VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

VLIV VZÁJEMNÉHO PROVOZU VTOKŮ NA JEJICH ENERGETICKOU ÚČINNOST A TVORBU HLADINOVÝCH VÍRŮ

EFFECT OF THE INLETS INTEROPERABILITY TO THEIR ENERGY EFFICIENCY AND THE SURFACE VORTICES FORMATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. Petr Chvátal
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — prof. Ing. JAN ŠULC, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Petr Chvátal
Název	Vliv vzájemného provozu vtoků na jejich energetickou účinnost a tvorbu hladinových vírů
Vedoucí práce	prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Datum zadání	31. 3. 2017
Datum odevzdání	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

prof. Ing. Jan Šulc, CSc. Vedoucí ústavu	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

SKALIČKA, J.: Výzkum proudění s vtokovými víry na zmenšených fyzikálních modelech. Vodní hospodářství A 33, 1983, č. 1, str. 5 ÷ 11

GORDON, J.: Vortices at intakes. Water Power, 22, 1970, No. 4, str. 137 ÷ 138

GULLIVER, J. S. – RINDELS, A. J. – LINDBLOM, K. C.: Designing intakes to avoid free – surface vortices. Water Power and Dam Construction, September 1986, str. 24 ÷28

ŠULC, J.: Poznatky z modelového výzkumu vtokových vírů u vtoků vodních elektráren. Vodní hospodářství, 40, 1990, č. 3, str. 102 ÷107

ŠULC, J.: Experimentální výzkum kritické hloubky ponoru vtoku, Sborník referátů X. vědecké konference FAST – VUT v Brně, sekce 16, 1989, str. 39 ÷ 44

ČÁBELKA, J.; GABRIEL, P.: Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice - výzkum na hydraulických modelech a ve skutečnosti. Academia Praha, 1987

BOOR, B.; KUNŠTÁTSKÝ, J.; PATOČKA, C.: Hydraulika pro vodohospodářské stavby. SNTL Praha, 1968

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Provést rešerši dostupných používaných postupů pro určení bezpečné a kritické hloubky ponoru vtoku proti tvorbě hladinových vtokových vírů. Na vybraném hydraulickém modelu objektu s více provozujícími vtoky posoudit vliv vzájemného provozu na jejich energetickou účinnost a tvorbu hladinových vírů vyšších intenzit. Výsledky porovnat s dosud používanými postupy.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Předložená diplomová práce obsahuje několik dílčích částí. Jedná se zejména o rešerši v oblastech jednosměrných vtoků: energetické účinnosti vtoků a jejich ovlivnění provozem sousedních vtoků, dále o stádia tvorby hladinových vírů, ovlivňování vírových struktur vzájemným provozem sousedních vtoků a také vědeckých postupů používaných při určování kritické a bezpečné hloubky ponoru vtoku proti tvorbě hladinových vírů.

Součástí je popis průběhu i zhodnocení laboratorních zkoušek, které jsou zaměřeny na posouzení vlivu vzájemného provozu vtoků na jejich energetickou účinnost a tvorbu hladinových vírů vyšších intenzit.

Důležitou částí práce je i porovnání dosažených výsledků s výsledky autorů, kteří se touto problematikou zabývali.

KLÍČOVÁ SLOVA

Bezpečná hloubka ponoru vtoku, kritická hloubka ponoru vtoku, vtokový objekt, vtokový vír, modelový výzkum, energetická účinnost.

ABSTRACT

This diploma thesis contains several individual parts. It's especially about summary in the area of one-way inlets: the energy efficiency of the inlets and influence of the neighbouring inlets on them, the phases of creation of surface vortices, the influence on the vortex structures by the mutual operation of the neighbouring inlets and also the methods used to determine the critical and safe depth of dive of inlet against the creation of surface vortices.

It also includes the description of process and the evaluation of laboratory tests, which are focused on the assessment of the effect of the mutual operation of inlets on their energy efficiency and the creation of higher intensity surface vortices.

Important part of this diploma thesis is also a comparison of the achieved results with the results of the authors who have dealt with this issue.

KEYWORDS

Safe depth of dive of inlet, critical depth of dive of inlet, inlet object, inlet vortex, model research, energy efficiency.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Petr Chvátal *Vliv vzájemného provozu vtoků na jejich energetickou účinnost a tvorbu hladinových vírů.* Brno, 2018. 87 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Šulc, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 9. 1. 2018

Bc. Petr Chvátal
autor práce

Poděkování

Rád bych poděkoval panu prof. Ing. Janu Šulcovi, CSc. za trpělivost, ochotu, rady a cenné připomínky, které mi dovolily vytvořit tuto diplomovou práci. Dále bych chtěl poděkovat pracovníkům Laboratoře vodohospodářského výzkumu. Za pomoc v době studia také děkuji rodičům a všem, kteří mi byli oporou.

OBSAH

1 Úvod ... 3

2 Problematika vtoků – současný stav poznání ... 5

2.1 Vtokové objekty – základní členění ... 5

2.2 Výpočet ztrát ve vtokových objektech ... 8

2.3 Výpočet ztrát při současném provozu více sousedních vtoků ... 12

2.4 Hladinové víry a stádia tvorby hladinových vírů ... 12

2.5 Stávající způsoby výpočtu kritické hloubky ponoru ... 18

2.5.1 Výpočet kritické hloubky dle Reddyho a Pickforda ... 19

2.5.2 Výpočet kritické hloubky dle Wittmanna ... 19

2.5.3 Výpočet kritické hloubky dle Quicka ... 20

2.5.4 Výpočet kritické hloubky dle Rohana ... 20

2.5.5 Výpočet kritické hloubky dle Knausse ... 21

2.5.6 Výpočet kritické hloubky dle Jaina ... 22

2.5.7 Výpočet kritické hloubky dle Šulce ... 22

2.6 Stávající způsob výpočtu bezpečné hloubky ponoru ... 23

2.7 Ovlivnění vírových struktur vzájemným provozem sousedních vtoků ... 24

2.8 Účel provedení modelových zkoušek v rámci diplomové práce ... 25

3 Modelová podobnost ... 26

3.1 Geometrická podobnost ... 26

3.2 Kinematická podobnost ... 27

3.3 Dynamická podobnost ... 27

3.4 Zajištění modelové podobnosti ... 30

4 Popis modelu, měrné tratě a měřicího zařízení ... 31

4.1 Model – popis zkušebního objektu ... 31

4.2 Popis měrné tratě a měřicího vybavení ... 36

5 Měření na trati 41

5.1 Účel zkoušek 41

5.2 Postup prací 41

5.3 Měření za účelem zjištění ovlivnění energetické účinnosti vtoků v důsledku jejich vzájemného provozu 42

5.4 Měření za účelem zjištění tvorby hladinových vírů a jejich ovlivnění vzájemným provozem vtoků 45

6 Zpracování výsledků a jejich rozbor 49

6.1 Energetická účinnost 49

6.2 Tvorba hladinových vírů 58

7 Porovnání výsledků s jinými autory 60

7.1 Porovnání výsledků energetické účinnosti 60

7.2 Porovnání výsledků tvorby hladinových vírů 64

7.2.1 Porovnání při funkci jednoho vtoku 64

7.2.2 Porovnání ovlivnění provozem dvou sousedních vtoků 70

8 Doporučení 72

9 Závěr 73

10 Použitá literatura 74

11 Seznam tabulek 76

12 Seznam obrázků 78

13 Seznam grafů 81

14 Seznam použitých zkratek a symbolů 82

15 Summary 87

1 ÚVOD

Vtokové objekty jsou součástí většiny hydrotechnických staveb a především kvůli jejich důležitosti musí splňovat celou škálu požadavků. Jedná se o nároky na bezpečnost, údržbu či odolnost vůči vnějšímu prostředí. K nejvýznamnějším požadavkům na tyto součásti vodních děl patří potřeba co nejmenší hydraulické ztráty, tedy nejvyšší možné účinnosti těchto vtoků, a také zajištění bezpečné hloubky ponoru vtoku proti vzniku vtokových vírů vyšších intenzit. Hloubka ponoru je významným prvkem při výstavbě vodních elektráren při snaze o dosažení co nejmenších rozměrů vtokového objektu a současného zachování efektivnosti provozu. Vznik hladinových vírů vyšších intenzit silně ovlivňuje provozní polohu hladiny z hlediska vtahování vzduchu, ledu a pláví do přivaděče či výpusti VD.

Na vodních dílech je často využíváno více vtokových objektů. Hydraulické ztráty jsou dány nejen navrženým tvarem vtokových objektů, ale i v závislosti na jejich počtu a uspořádání dochází ke změnám jejich energetické účinnosti. Touto problematikou se již zabývalo více publikací, jmenujme například zprávu [1]. Cíl této diplomové práce, a to porovnání účinností při různém uspořádání až 4 vtoků, však není doposud dostatečně spolehlivě prozkoumán. Diplomová práce předkládá souhrn dosavadních informací o této problematice. Těžištěm výzkumných prací je provedení modelových zkoušek proudových poměrů v předpolí vtoku a spodních výpustí s následným zpracováním těchto experimentálních dat ve formě aplikovatelných výsledků a kvantifikace vlivů současného provozu několika sousedních vtoků na jejich energetickou bilanci. Další částí je ověření vlivu polohy hladiny a kombinace provozu sousedních vtoků objektu na tvorbu hladinových vírů.

Diplomová práce je členěna do devíti kapitol. Po úvodní kapitole následuje shrnutí současného stavu poznání v této problematice z pohledu vtokových objektů, výpočtu ztrát ve vtokových objektech, výpočtu ztrát při současném provozu více vtoků a vtokových vírů z hlediska výpočtu kritické hloubky ponoru vtoku a bezpečné hloubky ponoru vtoku. Na tuto pak navazuje část třetí, jenž je věnována modelové podobnosti – geometrické, kinematické a dynamické podobnosti a podmínkám

zaručujícím jejich splnění. Čtvrtá kapitola je věnována popisu modelu, měrné tratě a vybavení užitého k měření. Práce pokračuje pátou kapitolou popisující postup měření na trati, postupem prací a měřeními za účelem zjištění ovlivnění účinností a ovlivnění tvorby vtokových vírů vzájemným provozem vtoků. V šesté kapitole jsou výsledky zpracovány, a to z obou hledisek – účinnosti i tvorby vírů. V sedmé části je pak provedeno srovnání s ostatními autory zabývajícími se touto problematikou. Osmá kapitola je věnována doporučením vyplývajícím z těchto výsledků. Nakonec je vše shrnuto v závěru diplomové práce.

2 PROBLEMATIKA VTOKŮ – SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

2.1 VTOKOVÉ OBJEKTY – ZÁKLADNÍ ČLENĚNÍ

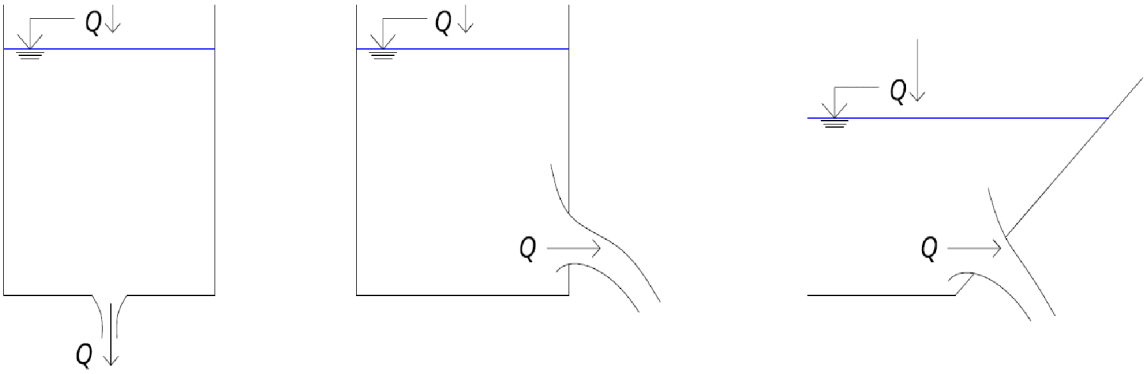
Vtokové objekty vodních děl můžeme rozdělit dle několika kritérií. Ze základních zmiňme například:

a) Rozdělení z hlediska směru proudění na jednosměrné (obr. 2.1) a obousměrné objekty (obr. 2.2). Jednosměrné vtokové objekty jsou klasickým případem vyskytujícím se na většině hydroenergetických děl. Na obousměrné vtoky jsou pak kladeny zvláštní požadavky s ohledem na dva režimy provozu a zachování účinnosti a bezpečnosti provozu při obou stavech. S obousměrnými vtoky se můžeme setkat například na přečerpávacích vodních elektrárnách.

Obr. 2.1 Fotografie vtokového objektu MVE Štětí [10]

Obr. 2.2 Fotografie vtokového objektu VE Dlouhé Stráně [11]

b) Z pohledu umístění lze vtoky členit na vertikální, horizontální, popř. v šikmé stěně. Všechny varianty jsou zobrazeny na obrázku 2.3. Umístění má vliv na postup výpočtu.

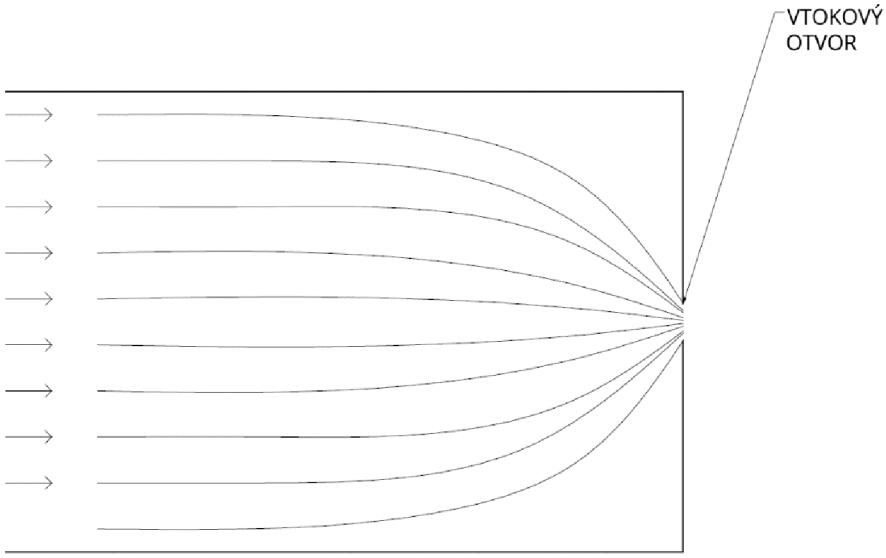


Obr. 2.3 Schéma různých umístění vtoku (řezy)

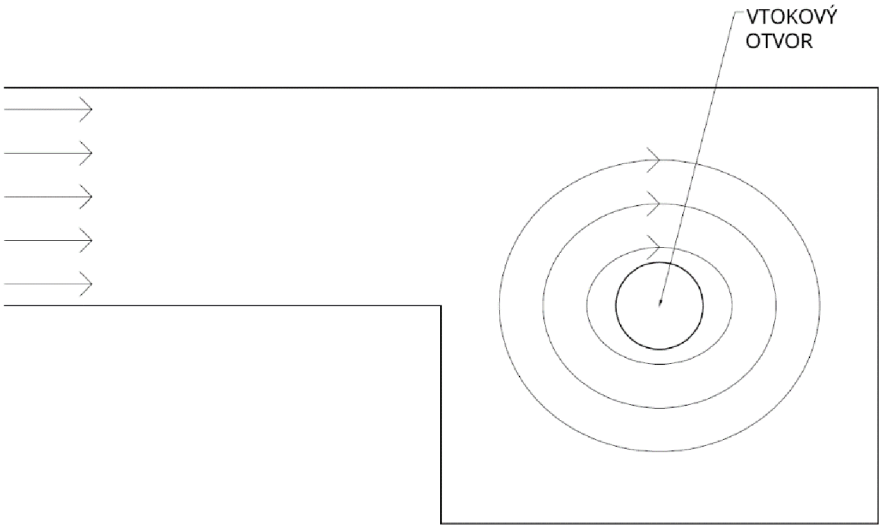
c) S ohledem na směr přítoku je lze dále rozdělit na vtoky s bočním nebo s čelním přítokem. Oba případy jsou uvedeny na obrázku 2.4.

Obr. 2.4 Schéma bočního (vlevo) a čelního (vpravo) nátoku (řezy)

d) Další možností dělení je také na vtoky s přítokem symetrickým (obr. 2.5) nebo nesymetrickým (obr. 2.6).



Obr. 2.5 Příklad symetrického přítoku (půdorys)



Obr. 2.6 Příklad nesymetrického přítoku (půdorys)

Tato diplomová práce je věnována zejména jednosměrným horizontálním vtokům s čelním přítokem.

2.2 VÝPOČET ZTRÁT VE VTOKOVÝCH OBJEKTECH

Ztráta či hydraulická ztráta je v celém textu zkráceným pojmem pro ztrátu mechanické energie. Hydraulické ztráty na vtocích jsou zvláštními případy místních hydraulických ztrát. Celkové hydraulické ztráty ve vtokových objektech jsou výsledkem vzájemného působení série singularit. Při výpočtu se uvažuje s principem superpozice, kdy se sčítají ztráty způsobené hranami vtokového objektu, česlemi, dělicími pilíři, drážkami uzávěrů, změnami směru proudění a dalších složek.

Vtokové objekty zajišťují přeměnu potenciální energie na energii kinetickou, která je reprezentována rychlostí v navazujícím potrubí. Tento problém je většinou myšlen jako jednorozměrný a při uvažování ustáleného proudění nestlačitelné vazké kapaliny je Bernoulliho rovnice zapisována dle vztahu (2.1):

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + h_z \,, \tag{2.1}$$

kde h_1 ... geodetická výška ve vstupním profilu [m],

p_1 ... tlak na hladinu ve vstupním profilu [Pa],

α_1 ... hodnota Coriolisova kritéria ve vstupním profilu [-],

v_1 ... rychlost ve vstupním profilu [m·s^{-1}],

g ... tíhové zrychlení [m·s^{-2}],

h_2 ... geodetická výška ve výstupním profilu [m],

p_2 ... tlak na hladinu ve výstupním profilu [Pa],

α_2 ... hodnota Coriolisova kritéria ve výstupním profilu [-],

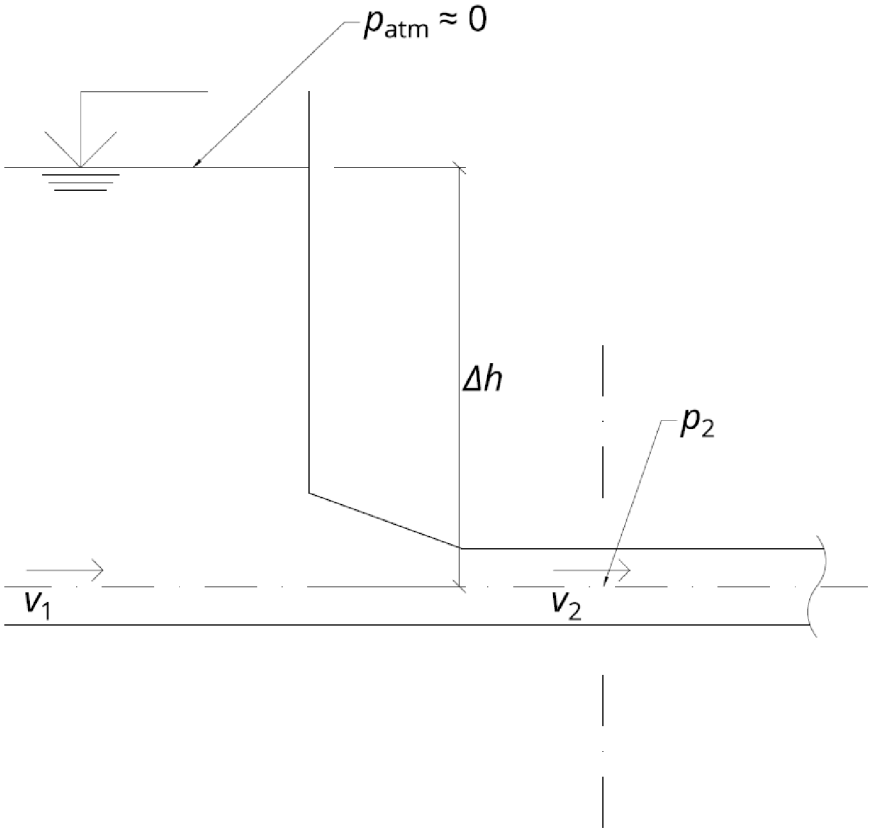
v_2 ... rychlost ve výstupním profilu [m·s^{-1}],

h_z ... ztrátová výška [m].

Výstupní profil je volen dle obrázku 2.7, kde je zobrazen zjednodušený případ vtokového objektu do tlakového přivaděče. Uvažujeme zde protiproudně od vtoku s nulovou rychlostí v_1 = 0 m·s^{-1}, dále tlak $p_1 = p_{atm} \approx 0$, rozdíl geodetických výšek $\Delta h = h_1 - h_2$ a ztrátová výška h_z je spočtena dle rovnice (2.2):

$$h_z = \xi \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g}, \tag{2.2}$$

kde ξ ... ztrátový součinitel [-].



