.S.A., 2010
- [12] ANSYS, Inc. ANSYS CFX - Solver Modeling Guide, Release 13.0. U.S.A., 2010
- [13] M. Kozubková, Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX, Ostrava VŠB - TU, 2008
- [14] www.mapy.cz
- [15] www.eru.cz
- [16] M. Mildner, Možnosti obnovy a využití mlýnského náhonu ve Velké nad Veličkou, Praha, 2013, Bakalářská práce, ČVUT