Obr. 2.7 Schéma zjednodušeného případu vtokového objektu s výtokem do tlakového přivaděče

Po dosazení výše uvedených závislostí do rovnice (2.1) dostáváme vztah (2.3):

$$\Delta h = \xi \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\rho . g} . \tag{2.3}$$

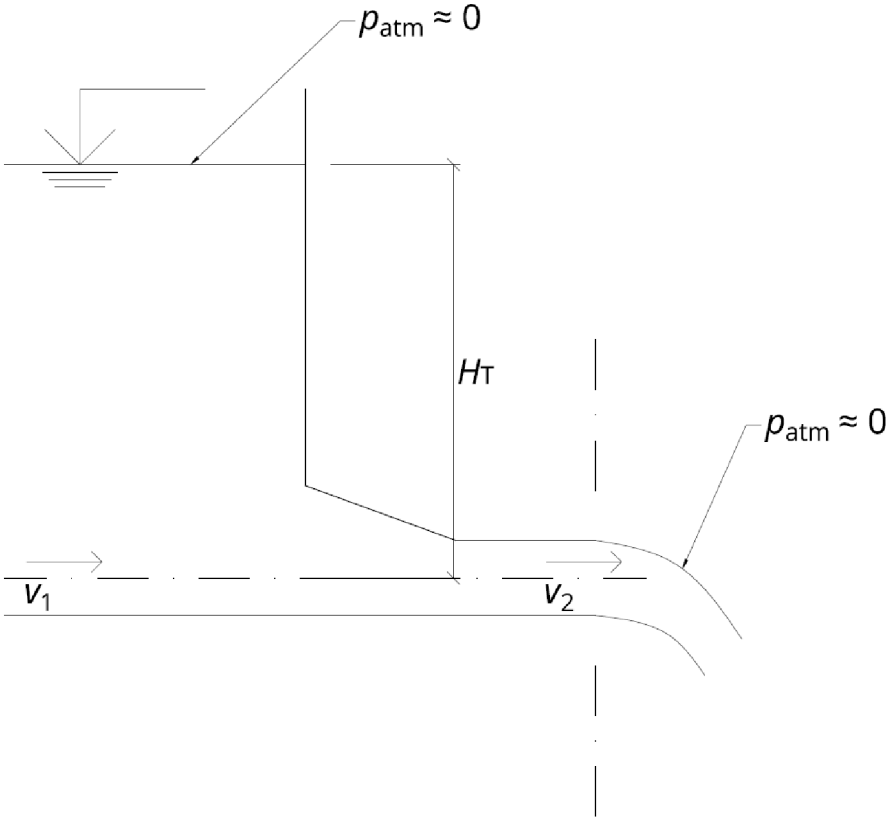
Po dalších úpravách pak dostáváme vztah (2.4), kde dynamický tlak p_{dyn} spočteme dle (2.5):

$$\xi + \alpha_2 = \frac{\Delta h \cdot \rho \cdot g - p_2}{p_{\mathrm{dyn}}} , \tag{2.4}$$

$$p_{\mathrm{dyn}} = \rho \frac{v_2^2}{2} . \tag{2.5}$$

Toto platí pro vtoky do tlakových přivaděčů. Pro zjednodušení naší situace vyplývající z konfigurace stávajícího modelu instalovaného ve zkušebním žlabu předpokládáme výtok do volna zcela otevřeným konfuzorovým uzávěrem. Toto zjednodušení je pro porovnání energetické účinnosti vtoku přípustné. Na modelu mezi vtokovou částí objektu a výtokovým zcela otevřeným segmentovým uzávěrem, nezasahujícím

do průtočného průřezu, není přidatná ztráta třením ani místní. Při výtoku do volna uvažujeme veličiny dle obrázku 2.8.



Obr. 2.8 Schéma zjednodušeného případu vtokového objektu s výtokem do volného prostředí (nezatopeným)

V prostoru protiproudně od vtoku je uvažována nulová rychlost. Tlak p_1 a p_2 je v tomto případě shodný – atmosferický, proto tyto dva členy rovněž dále nevystupují. Pokud budeme uvažovat, že tlačná výška $H_T = h_1 - h_2$, můžeme rovnici (2.1) přepsat do tvaru:

$$H_T = \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + h_z \,, \tag{2.6}$$

kde je h_z spočteno podle rovnice (2.2).

Dosazením rovnice (2.2) do rovnice (2.6) získáme vztah (2.7):

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{\alpha_2 + \xi}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_T} \,. \tag{2.7}$$

Výraz před odmocninou se označuje jako součinitel výtokové rychlosti φ. Při výtoku do volného prostředí dochází v závislosti na geometrii protékané výtokové části ke kontrakci proudu, která je reprezentována v bilanci součinitelem kontrakce ε. Násobek součinitelů kontrakce a výtokové rychlosti je označován jako součinitel výtoku $\mu = \varphi \cdot \varepsilon$. Po dosazení dostáváme pro výpočet průtoku rovnici (2.8), která je využita dále.

$$Q = \mu \cdot S . \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{\mathrm{T}}} \, . \tag{2.8}$$

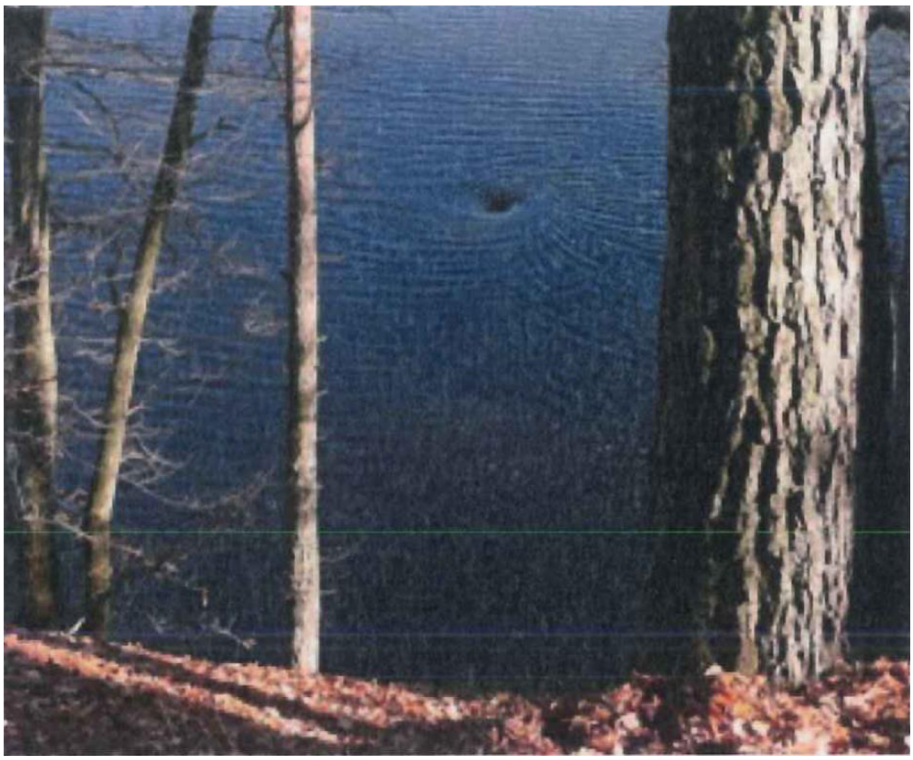
Při vypracování této kapitoly byly využity zdroje [2, 3].

2.3 VÝPOČET ZTRÁT PŘI SOUČASNÉM PROVOZU VÍCE SOUSEDNÍCH VTOKŮ

Při současném provozu dvou nebo více vtoků umístěných vedle sebe dochází k uplatnění vzájemného ovlivnění v důsledku deformace proudnic v předpolí vtokového objektu. Výpočet energetické bilance v okruhu je v zásadě stejný jako u předchozího případu, dochází jen k ovlivnění účinnosti vlastního vtoku, dle [1] dochází k nárůstu ztrátového součinitele místní ztráty až o 18 %. V této kapitole bylo využito zdrojů [1, 4].

2.4 HLADINOVÉ VÍRY A STÁDIA TVORBY HLADINOVÝCH VÍRŮ

Vznik vodního víru je podmíněn otáčivým pohybem proudění vody vznikajícím v následku zakřivení proudových vláken. Z hlediska hydroenergetického a z pohledu vodních staveb se jako nejvýznamnější jeví úplný nálevkovitý vír, kdy dochází ke strhávání vzduchu jádrem víru do přivaděče. Toto strhávání vzduchu poté komplikuje provoz hydrotechnických i hydroenergetických děl. Na následujících fotografiích je zobrazen vtokový vír nad ponořeným vtokem do obtokové štoly VD Pařížov a vtahování plovoucích trámků a větví vírem.



Obr. 2.9 Úplný hladinový vtokový vír na VD Pařížov [12]

Obr. 2.10 Detail úplného vtokového víru na VD Pařížov [12]

Obr. 2.11 Vtahování plovoucích trámků a větví vírem na VD Pařížov [12]

Masivní víry mohou mít za následek snížení kapacity přivaděče a v konečném důsledku i snížení účinnosti turbíny. V tlakových přivaděčích může rovněž docházet vlivem stlačování strhávaného vzduchu k rázům a tlakovým a rychlostním pulzacím. Dalším z následků těchto jevů je výskyt kavitace, což v konsekvenci znamená výrazné opotřebovávání některých částí díla a snížení jeho životnosti.

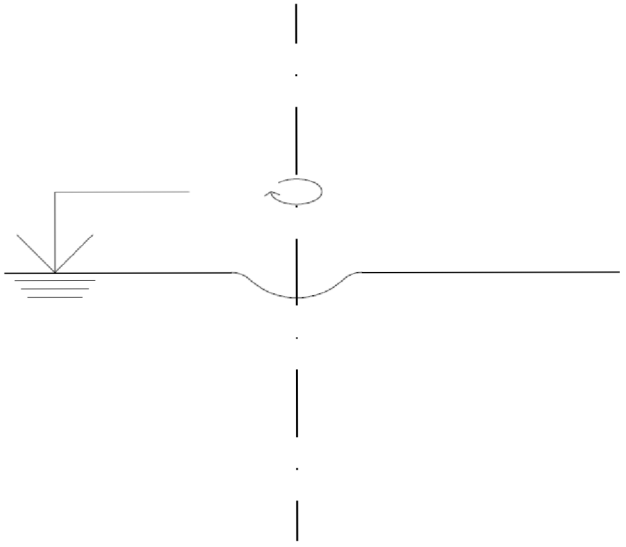
Do vtokových objektů může být vzduch strháván z několika příčin. Jako první zmiňme vnik vzduchu vlivem velkého provzdušnění proudu před vtoky, tento stav vzniká například při změně sklonu dna. Dále se jedná o přisávání vzduchu zavzdušňovacím potrubím s vyústěním do místa s výskytem podtlaku vůči atmosféře. V úvahu přicházejí i další příčiny, avšak nejčastějším případem je výše uvedené strhávání úplnými vtokovými víry.

Observace dílčích stádií víru je pozorovatelsky náročnou činností, jež je zatížena značnou subjektivitou. Je tedy vhodné všechna pozorování provádět jednou osobou pro zachování konzistence. V prvotní fázi vývoje víru dochází k mírným vibracím hladiny, poté ke vzniku důlku a v konečném stadiu ke vnikání vzduchu. Jednotlivé stupně jsou od sebe těžko rozeznatelné. Jednoznačně určitelná je první a poslední fáze. Hladinové

víry jsou klasifikovány do 6 stupňů, dle intenzity, a to podle obrazového a textového popisu uvedeného na následujících stranách.

a) **Hladinový vír**

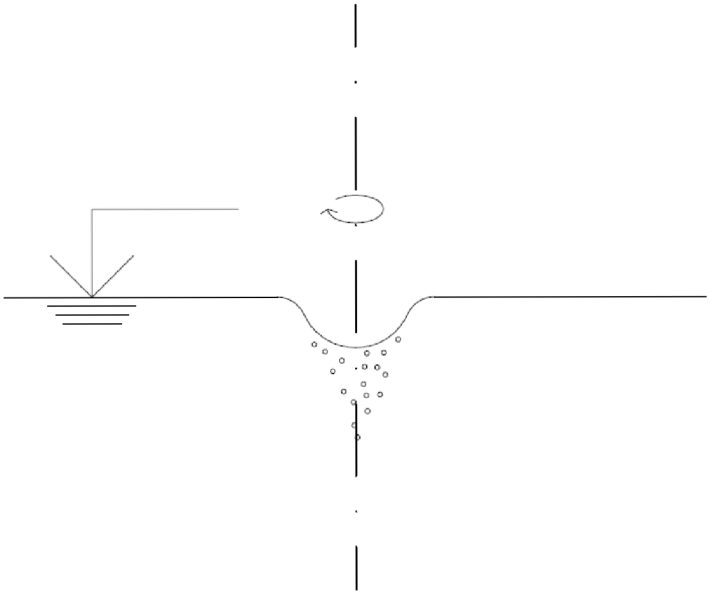
Projevuje se krouživým pohybem kapaliny, zvláště u hladiny a jejím částečným zvlněním. V ose víru se někdy u hladiny objeví malé vzduchové bubliny (obr. 2.12).



Obr. 2.12 Hladinový vír

b) **Vírový důlek**

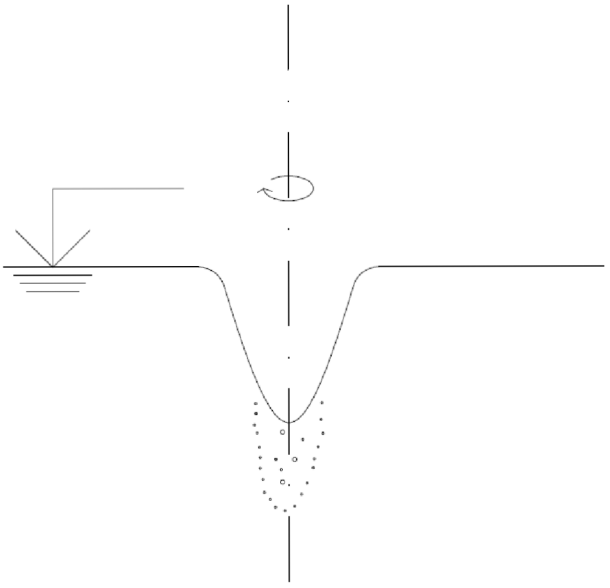
Při krouživém pohybu vody se na hladině občas vytváří malý kuželový vírový důlek. Strhávání vzduchových bublin z hladiny do hloubky je nepatrné a bubliny se vracejí zpět k hladině (obr. 2.13).



Obr. 2.13 Vírový důlek

c) **Neúplný nálevkovitý vír**

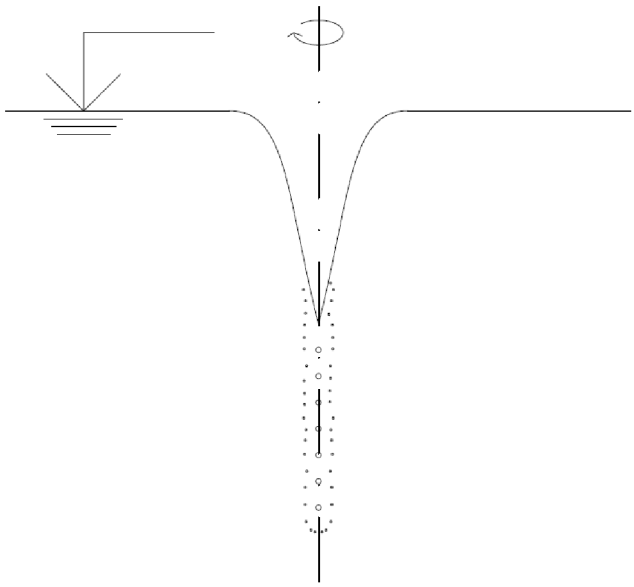
Vytváří se nálevka se vzduchovým jádrem. Vzduch je strháván ve formě bublinek, které se směrem do hloubky zmenšují. Bublinky vzduchu se vracejí zpět k hladině (obr. 2.14).



Obr. 2.14 Neúplný nálevkovitý vír

d) **Soustředěný vláknový vír**

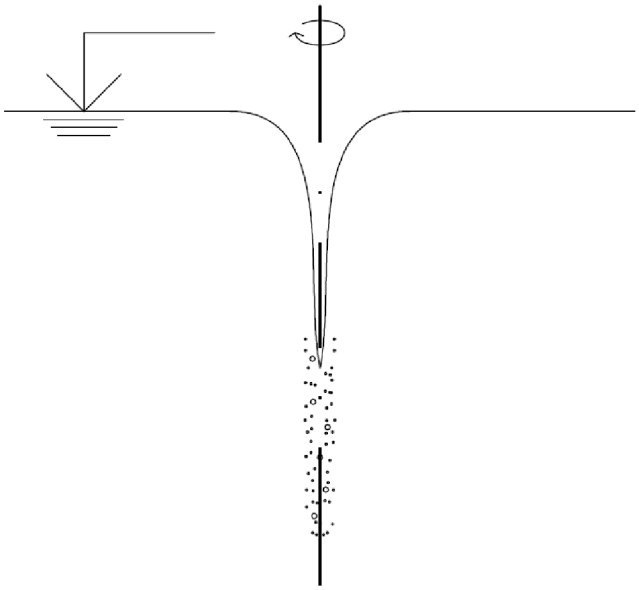
Vytvoří se úzká hlubší nálevka se vzduchovým jádrem. Vzduchové bubliny pod ní vytváří tenký vláknový řetězec. Převážná část bublin je strhávána do vtoku, jen malá část se vrací k hladině ve formě mlhy (obr. 2.15).



Obr. 2.15 Soustředěný vláknový vír

e) **Rozptýlený vláknový vír**

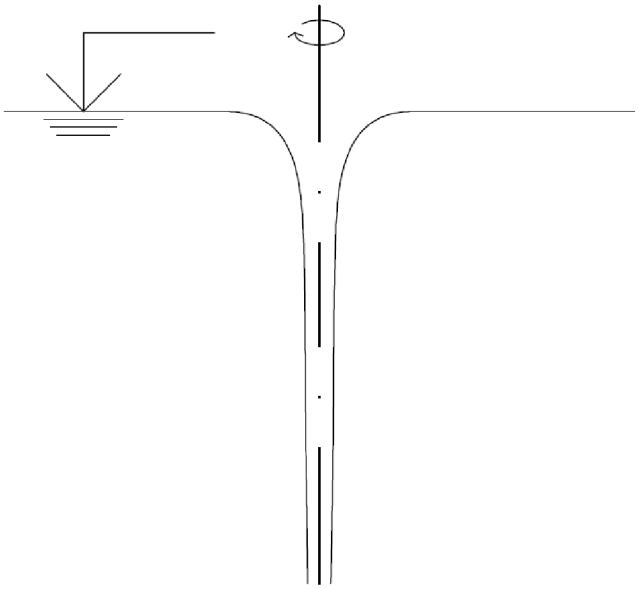
Nálevka se vzduchovým vírem je stejná jako při soustředěném vláknovém víru. Vzduchové bubliny se dostávají do větší hloubky, zde tvoří jemnou rozptýlenou mlhu, jejíž velká část je strhávána do vtoku (obr. 2.16).



Obr. 2.16 Rozptýlený vláknový vír

f) Úplný vír

Vytváří se hluboká nálevka se souvislým vzduchovým jádrem, kterým je vzduch intenzivně strháván do vtoku (obr. 2.17).



Obr. 2.17 Úplný vír

Tato problematika byla vypracována na základě informací z [5].

2.5 STÁVAJÍCÍ ZPŮSOBY VÝPOČTU KRITICKÉ HLOUBKY PONORU

Kritickou hloubkou ponoru vtoku rozumíme takovou odlehlost hladiny od těžiště vztažného průřezu, při níž dojde k vytvoření úplného vtokového víru a dochází tedy ke vtahování vzduchu do proudu vody přivaděče či spodní výpusti. Výpočtem a stanovením kritické hloubky ponoru se zabývalo již několik autorů, jejichž poznatky jsou v této kapitole využity a převzaty z literatury [3, 5, 16 a 17]. Při přebírání těchto výsledků je nutné dbát zvýšené opatrnosti na okrajové podmínky, za kterých tyto pokusy probíhaly. Také je nutné brát zřetel na průřez, který je definován jako vztažný. Některé vztahy a situování vztažných průřezů jsou uvedeny níže.

2.5.1 Výpočet kritické hloubky dle Reddyho a Pickforda

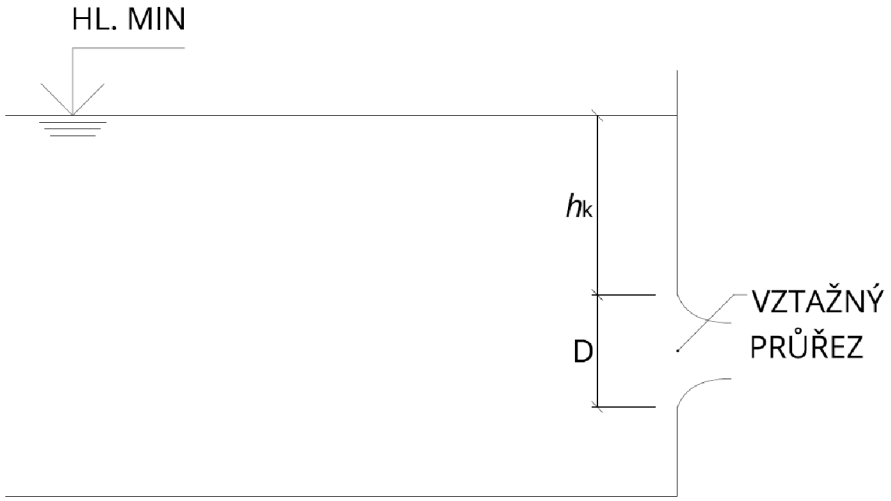
Reddy a Pickford odvodili vztah (2.9) pro výpočet kritické hloubky pro zaoblený vtok ve svislé stěně. Volba vztažného průřezu je jasně patrná z obrázku 2.18.

$$h_{\mathrm{k}} = 0{,}319 \cdot v \cdot \sqrt{D}, \tag{2.9}$$

kde h_k ... kritická hloubka ponoru vtoku [m],

v ... rychlost proudění ve vztažném průřezu [m·s^{-1}],

D ... průměr rozšířeného vstupního otvoru přivaděče [m].



Obr. 2.18 Vztažný průřez dle Reddyho a Pickforda

2.5.2 Výpočet kritické hloubky dle Wittmanna

Dle Wittmanna je kritická hloubka definována vztahem (2.10), nicméně u tohoto odvození není specifikován způsob určení vztažného průřezu, stanovení rychlosti nebo hloubky ponoru.

$$h_{\mathrm{k}} = \frac{v^2}{g}\ , \tag{2.10}$$

kde h_k ... kritická hloubka ponoru vtoku [m],

v ... rychlost proudění ve vztažném průřezu [m·s^{-1}],

g ... gravitační zrychlení [m·s^{-2}].

2.5.3 Výpočet kritické hloubky dle Quicka

Quick předkládá rovnici (2.11), tedy násobek rychlostní výšky. Rovněž není udáno, jak byl zvolen vztažný průřez, rychlost či ponor.

$$h_\mathrm{k} = 1{,}78 \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \ , \tag{2.11}$$

kde h_k ... kritická hloubka ponoru vtoku [m],

v ... rychlost proudění ve vztažném průřezu [m·s^{-1}],

g ... gravitační zrychlení [m·s^{-2}].

2.5.4 Výpočet kritické hloubky dle Rohana

K dalším vztahům závisejícím na energetické výšce patří rovnice Rohana (2.12). Rohan ve vztahu uvažuje s hloubkou těžiště profilu počátku prizmatického úseku přivaděče. Froudovo kritérium je pak definováno dle vztahu (2.13).

$$h_\mathrm{k} = \left(\frac{2{,}05}{\mathrm{Fr}}\right)^{1{,}68} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \ , \tag{2.12}$$

kde h_k ... kritická hloubka ponoru vtoku [m],

v ... rychlost proudění ve vztažném průřezu [m·s^{-1}],

g ... gravitační zrychlení [m·s^{-2}],

Fr ... Froudovo kritérium [-].

$$\mathrm{Fr} = \frac{v}{\sqrt{g \cdot D}} \ , \tag{2.13}$$

kde v ... rychlost proudění ve vztažném průřezu [m·s^{-1}],

g ... gravitační zrychlení [m·s^{-2}],

D ... průměr přivaděče [m].

2.5.5 Výpočet kritické hloubky dle Knausse

V Knaussově definici je představen „výtokový součinitel“ *C*, jenž má být ve všech profilech vtoku menší než 0,5. Tento součinitel se spočte na základě rovnice (2.14). Vztažný průřez je definován dle obrázku 2.19.

$$C = \frac{Q}{S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{\mathrm{T}}}} \ , \tag{2.14}$$

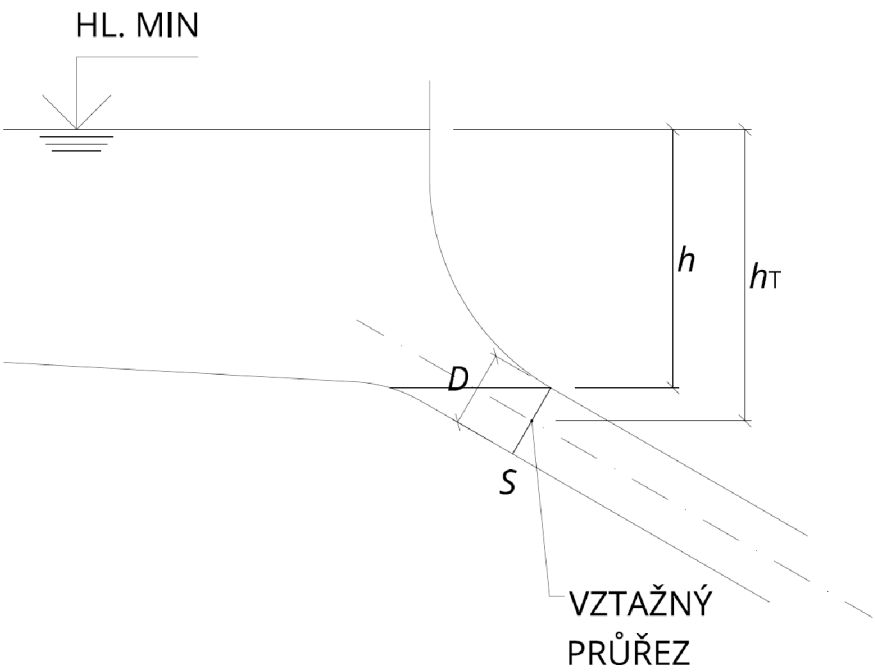
kde *C* ... výtokový součinitel dle Knausse [-],

Q ... průtok [$m^3 \cdot s^{-1}$],

S ... průtočná plocha ve zvoleném profilu [m],

g ... gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$],

h_T ... hloubka težiště zvoleného profilu pod hladinou před vtokem [m].



Obr. 2.19 Vztažný průřez dle Knausse

2.5.6 Výpočet kritické hloubky dle Jaina

Ve zprávě Skaličky [5] je uveden vztah dle Jaina zapsán ve tvaru (2.15). Vztah je platný pro Re ≥ 2500 a We ≥ 120. Odvozen byl za pokusů s hodnotami Froudova kritéria Fr ϵ <1, 20>. Za vztažný průřez je dle zprávy brán zaoblený vtok do potrubí, umístěný ve dně nádrže.

$$\frac{h_{\mathrm{k}}}{D} = 0{,}47 \cdot \sqrt{\mathrm{Fr}}\,, \tag{2.15}$$

kde h_K ... kritická hloubka ponoru vtoku [m],

D ... průměr přivaděče [m],

Fr ... Froudovo kritérium (2.13) [-].

2.5.7 Výpočet kritické hloubky dle Šulce

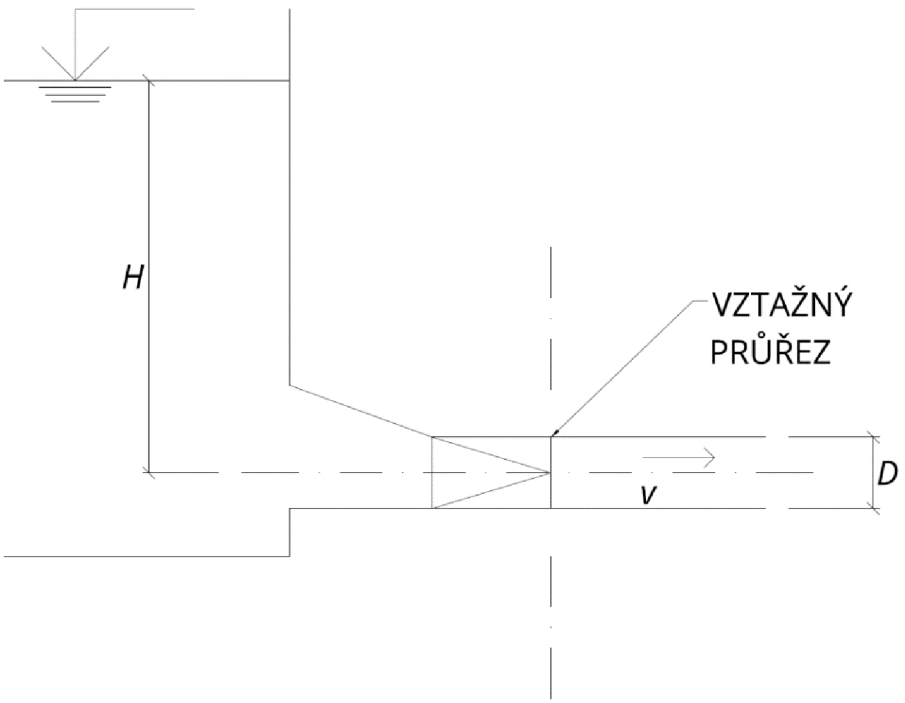
Dle komplexních výsledků laboratorních zkoušek tvorby hladinových vírů ze článku [6] je nejvíce vhodná k porovnání bezrozměrná rovnice (2.16) pro vertikálně rozvinutý konfuzorový vtokový objekt se svislou čelní stěnou, která se nejvíce přibližuje našim podmínkám. Vztah je odvozen pro Fr > 2,3. Určení hloubky a vztažného průřezu je podle obrázku 2.20. Froudovo kritérium je taktéž vypočteno dle (2.13) pro vztažný průřez.

$$\frac{H}{D} = 0{,}33 \cdot \mathrm{Fr}^2 + 1{,}10\,, \tag{2.16}$$

kde H ... odlehlost hladiny od těžiště vztažného profilu [m],

D ... vnitřní průměr potrubí (vztažný průřez) [m],

Fr ... Froudovo kritérium [-].



Obr. 2.20 Vztažný průřez dle Šulce

2.6 STÁVAJÍCÍ ZPŮSOB VÝPOČTU BEZPEČNÉ HLOUBKY PONORU

Bezpečná hloubka ponoru vtoku je na rozdíl od kritické hloubky ponoru vtoku zvětšena o jakousi rezervu. Jde tedy o vzájemně jen obtížně porovnatelné hodnoty. Výpočet bezpečné hloubky ponoru vtoku odvodil Gordon (2.17) z měření na již postavených dílech a není tedy zatížen modelovou chybou. Součinitel *a* je závislý na symetrii přítoku. Jeho hodnota je Gordonem doporučena *a* = 0,54 pro symetrický přítok a *a* = 0,72 pro nesymetrický přítok. Za vztažný průřez byl zvolen profil uzávěru ve vtokovém objektu, tedy tak, jak je patrno z obrázku 2.21. Bezpečná hloubka ponoru vtoku je Gordonem vztahována k horní hraně uzávěru, jak je uvedeno v [15]. Při výpočtu touto rovnicí dochází k určitému „předimenzování“, jde tedy o variantu bezpečnou. Využito je zde opět zdrojů [3, 5] a také [15].

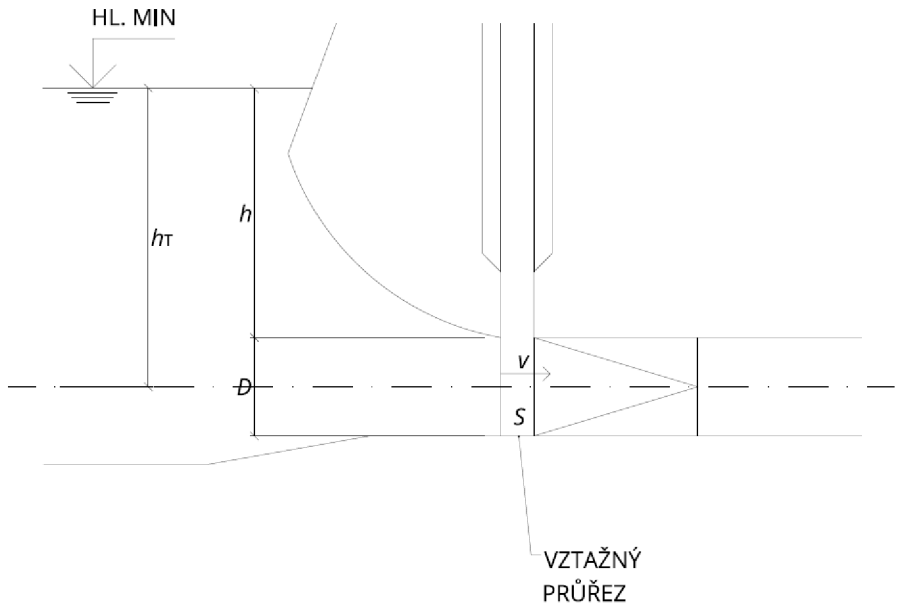
$$h_{\mathrm{b}} = a \cdot v \cdot \sqrt{D}, \tag{2.17}$$

kde h_{b} ... bezpečná hloubka ponoru vtoku [m],

a ... součinitel symetrie přítoku (*a* = 0,54 pro symetrický, *a* = 0,72 pro nesymetrický) [-],

v ... rychlost proudění ve vztažném průřezu [m·s^{-1}],

D ... průměr přivaděče [m].



Obr. 2.21 Vztažný průřez dle Gordona

2.7 OVLIVNĚNÍ VÍROVÝCH STRUKTUR VZÁJEMNÝM PROVOZEM SOUSEDNÍCH VTOKŮ

Touto problematikou se již zabýval Šulc ve výzkumné zprávě [1]. Výzkum byl prováděn na měřicím zařízení s dvěma větvemi a tlakovými odběry. Zpráva pokrývá zaústěné kruhové potrubí, zaústěný přechodový díl i konfuzorové vtoky. U vertikálně rozvinutého zaústění potrubí o průměru $D = 120$ mm probíhalo měření při odlehlostech *A*, a to $A/D = \{4{,}71;\ 3{,}00;\ 1{,}58\}$. Z prezentovaných výsledků vyplývá, že při relativní osové odlehlosti $A/D = 4{,}71$ byl vliv sousedních vtoků na tvorbu úplných vtokových vírů zanedbatelný. U menších poměrných osových odlehlostí již byl účinek vzájemného působení výraznější, hodnoty hloubek ponoru vtoku se lišily až o 20%. Ovlivnění se více projevovalo při nižších hodnotách Froudova kritéria. U některých vtoků však vycházela kritická hloubka ponoru při ovlivnění až dvojnásobná v porovnání s neovlivněným stavem, to však byly extrémní případy. U konfuzorových vtoků bylo prokázáno menší ovlivnění než u zbývajících dvou variant. Autor tuto skutečnost vysvětluje menšími rychlostmi vyskytujícími se před vtoky a jejich plynulým nárůstem.

Zmiňme také vliv směru rozvinutí konfuzorů. Při horizontálním rozvinutí je účinek menší než při rozvinutí vertikálním. U vertikálně rozvinutých vtoků pak již byl při osové odlehlosti A/D = 4,71 vliv zcela neznatelný a autor jej proto ani neuvádí. Ve zprávě jsou všechny tyto poměry uvedeny a detailně popsány.

2.8 ÚČEL PROVEDENÍ MODELOVÝCH ZKOUŠEK V RÁMCI DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jak je z předcházejícího textu zřejmé, problematikou vzniku vtokových vírů se již zabývalo několik autorů. Mezi jednotlivými vztahy jsou však značné rozdíly způsobené především různými podmínkami, za kterých byly odvozeny. Rovněž problematikou vzájemného provozu dvou vtoků se již zabýval Šulc ve zprávě [1], avšak ovlivnění vírových struktur vzájemným provozem více jak dvou sousedních vtoků a vliv současného provozu více jak dvou sousedních vtoků na jejich energetickou účinnost již nejsou dostatečně prozkoumány. Proto je v této práci provedeno pozorování a měření parametrů proudění pro různé uspořádání až čtyř současně provozovaných vtoků.

Dalším významným důvodem provedení předmětných zkoušek byla v době vypracování této diplomové práce přítomnost modelu bezpečnostního objektu VD Nové Heřminovy v měřítku 1:35, který je vybaven čtyřmi regulovatelnými spodními výpustmi. Tento model byl v rámci aplikovaného výzkumu zhotoven ve dvou variantách odlehlosti bloků se spodními výpustmi umožňujících výzkum dopadu situování vtoků na proudění v jejich předpolí a energetickou účinnost.

3 MODELOVÁ PODOBNOST

Při posuzování modelovaných jevů, které vzniknou na reálné konstrukci, je nutné zajistit podobnost proudění reálného a proudění na modelu. Mechanickou podobnost dvou jevů je možné dosáhnout v případě, že jsou splněny následující podmínky podobnosti:

1. geometrické
2. kinematické
3. dynamické

Předpoklady dynamické podobnosti požadují automatické splnění dvou výše uvedených podmínek 1. i 2.

V dalším textu označme veličiny na modelu indexem 1 a veličiny skutečné indexem 2.

3.1 GEOMETRICKÁ PODOBNOST

Geometrická podobnost je dodržena, mají-li všechny odpovídající si rozměry stálý poměr, tedy délkové měřítko M_L:

$$M_{\mathrm{L}} = \frac{L_2}{L_1};\ L_2 = M_{\mathrm{L}} \cdot L_1. \tag{3.1}$$

Tento poměr musí být také splněn i u měřítek ploch, pro měřítka ploch M_S platí:

$$M_{\mathrm{S}} = \frac{S_2}{S_1};\ M_{\mathrm{S}} = M_{\mathrm{L}}^2. \tag{3.2}$$

V případě objemů je nutné zachovat měřítka objemů M_V:

$$M_{\mathrm{V}} = \frac{V_2}{V_1};\ M_{\mathrm{V}} = M_{\mathrm{L}}^3. \tag{3.3}$$

3.2 KINEMATICKÁ PODOBNOST

Má-li být kinematická podobnost mezi dvěma objekty splněna, musíme dostát následujícímu předpokladu. Dráhy, jež jsou opisovány sobě odpovídajícími částicemi proudu v úměrně odpovídajících si dobách, si sobě odpovídají – jsou podobné. Měřítko délek je pak doplněno o měřítko času M_t:

$$M_\mathrm{t} = \frac{t_2}{t_1};\ t_2 = M_\mathrm{t} \cdot t_1. \tag{3.4}$$

Odvozením z tohoto měřítka dostáváme následující:

1. rychlostní měřítko – M_v:

$$M_\mathrm{v} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\frac{L_2}{t_2}}{\frac{L_1}{t_1}} = \frac{\frac{L_2}{L_1}}{\frac{t_2}{t_1}} = \frac{M_\mathrm{L}}{M_\mathrm{t}};\ v_2 = M_\mathrm{v} \cdot v_1, \tag{3.5}$$

2. měřítko zrychlení – M_a:

$$M_\mathrm{a} = \frac{a_2}{a_1} = \frac{\frac{L_2}{t_2^2}}{\frac{L_1}{t_1^2}} = \frac{\frac{L_2}{L_1}}{\frac{t_2^2}{t_1^2}} = \frac{M_\mathrm{L}}{M_\mathrm{t}^2}, \tag{3.6}$$

3. měřítko průtoků – M_Q:

$$M_\mathrm{Q} = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\frac{V_2}{t_2}}{\frac{V_1}{t_1}} = \frac{\frac{V_2}{V_1}}{\frac{t_2}{t_1}} = \frac{M_\mathrm{L}^3}{M_\mathrm{t}}, \tag{3.7}$$

3.3 DYNAMICKÁ PODOBNOST

Následující podmínkou je podmínka dynamické podobnosti. Dle této podmínky je požadováno, aby poměr sil byl dán měřítkem sil – M_F:

$$M_\mathrm{F} = \frac{F_2}{F_1};\ F_2 = M_\mathrm{F} \cdot F_1. \tag{3.8}$$

Stanovujeme také měřítko hmotností – M_m:

$$M_\mathrm{m} = \frac{m_2}{m_1};\ m_2 = M_\mathrm{m} \cdot m_1. \tag{3.9}$$

Další je měřítko měrných hmotností – M_ρ:

$$M_\rho = \frac{\rho_2}{\rho_1}. \tag{3.10}$$

Pokud do silové rovnice (3.11) zavedeme poměry uvedené výše, dostaneme rovnici (3.12), ta označuje Newtonovo bezrozměrné kritérium. Rovnice (3.12) dále označuje obecný Newtonův zákon podobnosti.

$$F = m \cdot a \tag{3.11}$$

$$\frac{F}{\rho \cdot v^2 \cdot L^2} = \text{idem} \tag{3.12}$$

Dvě proudění jsou mechanicky podobná, má-li zlomek v Newtonovu bezrozměrném kritériu (3.12) stejnou hodnotu pro obě proudění.

Proudění kapalin je doprovázeno především silami tíže, tření a povrchového napětí. Pokud působí jen jeden druh sil (nebo je dominantní) lze z obecného Newtonova zákona při platnosti zjednodušujících předpokladů odvodit další kritéria:

1. **převažující účinek sil tíže**

V případech, kdy převažují síly tíže, můžeme uplatnit Froudeovův zákon podobnosti popsaný v rovnici (3.15). Tu získáme jako reciproční hodnotu z rovnice (3.14). Do obecného Newtonova kritéria (3.12) dosazujeme tíhu (převažující sílu), tak dostaneme rovnici (3.13). Podmínkou podobnosti je v tomto případě totožná hodnota Froudeova kritéria na modelu i ve skutečnosti.

$$F = G = m \cdot g \tag{3.13}$$

$$\frac{m.g}{\rho \cdot v^2 \cdot L^2} = \frac{m.g.L}{\rho \cdot v^2 \cdot L^2} = \frac{m.g.L}{m \cdot v^2} = \frac{g.L}{v^2} = \text{idem} \tag{3.14}$$

$$\text{Fr} = \frac{v^2}{g \cdot L} = \text{idem} \tag{3.15}$$

Froudeovo kritérium je využíváno především při řešení proudění o volné hladině, tedy při proudění v řekách, u vodních staveb – jezů, přelivů, skluzů, řešení účinků vln, dále při proudění vodními turbínami či čerpadly atd.

2. **převažující účinek sil tření**

Vztah (3.16) formuluje Reynoldsovo kritérium podobnosti. Odvozeno je opět z rovnice (3.12). Pro převládající síly tření je podmínkou podobnosti stejná hodnota Reynoldsova kritéria pro model i pro skutečnost:

$$\mathrm{Re} = \frac{v \cdot L}{\nu} = \mathrm{idem}. \tag{3.16}$$

Na rozdíl od Froudeova kritéria se Reynoldsovo kritérium podobnosti uvažuje vždy při modelování jevů bez volné hladiny. Mezi ně řadíme zejména tlakové proudění v potrubí, obtékání těles či částí staveb apod.

3. **převažující účinek sil povrchového napětí**

Síly jsou v tomto případě definovány součinem povrchového napětí σ a délky L:

$$F = \sigma \cdot L. \tag{3.17}$$

Dosazením do Newtonova zákona a úpravou získáme bezrozměrné Weberovo kritérium (3.18) vyjadřující Weberův zákon podobnosti. Podobnost je zaručena, pokud je hodnota Weberova kritéria pro model i pro skutečnost shodná:

$$\mathrm{We} = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot L}{\sigma} = \mathrm{idem}. \tag{3.18}$$

V modelové podobnosti se kromě těchto uvedených zákonů dále používá:

4. **Cauchyho zákon** – pro objemovou stlačitelnost, je dán vztahem:

$$\mathrm{Ca} = \frac{\rho \cdot v^2}{K} = \mathrm{idem}, \tag{3.19}$$

kde K označuje modul objemové stlačitelnosti.

5. **Strouhalův zákon** – pro podobnost dvou neustálených jevů:

$$\mathrm{Sh} = \frac{L}{v \cdot t} = \mathrm{idem}, \tag{3.20}$$

6. **Karmánův zákon** – pro podobnost dvou turbulentních jevů:

$$\mathrm{Ka} = \frac{v'}{v} = \mathrm{idem}, \tag{3.21}$$

kde v' značí pulsace rychlosti.

Měřítko podobnosti vztahujeme vždy k odpovídající podobnosti dle převažující síly.

3.4 ZAJIŠTĚNÍ MODELOVÉ PODOBNOSTI

Hydraulický jev je možné modelovat pomocí jednoho z výše uvedených kritérií při dodržení pásma automodelovosti, které je ohraničeno spodními mezemi zmenšení objektu. Při nedodržení těchto spodních hodnot dochází k zatížení výsledků dalšími nepřesnostmi způsobenými spolupůsobením sil, jež nejsou v kritériu zohledněny.

Při převažujících silách gravitačních na sledované proudové jevy lze využít k modelování Froudovo kritérium podobnosti. Pro Froudovo kritérium je nutné při modelování se spolupůsobením kapilárních sil dodržet pro vtokové objekty především následující podmínky. Šířka *a* výtokového otvoru na modelu musí být větší než 60 mm a nejmenší tlačná výška H_T musí být větší nebo rovna násobku 3,3*a* pro nezávislost tvaru výtokového paprsku na tlačné výšce.

Proudění na modelu musí být také v celém rozsahu v turbulentní oblasti. To je zajištěno, pokud Reynoldsovo kritérium na modelu $\mathrm{Re_M}$ (3.22) je větší než $1{,}5 \cdot 10^5$. Při dodržení této podmínky je možno vliv viskozity zanedbat. Toto bude dále ověřeno i u měření obsažených v této publikaci.

$$\mathrm{Re_M} = \frac{v \cdot a}{\nu}, \tag{3.22}$$

kde *v* ... rychlost proudění [$\mathrm{m \cdot s^{-1}}$],

a ... vztažný rozměr výtoku, v tomto případě šířka [m],

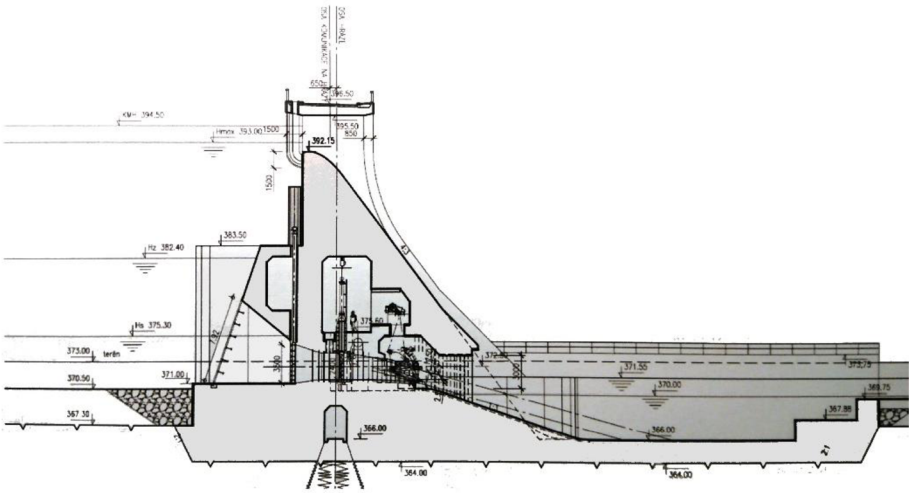
ν ... kinematická viskozita [$\mathrm{m^2 \cdot s^{-1}}$].

Informace o v této kapitole byly převzaty z [2, 7, 8, 9 a 18].

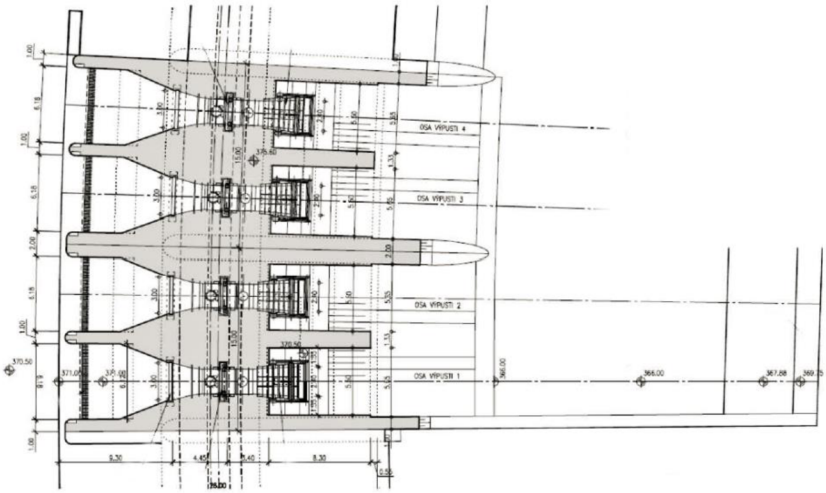
4 POPIS MODELU, MĚRNÉ TRATĚ A MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ

4.1 MODEL – POPIS ZKUŠEBNÍHO OBJEKTU

Série měření probíhala na modelu VD Nové Heřminovy sestaveného pro ověření hydraulických charakteristik navrhovaného díla. Řez spodní výpustí budoucího VD je zobrazen na obrázku 4.1, půdorys na obrázku 4.2. Půdorysné rozvržení bloků odpovídá variantě s kaskádovým uspořádáním skluzu na vzdušním líci, která je charakteristická dvojicí funkčních bloků se spodními výpustmi vedle sebe [13].



Obr. 4.1 Řez spodní výpustí [13]



Obr. 4.2 Půdorys spodních výpustí [13]

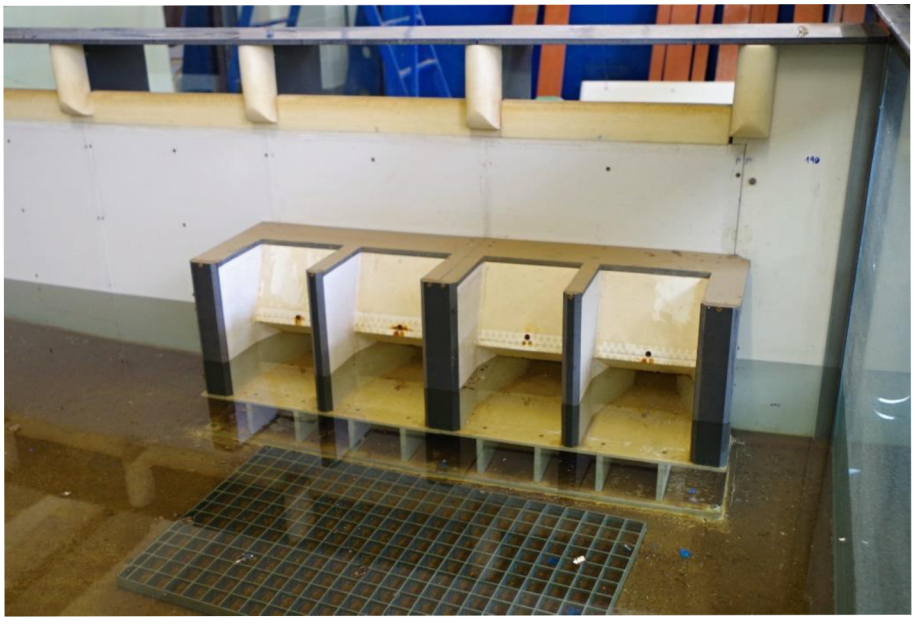
Konstrukce byla pracovníky Laboratoře vodohospodářského výzkumu zhotovena v měřítku M_L = 35. Toto měřítko umožňuje splnění omezujících podmínek modelové podobnosti, které jsou zmíněny v předcházející kapitole. Samotný model byl sestaven z pěti úplných bloků hráze (obr. 4.3), které byly vyrobeny z termoplastových desek. Přelivná koruna pak byla vyrobena z tvrzeného polystyrenu. Celá konstrukce byla stabilizována nerezovou konstrukcí a utěsněna silikonem.

Obr. 4.3 Protiproudní pohled na bloky hráze

V prvních dvou blocích zprava v poproudním pohledu byly umístěny spodní výpusti. V každém bloku se nacházely dvě spodní výpusti hrazené segmentovými uzávěry. Segmenty spodních výpustí byly tvořeny nerezovými plechy s aretací motýlkovými maticemi pro vytvoření dostatečného přítlaku a možnosti otevření či zavření jednotlivých uzávěrů (obr. 4.4). Těmito uzávěry byly nastavovány individuální kombinace během měření. Změřené velikosti uzávěru činily a = 69,0 mm a b = 37,5 mm. Vtokové objekty jsou zachyceny na obrázku 4.5. Výtok spodními výpustmi byl realizován do volna, nezatopený (obr. 4.6). Při vyšších průtocích, tedy současných provozech přelivů a spodních výpustí byl výtokový profil z výpustí částečně zatopen.

Při převádění průtoku pouze spodními výpustmi (náš sledovaný případ) byl realizován výtok pouze do volna při neovlivnění dolní vodou. Úrovně hladiny dolní vody odpovídaly kapacitní charakteristice koryta pod hrází.

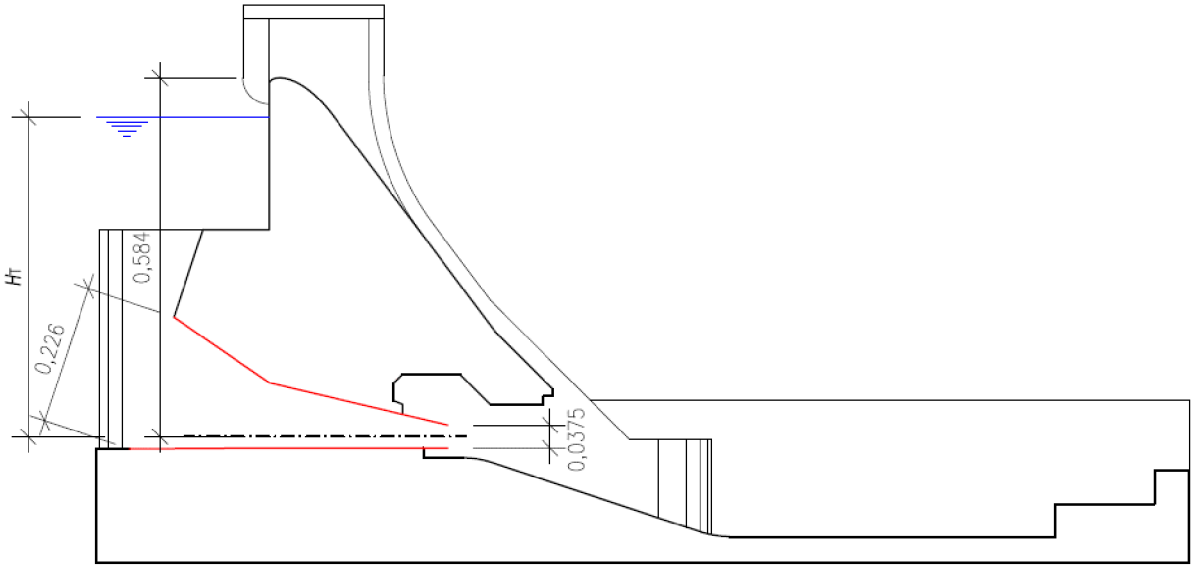
Obr. 4.4 Protiproudní pohled na komory uzávěrů spodních výpustí



Obr. 4.5 Návodní strana vtokových objektů

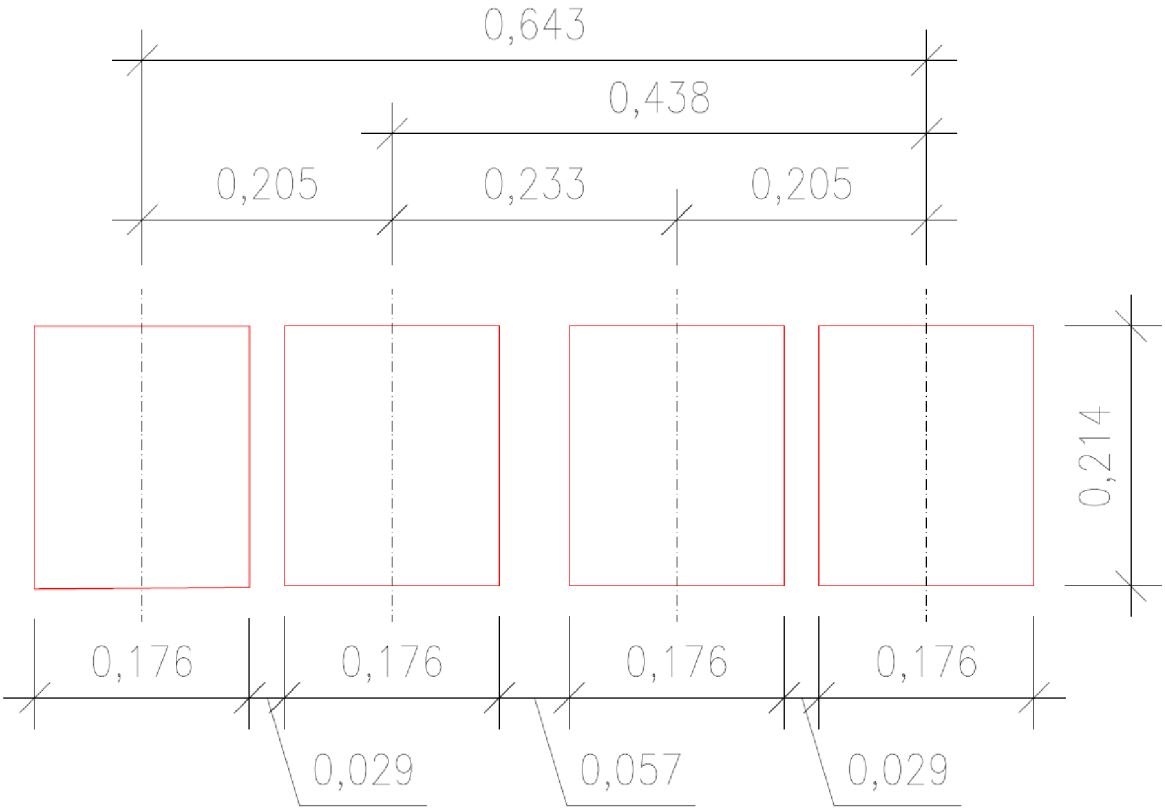
Obr. 4.6 Výtok spodními výpustmi

Na schématech uvedených níže jsou zobrazeny rozměry modelu a veličiny vstupující do výpočtu. Na prvním obrázku (obr. 4.7) je zobrazen řez modelem. Je zde znázorněn postup stanovení tlačné výšky H_T, hodnota ΔH = 0,584 m a rozměr uzávěru b = 0,0375 m.



Obr. 4.7 Řez modelem hráze, kótováno v metrech [13]

Druhé ze schémat (obr. 4.8) znázorňuje poproudní pohled na čelní profil spodních výpustí a to s jejich uvedenými osovými odlehlostmi. Z nich jsou pak dopočteny bezrozměrné poměrné odlehlosti *A*/*a*, kde *A* je osová odlehlost výpustí a *a* je půdorysný rozměr uzávěru (*a* = 69,0 mm). Hodnoty jsou pro zjednodušení uvedeny v tabulce 4.1.



Obr. 4.8 Poproudní schematický pohled na čelní profil výpustí, kótováno v metrech

Tab. 4.1 Hodnoty poměrných odlehlostí vztažené k půdorysné šířce uzávěru *a*

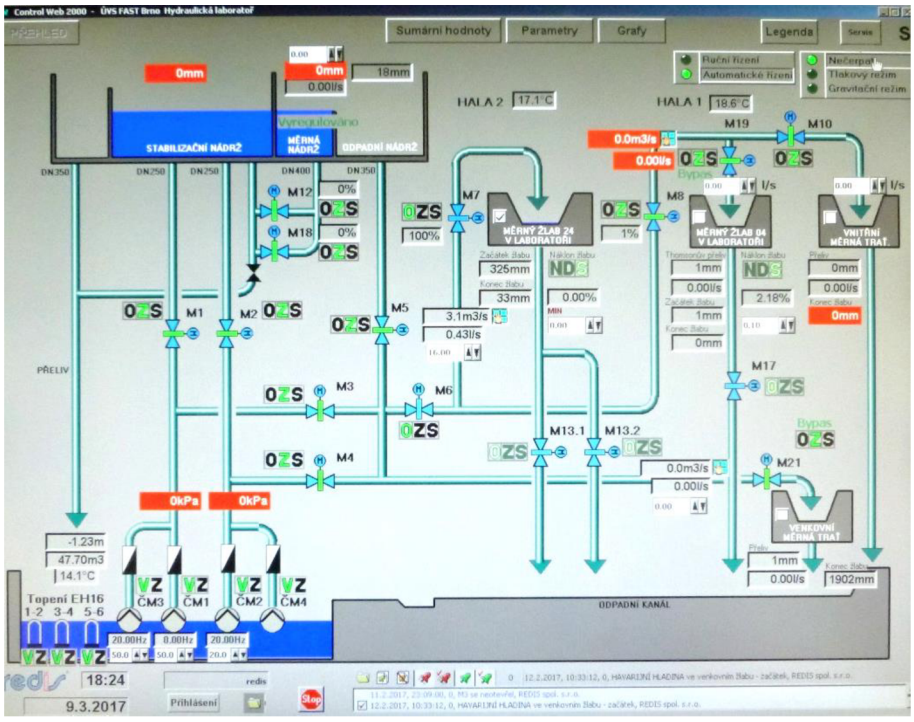
A [m]	*A*/*a* [-]
0,205	2,971
0,438	6,348
0,643	9,319

4.2 POPIS MĚRNÉ TRATĚ A MĚŘICÍHO VYBAVENÍ

Měření probíhalo v Laboratoři vodohospodářského výzkumu v budově F Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Měrná trať se skládá z celého systému zajišťujícího přesný odečet úrovní hladin a průtoků za všech měřených stavů. Hydraulický žlab, ve kterém je model umístěn, má šířku 2,5 m a účinnou hydraulickou délku 12,5 m. Kontrolu stavu a sledování vírových struktur umožňuje prosklení boků měrného žlabu. Celý hydraulický okruh je regulován řídicím systémem. Tento systém může být ovládán jak plně automatizovaně, tak ručně s možností řízení frekvence čerpadel. Přítok do žlabu je opatřen uklidňovací komorou umístěnou přes celou šířku žlabu (obr. 4.9), jež umožňuje homogenizaci proudu přitékajícího na model. Po protečení modelem odtéká voda přes betonové vývařiště a koryto do spadišťové části žlabu zpět do zásobních nádrží. Zadávání požadovaných průtoků je možné provádět prostřednictvím počítačového programu (obr. 4.10) vzdáleně nebo přímo v laboratoři, případně prostřednictvím ovládací jednotky (obr. 4.11) umístěné v blízkosti hydraulického žlabu. Okruh je opatřen kalibrovaným indukčním průtokoměrem. Odečet průtoků probíhá taktéž v počítačovém programu nebo pomocí tzv. vyhodnocovací jednotky (obr. 4.12). Úroveň hladiny v horní zdrži je odečítána digitálním hrotovým měřidlem (obr. 4.13) a kontrolována ultrazvukovým čidlem s možností zobrazení ve formě grafu či tabulkového záznamu. Systém čidel taktéž zajišťuje bezpečnost proti přelití žlabu.

Při ustálení jednotlivých charakteristických stavů byly v rámci hydraulických zkoušek pořizovány fotografie, případně také videozáznamy.

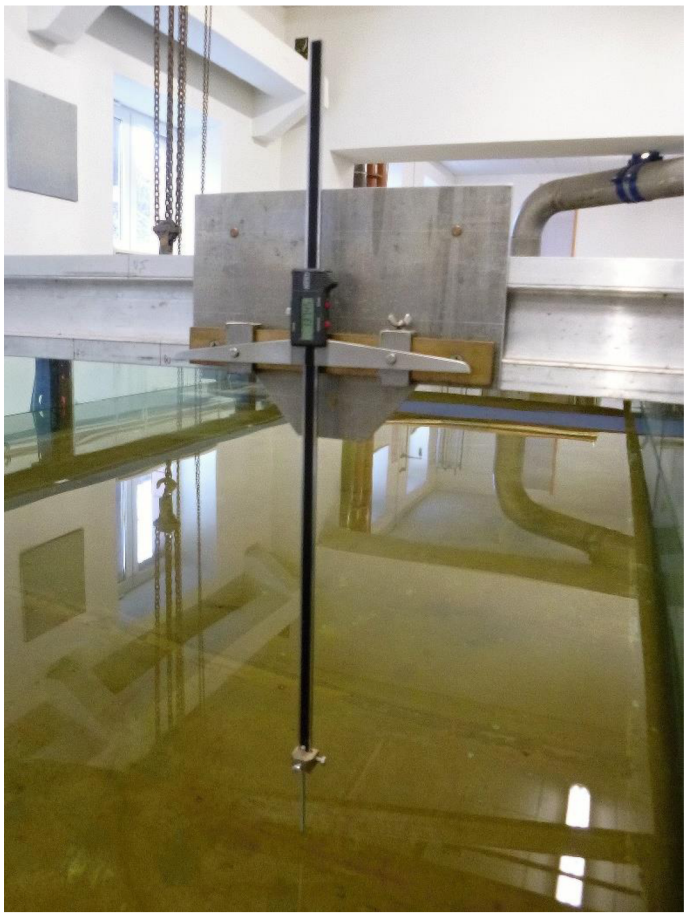
Obr. 4.9 Uklidňovací komora na začátku žlabu



Obr. 4.10 Prostředí počítačového programu

Obr. 4.11 Fotografie ovládací jednotky

Obr. 4.12 Fotografie vyhodnocovací jednotky



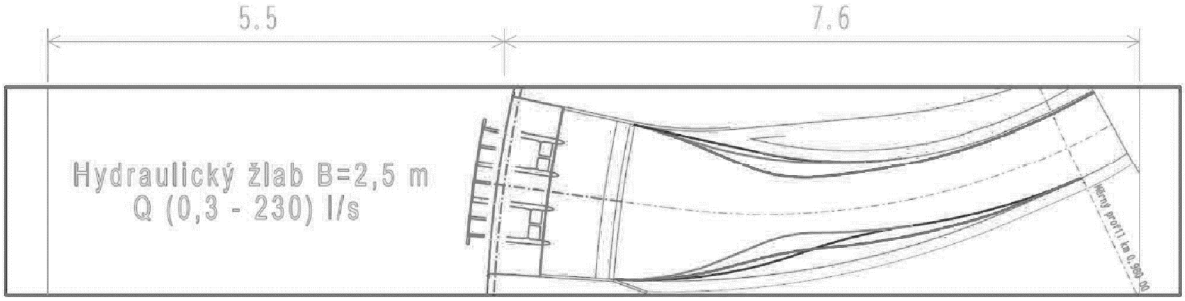
Obr. 4.13 Digitální hrotové měřidlo k odečtu úrovně hladiny

Ve měrném žlabu byl model umístěn dle obrázku 4.14.

Obr. 4.14 Umístění modelu v měrném žlabu [13]

V průběhu zpracovávání DP byla změněna konfigurace modelu, kdy byl mezi bloky spodních výpustí vložen další blok. Tato konfigurace [14] označovaná jako varianta bez kaskády byla dále zkoušena a je zmíněna také v kapitole 6. Protiproudní pohled na tuto konfiguraci je na obrázku 4.15. Umístění tohoto modelu ve žlabu je znázorněno v obrázku 4.16.

Obr. 4.15 Protiproudní pohled na konfiguraci s vloženým blokem a zvětšenou horizontální odlehlostí vtokových objektů



Obr. 4.16 Umístění modelu bezpečnostního objektu s vloženým blokem a zvětšenou horizontální odlehlostí vtoků ve žlabu [14]

5 MĚŘENÍ NA TRATI

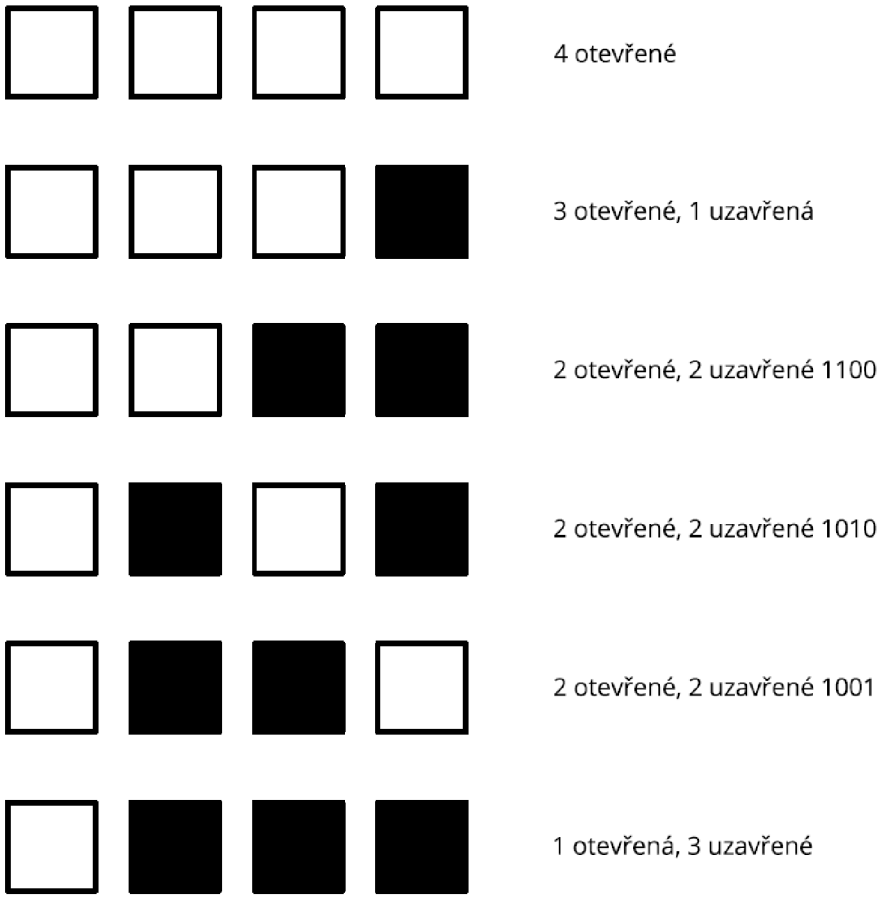
5.1 ÚČEL ZKOUŠEK

Účelem zkoušek je jednak zjištění míry ovlivnění energetické účinnosti vtoků jejich vzájemným provozem a také vlivu provozu a úrovní hladin v nádrži na tvorbu vtokových vírů na modelu bezpečnostního objektu vodního díla Nové Heřminovy. Cílem je postihnout co nejširší spektrum variant otevření spodních výpustí a zjistit z jejich pozorování a měření vliv na energetickou účinnost a tvorbu hladinových vírů.

5.2 POSTUP PRACÍ

Pozorování a měření bylo prováděno za setrvalého stavu vždy pro šest úrovní hladin pro každou konfiguraci modelu. Měření byla časově náročná, ustálení hladiny trvalo dle podmínek přibližně 30 minut. Po stabilizování pak byla měřena odlehlost hladiny horní vody od koruny přelivu hrotovým měřidlem, úroveň hladiny byla též kontrolována pomocí ultrazvukového čidla. Tato hodnota byla měřena desetkrát vzhledem ke statistickému zpracování. Při ustálení hladiny byly taktéž pořizovány fotografie případně se vyskytujících vírů a jejich klasifikace zapisovány do tabulky.

Tato měření byla prováděna pro 6 kombinací otevření spodních výpustí, a to vždy plně otevřených. Jednalo se o 4 otevřené výpusti, 3 otevřené výpusti, 2 otevřené výpusti (ve třech kombinacích s poměrnou osovou odlehlostí A/a = {2,971; 6,348; 9,319}) a jako kontrolní 1 otevřená výpust. Jednotlivé kombinace jsou uvedeny níže, včetně grafického znázornění pro přehlednost doprovázejícího všechny následující grafy (obr. 5.1). Schematický náhled na výpusti je proveden v protiproudním směru, otevřené výpusti jsou značeny symbolem □, zavřené pak ■. U dvou otevřených výpustí je doplněn textový popis. Označení 1 je pro otevřené výpusti, 0 pro uzavřené.



Obr. 5.1 Schéma kombinací otevření výpustí – plně značené jsou uzavřené, bez výplně jsou otevřené

Práce je dále souběžně dělena do dvou částí. První z nich je věnována energetické účinnosti, následující pak tvorbě hladinových vírů.

5.3 MĚŘENÍ ZA ÚČELEM ZJIŠTĚNÍ OVLIVNĚNÍ ENERGETICKÉ ÚČINNOSTI VTOKŮ V DŮSLEDKU JEJICH VZÁJEMNÉHO PROVOZU

Při měření za účelem vyšetření kapacity byly nastavovány průtoky na ovládací jednotce. Pro každou kombinaci bylo nastaveno 6 průtoků pro pokrytí dostatečného spektra tlačných výšek. Ty byly zjišťovány z odlehlostí hladin a koruny přelivu měřených hrotovým digitálním měřidlem. Hodnoty byly zapisovány do programu Microsoft Excel. V následujících tabulkách jsou uvedeny průměrné hodnoty naměřených průtoků a odlehlostí a z nich dopočítaných tlačných výšek podle vztahu (5.1). Přesnost hodnot odpovídá odchylce 0,92 % získané z jejich statistického zpracování.

$$H_{\mathrm{T},i} = \Delta H - h_{\mathrm{prům},i}, \tag{5.1}$$

kde $H_{\mathrm{T},i}$ ... i-tá tlačná výška [m],

ΔH ... výšková odlehlost koruny přelivu a těžiště vztažného průřezu, ΔH = 0,584 m,

$h_{\mathrm{prům},i}$ ... i-tá průměrná odlehlost hladiny a koruny přelivu [m].

Tab. 5.1 Průměrné hodnoty pro 4 výpusti otevřené □□□□

$Q_{\mathrm{zad},i}$ [l·s^{-1}]	Q_i [m^3·s^{-1}]	$h_{\mathrm{prům},i}$ [mm]	$h_{\mathrm{prům},i}$ [m]	$H_{\mathrm{T},i}$ [m]
27,00	0,0270	173,0	0,173	0,411
28,00	0,0276	140,4	0,140	0,444
29,00	0,0286	107,5	0,108	0,477
30,00	0,0300	59,5	0,060	0,525
31,00	0,0306	38,7	0,039	0,545
32,00	0,0310	23,7	0,024	0,561

Tab. 5.2 Průměrné hodnoty pro 3 výpusti otevřené, 1 uzavřenou □□□■

$Q_{\mathrm{zad},i}$ [l·s^{-1}]	Q_i [m^3·s^{-1}]	$h_{\mathrm{prům},i}$ [mm]	$h_{\mathrm{prům},i}$ [m]	$H_{\mathrm{T},i}$ [m]
20,25	0,0197	185,9	0,186	0,398
21,00	0,0207	141,4	0,141	0,443
21,75	0,0216	103,7	0,104	0,480
22,50	0,0222	75,7	0,076	0,509
23,25	0,0228	47,4	0,047	0,537
24,00	0,0237	6,1	0,006	0,578

Tab. 5.3 Průměrné hodnoty pro 2 výpusti otevřené, 2 uzavřené – 1100 □□■■

$Q_{\mathrm{zad},i}$ [l·s^{-1}]	Q_i [m^3·s^{-1}]	$h_{\mathrm{prům},i}$ [mm]	$h_{\mathrm{prům},i}$ [m]	$H_{\mathrm{T},i}$ [m]
13,50	0,0131	191,5	0,192	0,393
14,00	0,0135	166,7	0,167	0,417
14,50	0,0139	140,1	0,140	0,444
15,00	0,0149	76,3	0,076	0,508
15,50	0,0153	50,2	0,050	0,534
16,00	0,0159	7,3	0,007	0,577

Tab. 5.4 Průměrné hodnoty pro 2 výpusti otevřené, 2 uzavřené – 1010 □■□■

$Q_{zad,i}$ [l·s^{-1}]	Q_i [m^3·s^{-1}]	$h_{prům,i}$ [mm]	$h_{prům,i}$ [m]	$H_{T,i}$ [m]
13,50	0,0129	206,4	0,206	0,378
14,00	0,0134	177,6	0,178	0,407
14,50	0,0138	151,7	0,152	0,433
15,00	0,0148	90,0	0,090	0,494
15,50	0,0153	58,4	0,058	0,526
16,00	0,0158	17,9	0,018	0,566

Tab. 5.5 Průměrné hodnoty pro 2 výpusti otevřené, 2 uzavřené – 1001 □■■□

$Q_{zad,i}$ [l·s^{-1}]	Q_i [m^3·s^{-1}]	$h_{prům,i}$ [mm]	$h_{prům,i}$ [m]	$H_{T,i}$ [m]
13,50	0,0129	213,7	0,214	0,370
14,00	0,0135	179,5	0,180	0,405
14,50	0,0138	156,9	0,157	0,427
15,00	0,0147	100,4	0,100	0,484
15,50	0,0153	62,7	0,063	0,521
16,00	0,0159	19,4	0,019	0,565

Tab. 5.6 Průměrné hodnoty pro 1 výpust otevřenou, 3 uzavřené □■■■

$Q_{zad,i}$ [l·s^{-1}]	Q_i [m^3·s^{-1}]	$h_{prům,i}$ [mm]	$h_{prům,i}$ [m]	$H_{T,i}$ [m]
6,75	0,0067	187,4	0,187	0,397
7,00	0,0070	154,5	0,155	0,430
7,25	0,0074	112,6	0,113	0,472
7,50	0,0075	89,6	0,090	0,495
7,75	0,0078	53,6	0,054	0,531
8,00	0,0081	13,7	0,014	0,570

Tato naměřená a vypočtená data jsou dále zpracována v kapitole 6.1. Hodnoty $h_{prům,i}$ jsou stanoveny s nejistotou ± 0,92 %.

5.4 MĚŘENÍ ZA ÚČELEM ZJIŠTĚNÍ TVORBY HLADINOVÝCH VÍRŮ A JEJICH OVLIVNĚNÍ VZÁJEMNÝM PROVOZEM VTOKŮ

Pozorování, které mělo za úkol zjištění vlivu vzájemného působení vtoků na tvorbu hladinových vírů, probíhalo současně s měřením zmíněném v předcházející kapitole. Společně s observací byla také pořizována fotodokumentace. Vyhodnocení víru je opět přehledně zapsáno do následujících tabulek. Jak již bylo uvedeno v předcházejících částech, jedná se o subjektivní hodnocení, proto bylo prováděno vždy stejnou osobou (diplomantem) kvůli konzistenci výstupů.

Tab. 5.7 Stádia vírů pro 4 výpusti otevřené □□□□

Q_i [m^3·s^{-1}]	$H_{T,i}$ [m]	stádium víru
0,0270	0,411	soustředěný vláknový vír
0,0276	0,444	soustředěný vláknový vír
0,0286	0,477	soustředěný vláknový vír
0,0300	0,525	neúplný nálevkovitý vír
0,0306	0,545	neúplný nálevkovitý vír
0,0310	0,561	bez vírů

Tab. 5.8 Stádia vírů pro 3 výpusti otevřené, 1 uzavřenou □□□■

Q_i [m^3·s^{-1}]	$H_{T,i}$ [m]	stádium víru
0,0197	0,398	neúplný nálevkovitý vír
0,0207	0,443	neúplný nálevkovitý vír
0,0216	0,480	neúplný nálevkovitý vír
0,0222	0,509	neúplný nálevkovitý vír
0,0228	0,537	bez vírů
0,0237	0,578	bez vírů

Tab. 5.9 Stádia vírů pro 2 výpusti otevřené, 2 uzavřené – 1100 □□■■

Q_i [m^3·s^{-1}]	$H_{T,i}$ [m]	stádium víru
0,0131	0,393	neúplný nálevkovitý vír
0,0135	0,417	neúplný nálevkovitý vír
0,0139	0,444	neúplný nálevkovitý vír
0,0149	0,508	neúplný nálevkovitý vír
0,0153	0,534	bez vírů
0,0159	0,577	bez vírů

Tab. 5.10 Stádia vírů pro pro 2 výpusti otevřené, 2 uzavřené – 1010 □■□■

Q_i [m^3·s^{-1}]	$H_{T,i}$ [m]	stádium víru
0,0129	0,378	neúplný nálevkovitý vír
0,0134	0,407	neúplný nálevkovitý vír
0,0138	0,433	neúplný nálevkovitý vír
0,0148	0,494	neúplný nálevkovitý vír
0,0153	0,526	bez vírů
0,0158	0,566	bez vírů

Tab. 5.11 Stádia vírů pro 2 výpusti otevřené, 2 uzavřené – 1001 □■■□

Q_i [m^3·s^{-1}]	$H_{T,i}$ [m]	stádium víru
0,0129	0,370	neúplný nálevkovitý vír
0,0135	0,405	neúplný nálevkovitý vír
0,0138	0,427	neúplný nálevkovitý vír
0,0147	0,484	neúplný nálevkovitý vír
0,0153	0,521	neúplný nálevkovitý vír
0,0159	0,565	bez vírů

Tab. 5.12 Stádia vírů pro 1 výpust otevřenou, 3 uzavřené □■■■

Q_i [m^3·s^{-1}]	$H_{T,i}$ [m]	stádium víru
0,0067	0,397	neúplný nálevkovitý vír
0,0070	0,430	neúplný nálevkovitý vír
0,0074	0,472	neúplný nálevkovitý vír
0,0075	0,495	neúplný nálevkovitý vír
0,0078	0,531	neúplný nálevkovitý vír
0,0081	0,570	neúplný nálevkovitý vír

Fotografie neúplného nálevkovitého víru je na obrázku 5.2, fotografie soustředěného vláknového víru pak na obrázku 5.3 a 5.4. Další zpracování pozorování vírů je uvedeno v kapitole 6.2.

Obr. 5.2 Neúplný nálevkovitý vír

Obr. 5.3 Soustředěný vláknový vír

Obr. 5.4 Soustředěný vláknový vír

6 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ A JEJICH ROZBOR

6.1 ENERGETICKÁ ÚČINNOST

Z hlediska energetického hodnocení provozu vtoků je možno využít dvou přístupů a náhledů na celou problematiku. A to buď posouzení vlivu na průtočnou kapacitu krátké výpusti, kdy je využito hodnocení prostřednictvím výtokového součinitele μ, nebo posouzení vlivu na ztrátu mechanické energie vtokem reprezentovaným součinitelem ξ. V této práci je využito stěžejně prvního postupu, a to především s ohledem na konfiguraci modelu s krátkou spodní výpustí. Druhý naznačený postup je následně využit při porovnání zpracovaných výsledků s modelovými zkouškami provedenými na pracovišti před 28 lety.

Dalším krokem ve stanovení energetické účinnosti je výpočet rychlosti v jedné provozované výpusti dle rovnice (6.1). Ve výpočtu je uvažováno s plochou výstupního profilu jednoho uzávěru S_1 = 0,002588 m^2, jež je spočtena jako obsah obdélníka z rozměrů uzávěru odměřených na modelu díla: a = 0,0690 m a b = 0,0375 m.

$$v_i = \frac{Q_i}{n \cdot S_1}, \tag{6.1}$$

kde Q_i ... i-tý průtok provozovanými výpustmi [m^3·s^{-1}],

n ... počet otevřených výpustí [-],

S_1 ... plocha výstupního profilu jednoho uzávěru [m^2].

Z rychlosti je poté dále možné spočítat pro každý ustálený stav druhou mocninu Froudova kritéria (6.2) a také vypočítat hodnotu výtokového součinitele μ_i (6.3). Hodnoty tlačných výšek jsou pak přepočteny na bezrozměrné – $H_{T,i}/a$. Zde je vztažným průřezem čistá plocha výstupního profilu uzávěru při úplném otevření (bez kontrakce).

$$\mathrm{Fr}_i^2 = \frac{v_i^2}{g \cdot a}, \tag{6.2}$$

kde g ... gravitační zrychlení [m·s^{-2}].

$$\mu_i = \frac{Q_i}{n \cdot S_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{T,i}}}, \tag{6.3}$$

kde Q_i ... i-tý průtok provozovanými výpustmi [m^3·s^{-1}],

n ... počet otevřených výpustí [-],

S_1 ... plocha výstupního profilu jednoho uzávěru [m^2],

g ... gravitační zrychlení [m·s^{-2}],

$H_{T,i}$ ... i-tá tlačná výška [m].

Tyto spočtené hodnoty jsou zaznamenány v tabulkách 6.1 až 6.6 a jejich porovnání je graficky zobrazeno v grafu 6.1. Zvláštní srovnání je pak provedeno pro jednotlivé varianty dvou otevřených uzávěrů, které je v grafu 6.2. Toto srovnání je zaměřeno na zjištění vlivu poměrné osové odlehlosti na účinnost objektu reprezentovanou relativními tlačnými výškami.

Tab. 6.1 Hodnoty hydraulických charakteristik pro 4 výpusti otevřené □□□□

Q_i [m^3·s^{-1}]	$H_{T,i}$ [m]	Fr^2_i [-]	$H_{T,i}/a$ [-]	μ_i [-]
0,0265	0,411	9,699	5,953	0,903
0,0276	0,444	10,506	6,431	0,904
0,0286	0,477	11,281	6,907	0,904
0,0300	0,525	12,396	7,603	0,903
0,0306	0,545	12,897	7,905	0,903
0,0310	0,560	13,253	8,123	0,903

Tab. 6.2 Hodnoty hydraulických charakteristik pro 3 výpusti otevřené, 1 uzavřenou □□□■

Q_i [m^3·s^{-1}]	$H_{T,i}$ [m]	Fr^2_i [-]	$H_{T,i}/a$ [-]	μ_i [-]
0,0197	0,398	9,476	5,771	0,906
0,0207	0,443	10,546	6,416	0,907
0,0216	0,480	11,460	6,962	0,907
0,0222	0,508	12,105	7,369	0,906
0,0228	0,537	12,790	7,778	0,907
0,0237	0,578	13,748	8,378	0,906

Tab. 6.3 Hodnoty hydraulických charakteristik pro 2 výpusti otevřené, 2 uzavřené – 1100 □□■■

Q_i [m^3·s^{-1}]	$H_{T,i}$ [m]	Fr^2_i [-]	$H_{T,i}/a$ [-]	μ_i [-]
0,0131	0,393	9,467	5,691	0,912
0,0135	0,417	10,084	6,050	0,913
0,0139	0,444	10,689	6,436	0,911
0,0149	0,508	12,247	7,360	0,912
0,0153	0,534	12,880	7,739	0,912
0,0159	0,577	13,911	8,361	0,912

Tab. 6.4 Hodnoty hydraulických charakteristik pro 2 výpusti otevřené, 2 uzavřené – 1010 □■□■

Q_i [m^3·s^{-1}]	$H_{T,i}$ [m]	Fr^2_i [-]	$H_{T,i}/a$ [-]	μ_i [-]
0,0129	0,378	9,237	5,475	0,918
0,0134	0,407	9,965	5,891	0,920
0,0138	0,432	10,567	6,268	0,918
0,0148	0,494	12,083	7,162	0,918
0,0153	0,526	12,880	7,620	0,919
0,0158	0,566	13,841	8,206	0,918

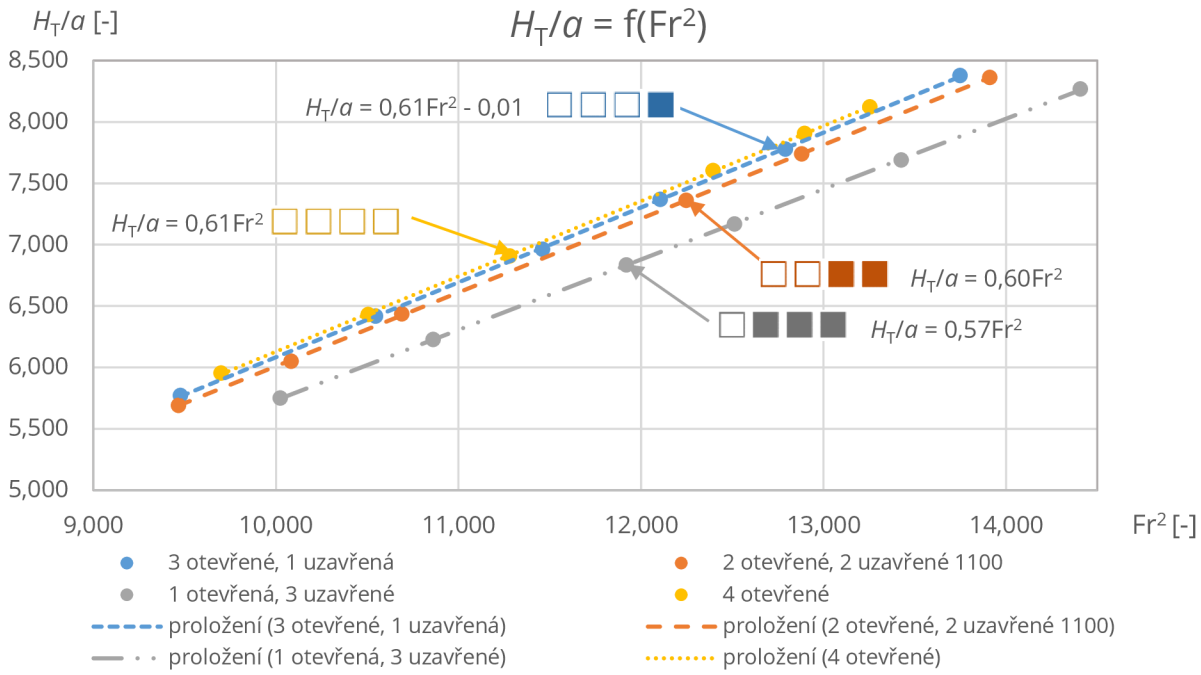
Tab. 6.5 Hodnoty hydraulických charakteristik pro 2 výpusti otevřené, 2 uzavřené – 1001 □■■□

Q_i [m^3·s^{-1}]	$H_{T,i}$ [m]	Fr^2_i [-]	$H_{T,i}/a$ [-]	μ_i [-]
0,0129	0,370	9,152	5,369	0,923
0,0135	0,405	10,024	5,865	0,924
0,0138	0,427	10,567	6,192	0,924
0,0147	0,484	11,953	7,011	0,923
0,0153	0,521	12,914	7,557	0,924
0,0159	0,565	13,946	8,184	0,923

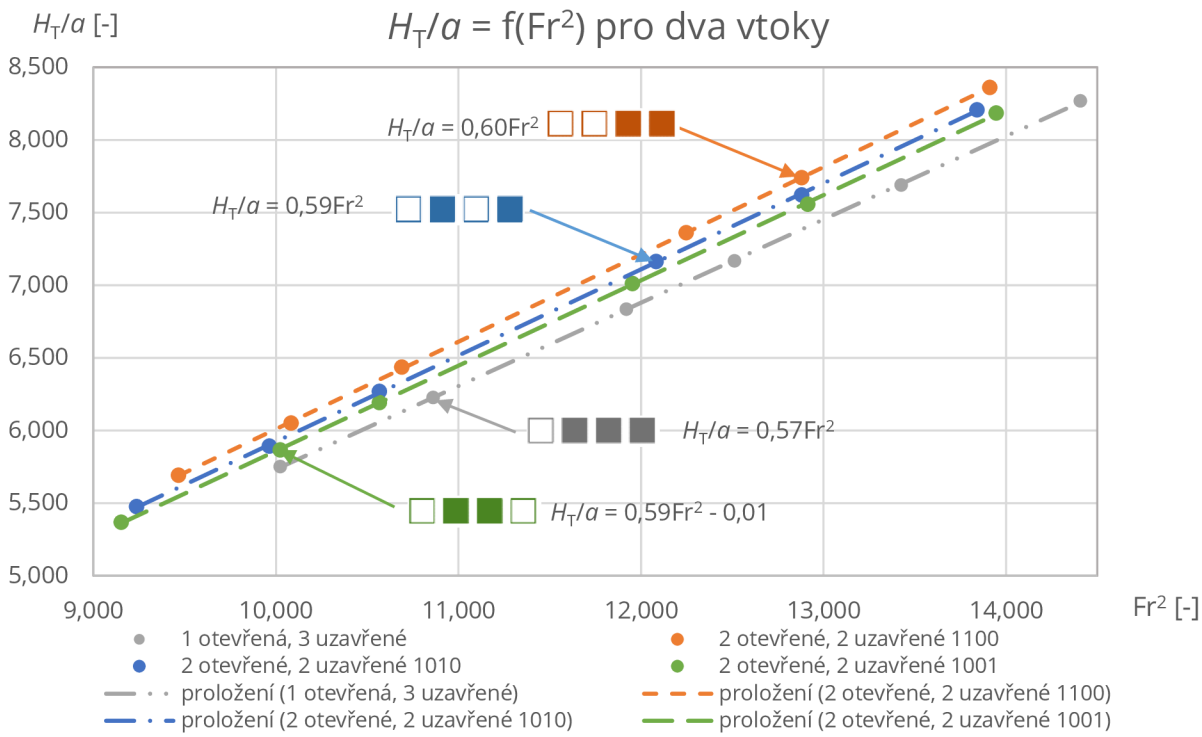
Tab. 6.6 Hodnoty hydraulických charakteristik pro 1 výpust otevřenou, 3 uzavřené □■■■

Q_i [m^3·s^{-1}]	$H_{T,i}$ [m]	Fr^2_i [-]	$H_{T,i}/a$ [-]	μ_i [-]
0,0067	0,397	10,024	5,750	0,934
0,0070	0,430	10,862	6,226	0,934
0,0074	0,472	11,921	6,834	0,934
0,0075	0,495	12,512	7,167	0,934
0,0078	0,531	13,425	7,689	0,934
0,0081	0,570	14,406	8,267	0,933

Při provozu více výpustí je kapacita (odpovídající průtok) vztažen na jednu provozovanou výpust. Výsledky potvrzují provedení zkoušek v pásmu kvadratického odporu. Tlačná výška, potažmo ztrátová výška, je funkcí kvadrátu rychlosti (viz grafy 6.1 a 6.2).



Graf 6.1 Porovnání závislostí při provozu různého počtu vtoků



Graf 6.2 Porovnání závislostí pro dva provozované vtoky

Body jsou proloženy závislostmi uvedenými v rovnicích (6.5) pro 4 otevřené, (6.6) pro 3 otevřené, (6.7) pro 2 otevřené 1100, (6.8) pro 2 otevřené 1010, (6.9) pro dvě otevřené 1001 a (6.10) pro 1 otevřenou. Vztahy jsou uvedeny ve tvaru viz (6.4).

$$\frac{H_\mathrm{T}}{a} = x \cdot \mathrm{Fr}^2 + y, \tag{6.4}$$

kde H_T... tlačná výška [m],

a ... vztažný rozměr výtoku, v tomto případě šířka [m],

Fr ... Froudovo kritérium [-],

x, y ... koeficienty [-].

$$\frac{H_\mathrm{T}}{a} = 0{,}61 \cdot \mathrm{Fr}^2 \tag{6.5}$$

$$\frac{H_\mathrm{T}}{a} = 0{,}61 \cdot \mathrm{Fr}^2 - 0{,}01 \tag{6.6}$$

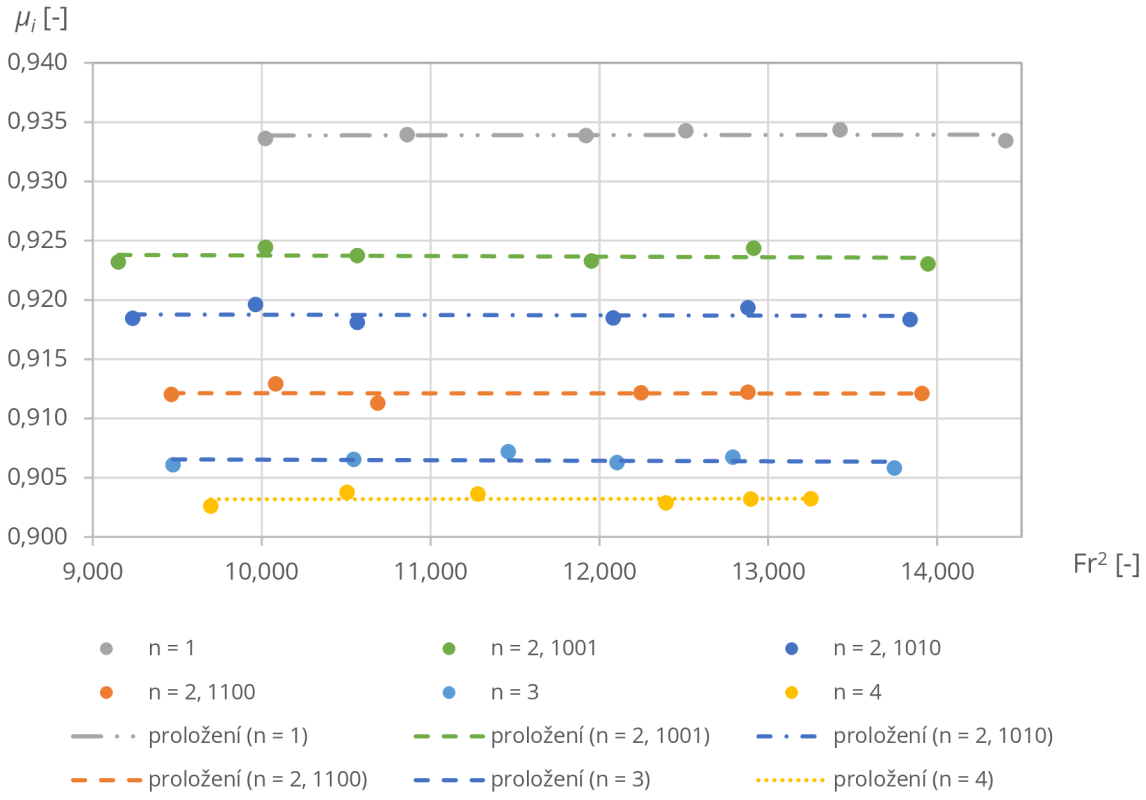
$$\frac{H_\mathrm{T}}{a} = 0{,}60 \cdot \mathrm{Fr}^2 \tag{6.7}$$

$$\frac{H_\mathrm{T}}{a} = 0{,}59 \cdot \mathrm{Fr}^2 \tag{6.8}$$

$$\frac{H_\mathrm{T}}{a} = 0{,}59 \cdot \mathrm{Fr}^2 - 0{,}01 \tag{6.9}$$

$$\frac{H_\mathrm{T}}{a} = 0{,}57 \cdot \mathrm{Fr}^2 \tag{6.10}$$

U všech stavů je zkontrolována podmínka stanovená vztahem (3.22), tedy hodnota Reynoldsova kritéria na modelu $\mathrm{Re_M}$ je větší než $1{,}5 \cdot 10^5$. Hodnoty Reynoldsova kritéria se pohybují od 171733 do 215467. Z tohoto vyplývá, že je podmínka plně splněna a pohybujeme se v pásmu automodelovosti, kde by mělo platit ξ = konst. a μ = konst. Tento předpoklad je zobrazen v grafu 6.3, kdy jsou hodnoty výtokového součinitele μ dány do závislosti na druhé mocnině Froudova kritéria a proloženy přímkami.



Graf 6.3 Závislost výtokového součinitele na druhé mocnině Froudova kritéria

Pro porovnání jsou spočteny poměrné rozdíly výtokových součinitelů dle rovnice (6.11) vztažené k účinnosti jednoho samostatně provozovaného vtoku.

$$\Delta\mu_i = \frac{\mu_i - \mu_1}{\mu_1}, \tag{6.11}$$

kde $\Delta\mu_i$ ... i-tý poměrný rozdíl výtokových součinitelů vztažený k účinnosti jednoho vtoku [-],

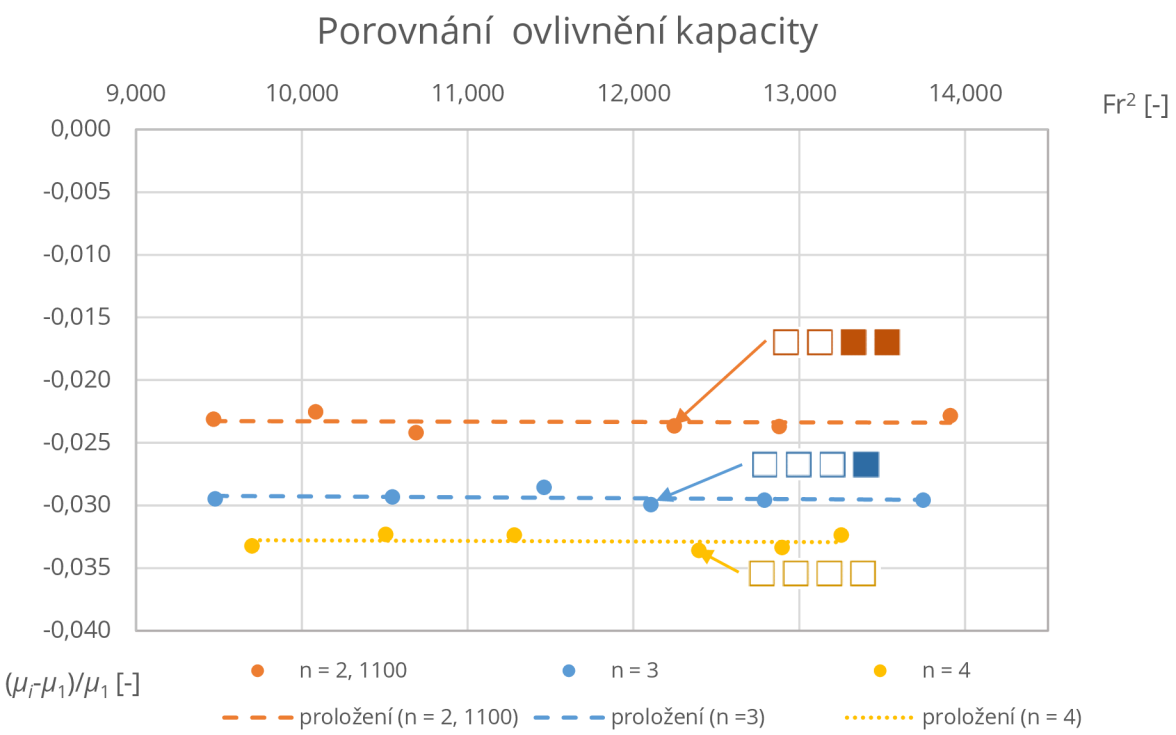
μ_1 ... účinnost jednoho vtoku [-],

μ_i ... i-tá účinnost při provozu více vtoků [-].

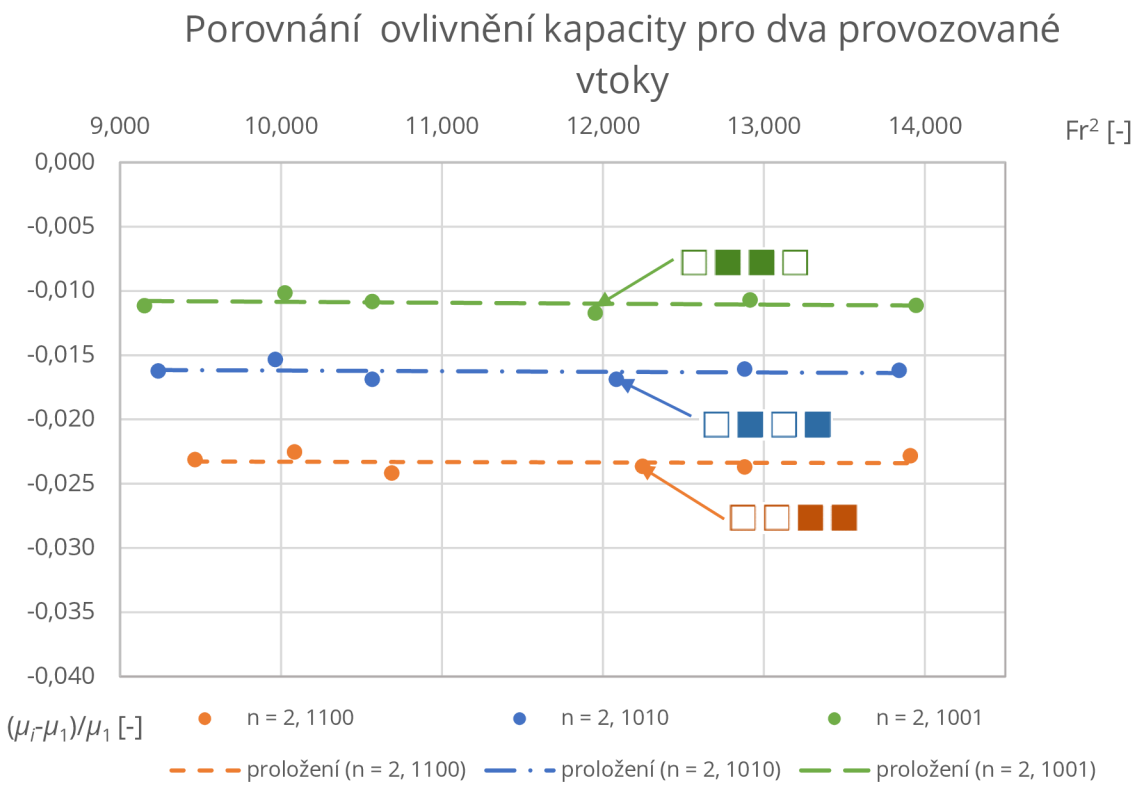
Výsledky jsou poté dány do závislosti na druhé mocnině Froudova kritéria. Hodnoty jsou zobrazeny v tabulce 6.7. Graficky je srovnání pro různou kombinaci provozu v grafu 6.4 a pro dva vtoky následně v grafu 6.5. Hodnoty byly proloženy přímkami.

Tab. 6.7 Hodnoty poměrných rozdílů výtokových součinitelů

Počet vtoků											
n = 1		*n* = 2, 1001		n = 2, 1010		*n* = 2, 1100		*n* = 3		*n* = 4	
Fr^2 [-]	$\frac{\mu_i - \mu_1}{\mu_1}$ [-]	Fr^2 [-]	$\frac{\mu_i - \mu_1}{\mu_1}$ [-]	Fr^2 [-]	$\frac{\mu_i - \mu_1}{\mu_1}$ [-]	Fr^2 [-]	$\frac{\mu_i - \mu_1}{\mu_1}$ [-]	Fr^2 [-]	$\frac{\mu_i - \mu_1}{\mu_1}$ [-]	Fr^2 [-]	$\frac{\mu_i - \mu_1}{\mu_1}$ [-]
10,024	0,000	9,152	-0,011	9,237	-0,016	9,467	-0,023	9,476	-0,029	9,699	-0,033
10,862	0,000	10,024	-0,010	9,965	-0,015	10,084	-0,023	10,546	-0,029	10,506	-0,032
11,921	0,000	10,567	-0,011	10,567	-0,017	10,689	-0,024	11,460	-0,029	11,281	-0,032
12,512	0,000	11,953	-0,012	12,083	-0,017	12,247	-0,024	12,105	-0,030	12,396	-0,034
13,425	0,000	12,914	-0,011	12,880	-0,016	12,880	-0,024	12,790	-0,030	12,897	-0,033
14,406	0,000	13,946	-0,011	13,841	-0,016	13,911	-0,023	13,748	-0,030	13,253	-0,032
průměr			-0,011		-0,016		-0,023		-0,029		-0,033



Graf 6.4 Porovnání poměrných rozdílů výtokových součinitelů při různém počtu otevřených vtoků



Graf 6.5 Porovnání poměrných rozdílů výtokových součinitelů pro dva provozované vtoky

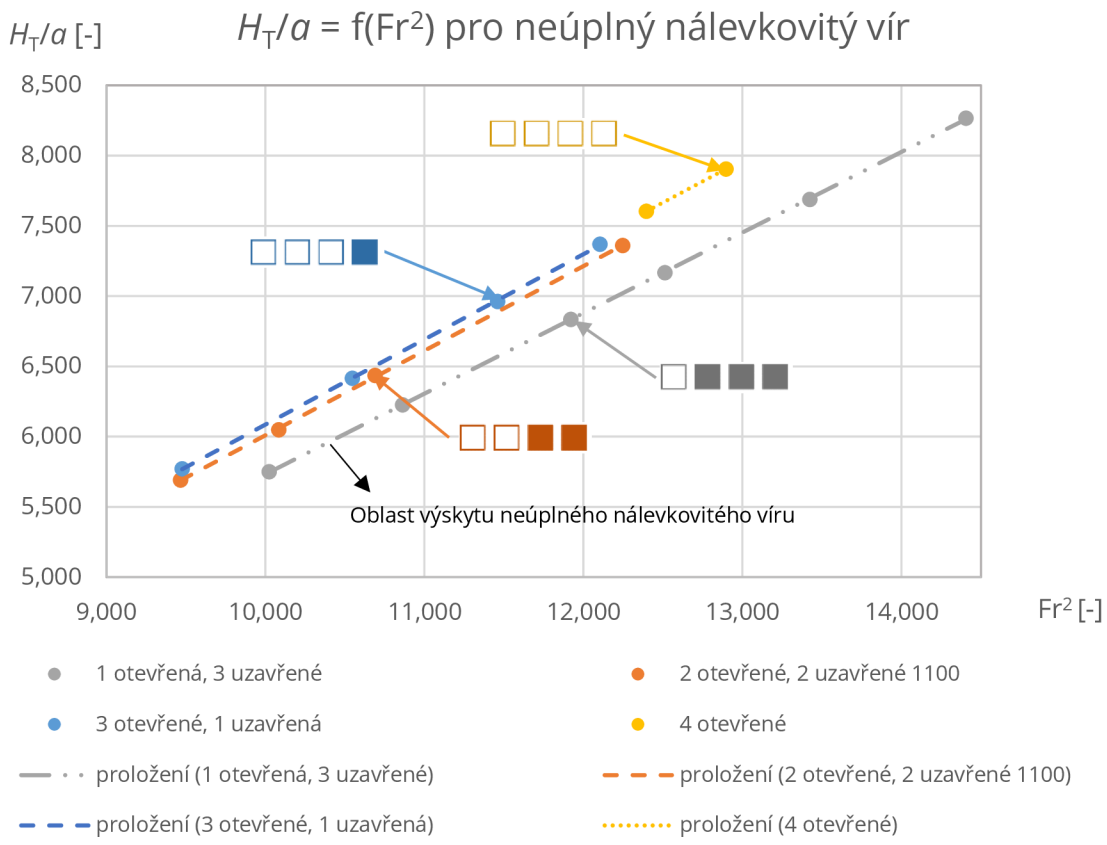
Z prezentovaných hodnot je dále jasně patrné ovlivnění způsobené provozem sousedních vtoků. Ovlivnění reprezentované snížením kapacity se pohybuje od 1,1 % při konfiguraci dvou současně otevřených vtoků 1001 do 3,3 % při současném otevření všech čtyř výpustí. Hodnoty ovlivnění jsou vztaženy k případu jedné otevřené výpusti. Výsledky prokazují vliv poměrné osové odlehlosti na součinitel výtoku. V případě A/a = 9,319 je vliv již zanedbatelný, avšak u osových odlehlostí A/a = 6,348 a A/a = 2,971 je rozeznatelné ovlivnění. Procentuálně vyjádřeno se jedná o 1,6 %, respektive 2,3 % vzhledem k výtoku pouze jednou výpustí. Působení je dále umocněno při otevření tří vtoků, kdy již tato hodnota dosahuje 2,9 %. Z tohoto vyplývá, že oboustranné ovlivnění vtoku zapříčiňuje další zvětšení ztrát. Pokud se podíváme na případ čtyř otevřených vtoků, jedná se o případ největšího vlivu na snížení kapacity, avšak ve srovnání se třemi vtoky jde o nárůst velmi malý a v podstatě již zanedbatelný.

V průběhu zpracovávání diplomové práce byla změněna konfigurace modelu VD Nové Heřminovy, kdy byl na modelu v rámci projektové přípravy a navazujícího aplikovaného výzkumu [14] odstraněn kaskádový skluz a mezi bloky se spodními výpustmi byl vložen blok o šířce 0,429 m (15 m na díle) bez vtoků spodních výpustí. Toto uspořádání zvyšuje hodnoty poměrné odlehlosti dvou výpustí A/a = 12,565 a A/a = 15,536. Měření potvrdila, že při této konfiguraci již však k žádnému ovlivnění nedochází, což je v souladu s výsledky pro poměrnou odlehlost A/a = 9,319. Fotografie konfigurace je zobrazena na obrázku 6.1.

Obr. 6.1 Poproudní pohled na konfiguraci s vloženým blokem a zvětšenou horizontální odlehlostí vtokových objektů

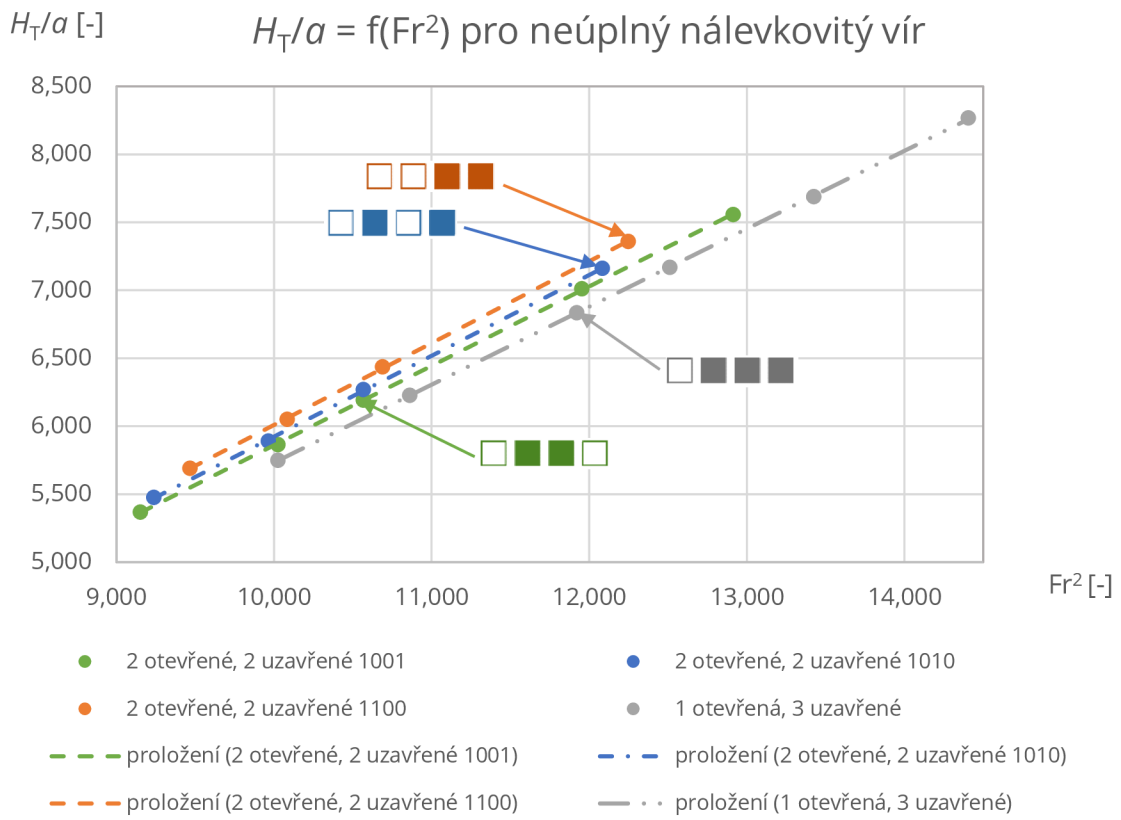
6.2 TVORBA HLADINOVÝCH VÍRŮ

Ani u jedné modelové situace nedošlo k vytvoření úplného vtokového víru a intenzivnímu strhávání vzduchu. Nejvyšší intenzita, která se vyskytla, byla v podobě soustředěného vláknového víru. Jde tedy především o porovnání rozdílů mezi jednotlivými variantami provozu výpustí. Výsledky jsou zpracovány ve stejném smyslu jako v kapitole 6.1. Neúplný nálevkovitý vír, tedy nejčastěji se vyskytující forma, je zpracován do grafů 6.6 (porovnání při různém počtu provozovaných vtoků) a 6.7 (pro 2 otevřené vtoky a jejich různé osové odlehlosti). Jde o závislost bezrozměrné tlačné výšky $H_{T,i}/a$ a druhé mocniny Froudova kritéria spočtené dle dříve uvedené rovnice (6.2). Mezní horní polohy hladin určovaly nastavení průtoků. Horní úroveň hladiny pro sledování vtokových vírů je určena korunou přelivu. Při současném provozu výpustí a přepadu přes přelivy vírové pohyby zanikají, rotační pohyb hladiny je narušen proudem ve směru k přelivným polím.



Graf 6.6 Porovnání mezí vzniku vírů při různém počtu provozovaných vtoků

Vyznačené meze rozdělují oblasti s výskytem neúplného nálevkovitého víru – pod hranicí reprezentované příslušnou závislostí. Nad hranicí oblasti bez výskytu neúplných nálevkovitých vírů.



Graf 6.7 Porovnání mezí vzniku vírů pro dva provozované vtoky

V grafech můžeme pozorovat jisté ovlivnění, avšak pro zhodnocení tohoto vlivu by bylo zapotřebí dalšího výzkumu zaměřeného na porovnání výskytu těchto vírů za různých poměrů H_T/a s ohledem na počet otevřených výpustí.

7 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ S JINÝMI AUTORY

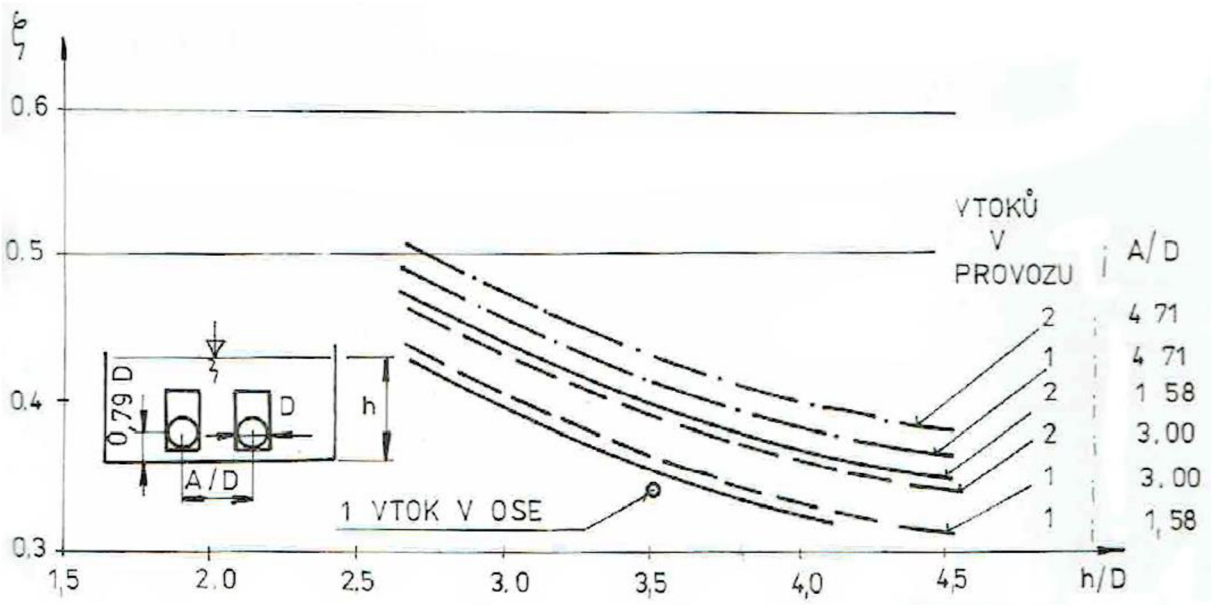
7.1 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ ENERGETICKÉ ÚČINNOSTI

Při porovnávání výsledků energetické účinnosti je důležité brát v potaz okrajové podmínky, za nichž byly hodnoty získány. S výsledky pro dva provozované vtoky uvedenými v této zprávě lze srovnávat závěry z výzkumné zprávy Šulce Modelový výzkum proudění při vzájemném ovlivňování dvou vtoků [1], která je zmíněna již v kapitole 2.3. Jsou zde uvedeny výsledky pro symetrický přítok se shodným průtokem dvěma větvemi pro tři horizontální odlehlosti, a to pro případy vtoků s kruhovým vstupním profilem, se zaústěným přechodovým dílem do čelní stěny, ponořeným zaústěným přechodovým dílem, horizontálně rozvinutým konfuzorovým vtokem s čelní stěnou, horizontálně rozvinutým konfuzorovým vtokem ponořeným, vertikálně rozvinutým konfuzorovým vtokem s čelní stěnou a vertikálně rozvinutým konfuzorovým vtokem ponořeným.

Z geometrických alternativ úprav vtokového objektu je porovnatelný s naším případem vtoku do spodní výpusti vertikálně rozvinutý konfuzor s čelní stěnou, jehož vstupní šířka odpovídá průměru odtokového potrubí. Přechod mezi pravoúhlým průřezem a kruhovým průřezem prizmatického potrubí je řešen přechodovým dílem osové délky 1,5*D*. Tlakový odběr byl instalován v poproudní vzdálenosti 19*D* od výstupu z přechodového dílu. Tato vzdálenost byla experimentálně potvrzena jako odpovídající délka prizmatického úseku potrubí pro realizaci úplné ztráty mechanické energie. Vliv ztráty třením na daném úseku délky 19*D* byl při energetické bilanci součinitele místní ztráty eliminován (ztráta odečtena). Ovlivnění bylo zkoumáno pro poměrné osové odlehlosti A/D = {4,71; 3,00; 1,58}. Potrubí bylo použito o průměru D = 120 mm.

Geometrická odlišnost modelu při experimentu popsaném v [1] v porovnání s případem uvedeným v této diplomové práci spočívá jednak v existenci přechodového dílu (čtverec – kruh), ostrohranných navázáních dílčích úseků v profilech změn průřezu a zejména v délce potrubí, v němž se realizuje víření způsobující ztrátu mechanické energie. V případě spodní výpusti předmětného modelu použitého v diplomové práci tento dlouhý prizmatický úsek odpadá.

Ve zprávě je uveden graf závislosti ztrátového součinitele ξ na poměru hloubky vody v nádrži a průměru potrubí *h/D* pro konfuzorové vtoky s čelní stěnou (graf 7.1).



Graf 7.1 Graf pro vertikálně rozvinuté konfuzorové vtoky s čelní stěnou [1]

V grafech je jasné ovlivnění a zvýšení ztrátového součinitele při provozu obou vtoků. Patrné je také zvýšení vlivu se zmenšující se osovou odlehlostí. V grafu je naznačen způsob určení poměrných osových odlehlostí, který je shodný s naším případem. Vyjádření poměrné hloubky vody v nádrži je patrné ze schématu v grafu 7.1. Pro další srovnání je zde vložena tabulka 7.1, v níž jsou pro relativní hloubku vody v nádrži *h/D* = 4,5 vyjádřeny hodnoty relativních rozdílů ztrátových součinitelů *R* vypočítaných dle rovnice (7.1):

$$R = \frac{\xi_{2\ \mathrm{vtoky}} - \xi_{1\ \mathrm{vtok}}}{\xi_{1\ \mathrm{vtok}}} \cdot 100, \tag{7.1}$$

kde *R* ... relativní rozdíl ztrátových součinitelů [%],

$\xi_{2\ \mathrm{vtoky}}$ ... ztrátový součinitel pro dva provozované vtoky [-],

$\xi_{1\ \mathrm{vtok}}$ ... ztrátový součinitel pro jeden vtok [-].

Tab. 7.1 Tabulka relativních rozdílů ztrátových součinitelů v % [1]

Vtok	*R*		
	A/D = 1,58	*A/D* = 3,00	*A/D* = 4,71
Kruhový	18,0	13,0	5,2
Přechodový díl	12,5	6,3	3,0
Přechodový díl ponořený	15,0	9,1	4,8
Vertikálně rozvinutý konfuzor	**16,0**	**9,7**	**5,4**
Vertikálně rozvinutý ponořený konfuzor	15,0	6,3	5,1
Horizontálně rozvinutý konfuzor	-	12,0	5,0
Horizontálně rozvinutý ponořený konfuzor	-	11,0	4,7

V tabulce jsou zvýrazněny hodnoty pro případ nejvíce podobný podmínkám zkoušeného modelu. Z výše uvedeného je zřejmé, že k ovlivnění dochází i při relativní osové odlehlosti *A*/*D* = 4,71. Ve zmíněné zprávě jsou uvedeny údaje pro různé odlehlosti dvou vtoků, více vtokům se již nevěnuje. Pro připomenutí jsou v tabulce 7.2 uvedena data vycházející z našich měření, zde se však jedná o relativní rozdíly výtokových součinitelů, které jsou dále (v Tab. 7.3) transformovány na porovnatelné součinitele obou případů.

Tab. 7.2 Tabulka poměrných rozdílů výtokových součinitelů v %

Poměrná odlehlost	*A/a* = 2,971	*A/a* = 6,348	*A/a* = 9,319
$\Delta\mu_i$ [%]	2,3	1,6	1,1

Procentuální vyjádření ve zprávě [1] je vztaženo ke ztrátovému součiniteli. Pokud tedy chceme hodnoty porovnat, můžeme výtokové součinitele přepočítat na ztrátové pomocí jednoduchého vztahu (7.2) platného pro úplně otevřený koncový uzávěr. Výsledné hodnoty ztrátových součinitelů jsou v tabulce 7.3.

$$\xi = \frac{1}{\mu^2} - 1, \tag{7.2}$$

kde ξ ... ztrátový součinitel [-],

μ ... výtokový součinitel [-].

Tab. 7.3 Ztrátové součinitele výpočtené podle rovnice (7.2)

Počet vtoků					
n = 1	n = 2, 1001	n = 2, 1010	n = 2, 1100	n = 3	n = 4
μ_i [-]	0,934	0,924	0,919	0,912	0,906
$\xi_{i,\text{prům}}$ [-]	0,147	0,172	0,185	0,202	0,217

Dle výzkumu Šulce je pro jeden provozovaný vtok ztrátový součinitel ξ_1 = 0,34. Pokud tuto hodnotu extrapolujeme dle závislosti v grafu 7.1 na h/D = 6,0, kde by již měla být automodelová oblast a nemělo by docházet ke změně ztrátového součinitele, dostaneme hodnotu ξ_1 = 0,26. Stejně tak extrapolujeme ztrátový součinitel ξ_2 pro dva provozované vtoky v poměrné osové odlehlosti A/D = 3,00 a dostaneme hodnotu ξ_2 = 0,33. Dále musíme pro porovnatelnost obou případů odečíst ztráty v přechodovém dílu, které se v našem případě bez přechodu na kruhový profil nerealizují. Tato ztráta nabývá přibližně ξ = 0,09 [4]. Pak získáme hodnoty ξ_1 = 0,17 a ξ_2 = 0,24. Výsledný relativní rozdíl ztrátových součinitelů vypočtený podle rovnice (7.1) poté činí 41 %. Ke srovnání s tímto závěrem je na našem modelu nejvhodnější varianta relativní odlehlosti A/a = 2,971, kdy dostaneme při výpočtu dle vztahu (7.1) hodnotu relativního rozdílu ztrátových součinitelů R = 37,8 %. To lze považovat za technicky velmi dobrou shodu. Dalším závěrem uvedeným ve zprávě [1] je fakt, že od relativní hloubky h/D = 6,0 by již nemělo docházet ke změně ztrátového součinitele.

K dalšímu porovnání hodnot odpovídajícího součinitele místní ztráty byly převzaty výsledky z modelových zkoušek vtokového objektu PVE Liptovská Mara, samozřejmě při turbínovém provozu, kdy různě upravené tvary objektu vykázaly hodnoty ξ_T = 0,15 až 0,22. Jedná se o objekt, který je nejvíce tvarově i hydraulicky podobný objektu testované spodní výpusti. Při přepočtu hodnot výtokového součinitele μ = 0,934 na součinitele místní ztráty našeho objektu (použitého při diplomové práci) činí pro jednu provozovanou výpust hodnota ξ = 0,147, což je potěšitelná shoda.

7.2 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ TVORBY HLADINOVÝCH VÍRŮ

7.2.1 Porovnání při funkci jednoho vtoku

Vzhledem k tomu, že během zkoušek nedošlo k výskytu úplných vtokových vírů, bude v této kapitole ověřeno, zda by podle jednotlivých autorů uvedených v kapitole 2.5 nedošlo k dosažení kritické hloubky ponoru vtoku a byly by splněny podmínky bezpečnosti. Takto bude porovnán i stav pro bezpečnou hloubku ponoru vtoku dle Gordona uvedený v kapitole 2.6. Vzhledem k odlišným okrajovým podmínkám a způsobům stanovení kritické hloubky ponoru vtoku u různých autorů je následující text rozdělen dle jejich jednotlivých přístupů.

1. Porovnání s výsledky Reddyho a Pickforda

Za vztažný průřez je zvolen výtokový otvor vtokového objektu, což se z výsledků kritických hloubek ponoru vtoku pro profil výtokového otvoru a profil česlí jeví jako vhodnější. Při výpočtu pro profil česlí dostáváme velmi malé hodnoty h_k (přibližně o řád menší než při výpočtu pro profil výtokového otvoru). V kapitole 2.5.1 je uveden vztah (2.9), ze kterého jsou pro variantu jednoho otevřeného vtoku dopočteny hodnoty kritické hloubky ponoru vtoku, ta je pak porovnána s odpovídající hloubkou ponoru vtoku vztaženou k horní hraně výtokového profilu definovanou dle rovnice (7.3):

$$h' = H_{\mathrm{T},i} - \frac{b}{2}, \tag{7.3}$$

kde $H_{\mathrm{T},i}$ ... i-tá hloubka ponoru vtoku vztažená k těžišti [m],

b ... výška výtokového otvoru [m].

Pro daný průtok při jednom provozovaném vtoku jsou hodnoty rychlostí ve vztažném průřezu v_{vzt}, hloubky ponoru vtoku vztažené k horní hraně výtokového profilu h' a kritické hloubky ponoru vtoku h_k uvedeny v následující tabulce.

Tab. 7.4 Porovnání hloubky ponoru vtoku vztažené k horní hraně výtokového profilu s kritickou hloubkou ponoru vtoku dle Reddyho a Pickforda

Q [m^3·s^{-1}]	v_{vzt} [m·s^{-1}]	h' [m]	h_k [m]
0,0067	2,60	0,378	0,218
0,0070	2,71	0,411	0,227
0,0074	2,84	0,453	0,238
0,0075	2,91	0,476	0,244
0,0078	3,01	0,512	0,253
0,0081	3,12	0,552	0,262

Vztažný rozměr výtokového otvoru D byl v rovnici (2.9) uvažován $D = a = 0{,}0690$ m, což odpovídá půdorysnému rozměru výtokového otvoru na modelu. Hodnoty kritických hloubek jsou pro dané průtoky vždy menší než hodnoty odlehlosti hladiny od horního okraje výtokového otvoru. Dle Reddyho a Pickforda tedy nedojde k výskytu úplných vtokových vírů, což odpovídá i našim výsledkům.

2. Porovnání s výsledky Wittmanna a Quicka

U těchto autorů není jasné, jak byly veličiny uvažovány. Toto porovnání je tedy nutné brát s rezervou. V obou případech porovnání (dle Wittmanna i dle Quicka) bude kritická hloubka ponoru h_k vztahována k těžišti výtokového otvoru a porovnávána s hloubkou ponoru vtoku vztaženou k těžišti H_T. Dle Wittmanna je srovnání provedeno v tabulce 7.5, dle Quicka v tabulce 7.6. Výpočet probíhal dle rovnice (2.10), respektive (2.11).

Tab. 7.5 Porovnání hloubky ponoru zjištěné na modelu s kritickou hloubkou ponoru vtoku dle Wittmanna

Q [m^3·s^{-1}]	v_{vzt} [m·s^{-1}]	H_T [m]	h_k [m]
0,0067	2,60	0,397	0,692
0,0070	2,71	0,430	0,749
0,0074	2,84	0,472	0,823
0,0075	2,91	0,495	0,863
0,0078	3,01	0,531	0,926
0,0081	3,12	0,570	0,994

Tab. 7.6 Porovnání hloubky ponoru zjištěné na modelu s kritickou hloubkou ponoru vtoku dle Quicka

Q [m^3·s^{-1}]	v_{vzt} [m·s^{-1}]	H_T [m]	h_k [m]
0,0067	2,60	0,397	0,616
0,0070	2,71	0,430	0,667
0,0074	2,84	0,472	0,732
0,0075	2,91	0,495	0,768
0,0078	3,01	0,531	0,824
0,0081	3,12	0,570	0,885

V případě kritických hloubek dle Quicka a Witmanna došlo k podobným závěrům. Dle těchto autorů by mělo docházet ke vzniku úplných vtokových vírů. Toto srovnání se jeví vzhledem k tomu, že na modelu k výskytu úplných vtokových vírů nedošlo, jako nereálné a vztahy pro tuto konfiguraci až příliš přísné, možná i nevhodné.

3. Porovnání s výsledky Rohana

V případě rovnice dle Rohana (2.12) je jasně dána kritická hloubka ponoru vtoku h_k, která je v našem porovnání vztažena k těžišti výtokového otvoru. Porovnání je provedeno ve stejném smyslu jako v předcházejícím do tabulky 7.7.

Tab. 7.7 Porovnání hloubky ponoru zjištěné na modelu s kritickou hloubkou ponoru vtoku dle Rohana

Q [m^3·s^{-1}]	v_{vzt} [m·s^{-1}]	H_T [m]	h_k [m]
0,0067	2,60	0,397	0,167
0,0070	2,71	0,430	0,169
0,0074	2,84	0,472	0,171
0,0075	2,91	0,495	0,173
0,0078	3,01	0,531	0,175
0,0081	3,12	0,570	0,177

Opět dochází ke shodě, kdy v našem případě je hodnota ponoru vtoku vztažená k těžišti vyšší než kritická hloubka ponoru vtoku. Nemělo by tedy dojít ke vzniku úplných vtokových vírů, což je v souladu se získanými závěry.

4. Porovnání s výsledky Knausse

Knauss ve svém odvození využil jiných předpokladů než předcházející autoři. V kapitole 2.5.5 je uvedena rovnice (2.14) pro výpočet „výtokového součinitele“ C, který má být pro zamezení vzniku vírů ve všech profilech menší jak 0,5. Pro porovnání byly zvoleny dva profily. Vstupní průřez, kde plocha S = 0,038 m^2 (hodnoty označeny indexem 1) a průřez s plochou S = 0,008 m^2 (hodnoty značeny indexem 2). Pro porovnání je potřebné znát polohu těžiště tohoto průřezu h_T, která je spočtena v tabulce 7.8. V našich výsledcích, kdy ke vzniku úplných vtokových vírů nedošlo, se tato hodnota pohybuje u prvního profilu od 0,070 do 0,073, ve druhém pak od 0,294 do 0,298. Výsledky jsou v těchto profilech pod mezí danou Knaussovou hodnotou 0,5 a dochází tak ke shodě.

Tab. 7.8 Výpočet odlehlosti těžiště vstupního průřezu od hladiny h_T a „výtokového součinitele“ C dle Knausse

Q [m^3·s^{-1}]	h_{T1} [m]	C_1 [-]	h_{T2} [m]	C_2 [-]
0,0067	0,309	0,073	0,363	0,298
0,0070	0,341	0,072	0,395	0,297
0,0074	0,383	0,071	0,437	0,296
0,0075	0,406	0,071	0,460	0,295
0,0078	0,442	0,070	0,496	0,295
0,0081	0,482	0,070	0,536	0,294

5. Porovnání s výsledky Jaina

Taktéž při porovnání s využitím vztahu dle Jaina dochází ke shodnosti, tedy závěru, že by k výskytu úplných vtokových vírů nemělo dojít. Srovnání dle jeho vztahu (2.15) je provedeno v tabulce 7.9. Vzhledem k tomu, že vztažný průřez je definován pouze textovým popisem, je toto srovnání pro ověření provedeno pro dva profily. První porovnání je vypočteno pro vztažný průřez shodný s průřezem výtokového otvoru, druhé pak pro vstupní profil výtokového objektu se šířkou A = 0,176 m, výškou B = 0,214 m a plochou S = 0,038 m^2. Hloubka ponoru vtoku H_T je vždy vztažena k těžišti příslušného průřezu.

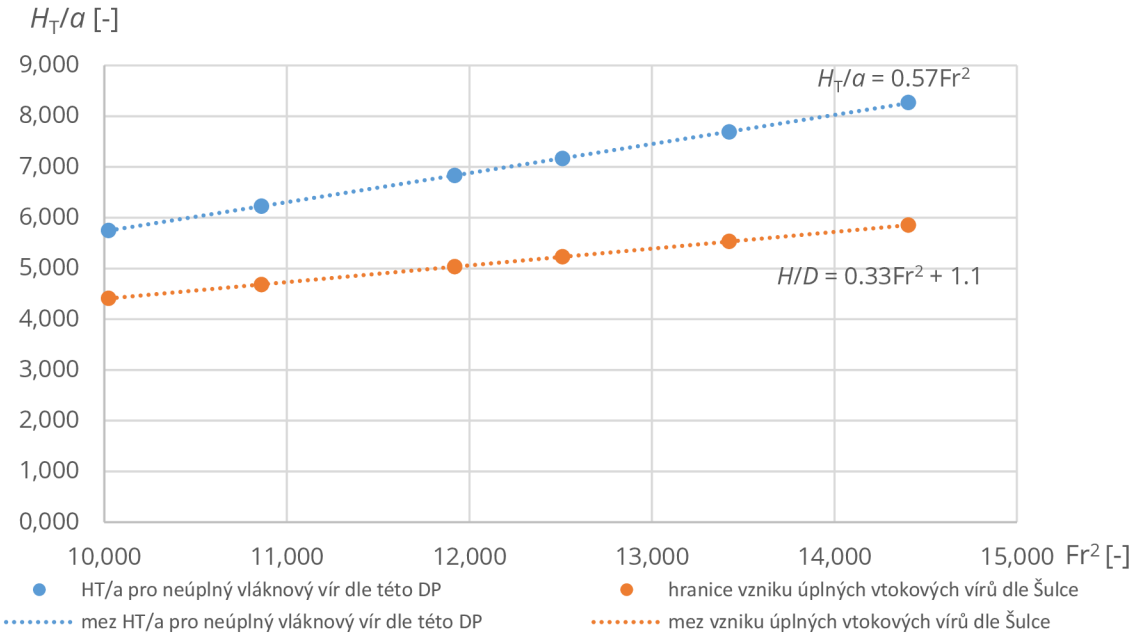
Tab. 7.9 Porovnání poměrné hloubky ponoru s poměrnou kritickou hloubkou ponoru vtoku dle Jaina

Q [m^3·s^{-1}]	v_{vzt} [m·s^{-1}]	H_T/a [-]	h_k/D [-]	v_{vzt} [m·s^{-1}]	H_T/A [-]	h_k/D [-]
0,0067	2,60	5,750	0,836	0,18	1,754	0,173
0,0070	2,71	6,226	0,853	0,19	1,940	0,177
0,0074	2,84	6,834	0,873	0,20	2,179	0,181
0,0075	2,91	7,167	0,884	0,20	2,309	0,183
0,0078	3,01	7,689	0,900	0,21	2,514	0,187
0,0081	3,12	8,267	0,916	0,21	2,740	0,190

První část tabulky je vztažena k výtokovému otvoru, druhá pak ke vstupnímu profilu výtokového objektu. Z výše uvedených hodnot vyplývá, že Jainův vztah je při této konfiguraci oproti ostatním velmi mírný.

6. Porovnání s výsledky Šulce

Dobré shody je dosaženo s výsledky dle Šulce. Ani v jednom případě by nemělo dojít dle Šulce k vytvoření úplných vtokových vírů, což se shoduje s předkládanými výsledky. Rovněž vzhledem k bezrozměrnému vyjádření, stejné definici H a H_T a aplikaci na konfuzorové vtoky je využití tohoto vztahu vhodné. Celkový rozsah hodnot a jejich porovnání jsou uvedeny v tabulce 7.10. Protože jde o vzájemně nejlépe porovnatelné závislosti, je toto srovnání doplněno grafem 7.2, z nějž je patrný i jistý souhlas v průběhu prokládaných funkcí (s ohledem na posunutí a jiné intenzity vírů).



Graf 7.2 Grafické porovnání relativních odlehlostí těžiště výtokového profilu od hladiny s výsledky dle Šulce

Tab. 7.10 Porovnání poměrné hloubky ponoru vtoku vztažené k těžišti s poměrnou kritickou hloubkou ponoru vtoku dle Šulce

Q [m³·s⁻¹]	v_{vzt} [m·s⁻¹]	H_T/a [-]	H/D [-]
0,0067	2,60	5,750	4,408
0,0070	2,71	6,226	4,684
0,0074	2,84	6,834	5,034
0,0075	2,91	7,167	5,229
0,0078	3,01	7,689	5,530
0,0081	3,12	8,267	5,854

7. Porovnání s výsledky Gordona

Při využití vztahu dle Gordona (2.14) je nutné brát v potaz rozdílný způsob stanovení této hloubky. Gordon stanovoval bezpečnou hloubku na skutečných vodních dílech a není tedy zatížena modelovým zkreslením. Jde ale o jinou definici než u kritické hloubky ponoru vtoku, zahrnuje rezervu. V našem případě však byly hloubky ponoru vtoku vztažené k horní hraně výtokového profilu vypočtené dle (7.3) i tak vyšší než Gordonem dané hodnoty pro symetrický přítok dle tabulky 7.11.

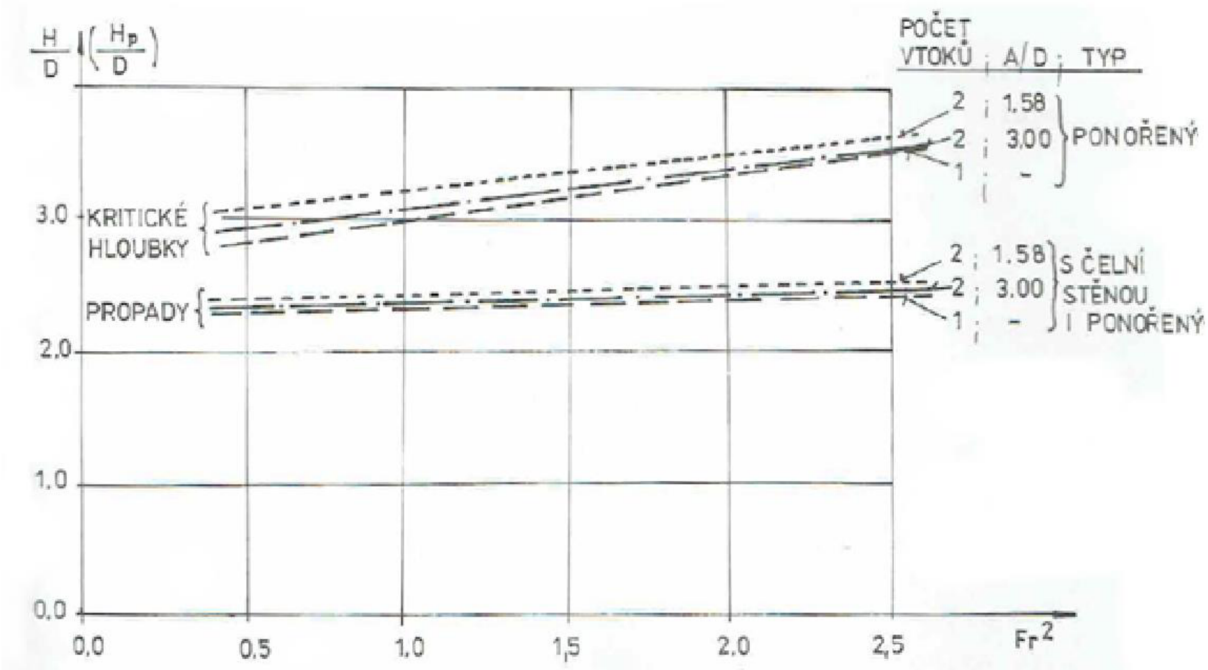
Tab. 7.11 Porovnání hloubky ponoru vtoku vztažené k horní hraně výtokového profilu s bezpečnou hloubkou ponoru vtoku dle Gordona

Q [m^3·s^{-1}]	v_{vzt} [m·s^{-1}]	h' [m]	h_b [m]
0,0067	2,60	0,378	0,369
0,0070	2,71	0,411	0,385
0,0074	2,84	0,453	0,403
0,0075	2,91	0,476	0,413
0,0078	3,01	0,512	0,428
0,0081	3,12	0,552	0,443

Většinou vztahů (mimo vztahů Witmanna a Quicka) bylo potvrzeno, že by ke vzniku úplných vtokových vírů pro případ jednoho provozovaného vtoku nemělo dojít, avšak z předcházejících sedmi bodů je patrné, že každý vztah dává jiné výsledky. To je dáno jednak jinými okrajovými podmínkami, za nichž byly rovnice odvozeny a také jinými způsoby definice problémů vírů. Z výše uvedených porovnání vychází pro daný případ jako nejvhodnější vztahy Reddyho a Pickforda, Šulce a Gordona.

7.2.2 Porovnání ovlivnění provozem dvou sousedních vtoků

Jak je uvedeno v kapitole 2.7, problematikou ovlivnění vírových struktur vzájemným provozem sousedních vtoků se již zabýval Šulc [1]. K porovnání je z uvedených modelových alternativ nejvhodnější konfuzorový vtok s vertikálním rozvinutím. Dle zprávy je v tomto případě ovlivnění sousedními provozovanými vtoky menší než v případě kruhového potrubí a zaústěného přechodového dílu, což autor vysvětluje menšími rychlostmi před vtokem a jejich plynulým nárůstem. Vliv sousedního vtoku je dle této zprávy neznatelný při osové odlehlosti A/D = 4,71. Závislosti kritických hloubek ponoru vtoku a propadů pro ponořené vtoky a vtoky s čelní stěnou jsou uvedeny v grafu 7.3, v obou případech jde o vtoky s vertikálním rozvinutím vstupního konfuzoru.



Graf 7.3 Graf závislosti kritických hloubek ponoru vtoku a propadů na kvadrátu Froudova kritéria [1] u vtoků s vertikálním rozvinutím vstupního konfuzoru

Z výsledků zobrazených v grafu 6.6 a z jejich srovnání s grafem 7.3 lze pozorovat stejný průběh a identické závěry. Provoz sousedních vtoků zvyšuje hodnotu kritické hloubky. Toto ovlivnění je patrné zejména u relativní osové odlehlosti A/a = 2,971. Při vyšším počtu provozovaných vtoků než dva dále dochází k zesilování vlivu, rozdíl je již však zanedbatelný oproti stavu při otevření dvou vtoků. Přímé porovnání však není možné vzhledem k tomu, že při dané konfiguraci modelu VD Nové Heřminovy nedošlo k vytvoření úplných vtokových vírů.

8 DOPORUČENÍ

Z hlediska porovnání energetické účinnosti reprezentované hodnotou výtokového součinitele je doporučitelná poměrná odlehlost vtoků pro zamezení ovlivnění účinnosti vtokového objektu krátké spodní výpusti A/a = 9,319. Od této poměrné vzdálenosti již podle závěrů této diplomové práce nedochází k výraznému snížení kapacity, procentuálně vyjádřeno se jedná o 1,1 %. Při zmenšování poměrné osové vzdálenosti se ovlivnění zvýší na 1,6 % při A/a = 6,348, respektive na 2,3 % při A/a = 2,971. Z hlediska ovlivnění více sousedními vtoky dochází při třech a čtyřech provozovaných vtocích k dalšímu ovlivnění v porovnání se stavem dvou otevřených vtoků. Při třech otevřených výpustech je velikost ovlivnění 2,9 %, při čtyřech vtocích je již nárůst méně patrný a v procentuálním vyjádření se jedná o 3,3 %. Tyto hodnoty ovlivnění jsou vztahovány k výtokovému součiniteli μ pro jednu provozovanou výpust. Výsledky jsou vztaženy na zvolenou modelovou konfiguraci modelu VD Nové Heřminovy, kdy se hodnoty Fr^2 vztažené k profilu zcela otevřeného koncového segmentového uzávěru pohybují od 9,152 do 14,406. Takto vysokých hodnot se na běžných hydroenergetických přivaděčích a dlouhých spodních výpustech dosahuje v praxi výjimečně. Pro nižší hodnoty Fr^2 by bylo vhodné do budoucna dále tuto problematiku prozkoumat.

Při porovnání energetické účinnosti reprezentované hodnotou ztrátového součinitele došlo při variantě A/a = 2,971 ke snížení o 37,8 %, což je v souladu se závěrem [1], který uvádí snížení o 41 %.

Jak je naznačeno v kapitole 7.2.1, je nutné při řešení tvorby vtokových vírů brát v úvahu geometrické uspořádání vtoku a okrajové podmínky, za kterých byly jednotlivé vztahy odvozeny. Hodnoty kritických hloubek ponoru vtoku a bezpečných hloubek ponoru vtoku dle různých autorů se navzájem od sebe velmi liší. Proto je nutné brát na tyto okolnosti zřetel.

Při vzájemném provozu více vtoků dochází ke zvyšování kritické hloubky ponoru vtoku. Tento faktor musí být zohledněn u všech vtokových objektů, u kterých se uvažuje se současnou funkcí sousedních vtoků.

9 ZÁVĚR

Vtokové objekty vodních elektráren jsou často tvořeny více samostatnými vtoky. Při jejich návrhu je kladen důraz na co nejmenší rozměry, které znamenají nemalé finanční úspory. Při zmenšování rozměrů je však nutné nejen uvažovat s možností vzniku úplných vtokových vírů při snížení hladiny pod úroveň kritické hloubky ponoru vtoku (nebo bezpečné hloubky ponoru vtoku, dle příslušné definice) a s tímto souvisejícími nebezpečími (vznik tlakových pulzací, snížení účinnosti turbín apod.), ale i s ovlivněním při vzájemném provozu sousedních vtoků z pohledu vtokových vírů. V ten moment dochází k dalšímu snížení kritické hloubky ponoru vtoku. Současný provoz dvou či více vtoků má za následek také snížení energetické účinnosti, které by mělo být při návrhu bezesporu uvažováno.

Problematika vlivu provozu dvou sousedních vtoků již byla v minulosti probrána. Jejich kompletní výsledky a závěry jsou obsaženy ve zprávě [1]. Při využití tří a více vtoků však dochází k dalšímu ovlivnění, které nebylo dosud zcela vyřešeno. V práci byl kvantitativně zhodnocen vliv provozu dvou až čtyř vtoků na jejich energetickou účinnost a na tvorbu úplných hladinových vírů. U dvou vtoků byl dále zkoumán vliv poměrné odlehlosti vtoků na výše uvedené. Při větším počtu provozovaných vtoků dochází k dalšímu snížení energetické účinnosti.

Veškeré výsledky obsažené v této práci jsou vztaženy na modelovou konfiguraci uvedenou kapitole 4 a rozsah druhé mocniny Froudova kritéria $Fr^2 \in$ <9,152; 14,406> vztaženého k výtokovému profilu spodní výpusti.

10 POUŽITÁ LITERATURA

[1] ŠULC, J.: Modelový výzkum proudění při vzájemném ovlivňování dvou vtoků. Výzkumná zpráva. Vysoké učení technické v Brně, 1989.

[2] JANDORA, J.; ŠULC J.: Hydraulika: modul 01. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007.

[3] ŠULC, J.: Modelový výzkum strhávání vzduchu do přivaděčů hydroenergetických děl. Výzkumná zpráva. Vysoké učení technické v Brně, 1987.

[4] JAROŠ, F.: Směrnice pro výpočet ztrát v přivaděčích a výpustech vodních elektráren. Vysoké učení technické v Brně, 1989.

[5] SKALIČKA, J.: Výzkum proudění s vtokovými víry na zmenšených fyzikálních modelech. Vodní hospodářství A 33, 1983.

[6] ŠULC, J.: Poznatky z modelového výzkumu vtokových vírů u vtoků vodních elektráren. Vodní hospodářství. 1990, 3/90, 102-107.

[7] ŠULC, J.: Hydraulický modelový výzkum energetické účinnosti vybraných tvarů vtoků hydrotechnických děl. Výzkumná zpráva. Vysoké učení technické v Brně, 1988.

[8] ČÁBELKA, J.; GABRIEL P.: Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice. Vyd. 1. Praha: Academia, 1987.

[9] KOLÁŘ, V.; PATOČKA, C.: BÉM, J. Hydraulika. Praha: SNTL, 1983.

[10] Hrubá stavba MVE Štětí je hotová. StavbaWEB [online]. Praha: Business Media CZ, 2013 [cit. 2017-11-30]. Dostupné z: https://stavbaweb.dumabyt.cz/hruba-stavba-mve-stti-je-hotova-10251/clanek.html

[11] To se jen tak nevidí: Dlouhé Stráně bez vody. Česká televize: Regiony [online]. Praha: Česká televize, 2012 [cit. 2017-11-30]. Dostupné z: http://www.ceskatelevize.cz/ct24/regiony/1163802-se-jen-tak-nevidi-dlouhe-strane-bez-vody

[12] ŠULC, J.: Vybrané statě z hydrotechniky CR003 (materiál z přednášky). ÚVS FAST VUT v Brně, 2016.

[13] ŠULC, J.: Hydraulický modelový výzkum bezpečnostního objektu VD Nové Heřminovy. Výzkumná zpráva, LVV ÚVS FAST VUT v Brně, 2017.

[14] ŠULC, J.: Hydraulický modelový výzkum bezpečnostního objektu VD Nové Heřminovy – 3. etapa (přeliv bez kaskády). Výzkumná zpráva, LVV ÚVS FAST VUT v Brně, 2017.

[15] GORDON, J.: Vortices at intakes. Water Power, 22, 1970, No. 4, str. 137 ÷ 138.

[16] GULLIVER, J. S. – RINDELS; A. J. – LINDBLOM, K. C.: Designing intakes to avoid free – surface vortices. Water Power and Dam Construction, September 1986.

[17] ŠULC, J.: Experimentální výzkum kritické hloubky ponoru vtoku, Sborník referátů X. vědecké konference FAST – VUT v Brně, sekce 16, 1989, str. 39 ÷ 44.

[18] BOOR, B.; KUNŠTÁTSKÝ, J.; PATOČKA, C.: Hydraulika pro vodohospodářské stavby. SNTL Praha, 1968.

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1 Hodnoty poměrných odlehlostí vztažené k půdorysné šířce uzávěru *a* 35

Tab. 5.1 Průměrné hodnoty pro 4 výpusti otevřené □□□□ 43

Tab. 5.2 Průměrné hodnoty pro 3 výpusti otevřené, 1 uzavřenou □□□■ 43

Tab. 5.3 Průměrné hodnoty pro 2 výpusti otevřené, 2 uzavřené – 1100 □□■■ 43

Tab. 5.4 Průměrné hodnoty pro 2 výpusti otevřené, 2 uzavřené – 1010 □■□■ 44

Tab. 5.5 Průměrné hodnoty pro 2 výpusti otevřené, 2 uzavřené – 1001 □■■□ 44

Tab. 5.6 Průměrné hodnoty pro 1 výpust otevřenou, 3 uzavřené □■■■ 44

Tab. 5.7 Stádia vírů pro 4 výpusti otevřené □□□□ 45

Tab. 5.8 Stádia vírů pro 3 výpusti otevřené, 1 uzavřenou □□□■ 45

Tab. 5.9 Stádia vírů pro 2 výpusti otevřené, 2 uzavřené – 1100 □□■■ 45

Tab. 5.10 Stádia vírů pro pro 2 výpusti otevřené, 2 uzavřené – 1010 □■□■ 46

Tab. 5.11 Stádia vírů pro 2 výpusti otevřené, 2 uzavřené – 1001 □■■□ 46

Tab. 5.12 Stádia vírů pro 1 výpust otevřenou, 3 uzavřené □■■■ 46

Tab. 6.1 Hodnoty hydraulických charakteristik pro 4 výpusti otevřené □□□□ 50

Tab. 6.2 Hodnoty hydraulických charakteristik pro 3 výpusti otevřené, 1 uzavřenou □□□■ 50

Tab. 6.3 Hodnoty hydraulických charakteristik pro 2 výpusti otevřené, 2 uzavřené – 1100 □□■■ 51

Tab. 6.4 Hodnoty hydraulických charakteristik pro 2 výpusti otevřené, 2 uzavřené – 1010 □■□■ 51

Tab. 6.5 Hodnoty hydraulických charakteristik pro 2 výpusti otevřené, 2 uzavřené – 1001 □■■□ 51

Tab. 6.6 Hodnoty hydraulických charakteristik pro 1 výpust otevřenou, 3 uzavřené ❑■■■ 51

Tab. 6.7 Hodnoty poměrných rozdílů výtokových součinitelů 55

Tab. 7.1 Tabulka relativních rozdílů ztrátových součinitelů v % [1] 62

Tab. 7.2 Tabulka poměrných rozdílů výtokových součinitelů v % 62

Tab. 7.3 Ztrátové součinitele výpočtené podle rovnice (7.2) 63

Tab. 7.4 Porovnání hloubky ponoru vtoku vztažené k horní hraně výtokového profilu s kritickou hloubkou ponoru vtoku dle Reddyho a Pickforda 65

Tab. 7.5 Porovnání hloubky ponoru zjištěné na modelu s kritickou hloubkou ponoru vtoku dle Wittmanna 65

Tab. 7.6 Porovnání hloubky ponoru zjištěné na modelu s kritickou hloubkou ponoru vtoku dle Quicka 66

Tab. 7.7 Porovnání hloubky ponoru zjištěné na modelu s kritickou hloubkou ponoru vtoku dle Rohana 66

Tab. 7.8 Výpočet odlehlosti těžiště vstupního průřezu od hladiny h_T a „výtokového součinitele“ *C* dle Knausse 67

Tab. 7.9 Porovnání poměrné hloubky ponoru s poměrnou kritickou hloubkou ponoru vtoku dle Jaina 68

Tab. 7.10 Porovnání poměrné hloubky ponoru vtoku vztažené k těžišti s poměrnou kritickou hloubkou ponoru vtoku dle Šulce 69

Tab. 7.11 Porovnání hloubky ponoru vtoku vztažené k horní hraně výtokového profilu s bezpečnou hloubkou ponoru vtoku dle Gordona 70

12 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Fotografie vtokového objektu MVE Štětí [10] 5

Obr. 2.2 Fotografie vtokového objektu VE Dlouhé Stráně [11] 6

Obr. 2.3 Schéma různých umístění vtoku (řezy) 6

Obr. 2.4 Schéma bočního (vlevo) a čelního (vpravo) nátoku (řezy) 7

Obr. 2.5 Příklad symetrického přítoku (půdorys) 7

Obr. 2.6 Příklad nesymetrického přítoku (půdorys) 8

Obr. 2.7 Schéma zjednodušeného případu vtokového objektu s výtokem do tlakového přivaděče 10

Obr. 2.8 Schéma zjednodušeného případu vtokového objektu s výtokem do volného prostředí (nezatopeným) 11

Obr. 2.9 Úplný hladinový vtokový vír na VD Pařížov [12] 13

Obr. 2.10 Detail úplného vtokového víru na VD Pařížov [12] 13

Obr. 2.11 Vtahování plovoucích trámků a větví vírem na VD Pařížov [12] 14

Obr. 2.12 Hladinový vír 15

Obr. 2.13 Vírový důlek 16

Obr. 2.14 Neúplný nálevkovitý vír 16

Obr. 2.15 Soustředěný vláknový vír 17

Obr. 2.16 Rozptýlený vláknový vír 17

Obr. 2.17 Úplný vír 18

Obr. 2.18 Vztažný průřez dle Reddyho a Pickforda 19

Obr. 2.19 Vztažný průřez dle Knausse 21

Obr. 2.20 Vztažný průřez dle Šulce 23

Obr. 2.21 Vztažný průřez dle Gordona 24

Obr. 4.1 Řez spodní výpustí [13] 31

Obr. 4.2 Půdorys spodních výpustí [13] 31

Obr. 4.3 Protiproudní pohled na bloky hráze 32

Obr. 4.4 Protiproudní pohled na komory uzávěrů spodních výpustí 33

Obr. 4.5 Návodní strana vtokových objektů 33

Obr. 4.6 Výtok spodními výpustmi 34

Obr. 4.7 Řez modelem hráze, kótováno v metrech [13] 34

Obr. 4.8 Poproudní schematický pohled na čelní profil výpustí, kótováno v metrech 35

Obr. 4.9 Uklidňovací komora na začátku žlabu 37

Obr. 4.10 Prostředí počítačového programu 37

Obr. 4.11 Fotografie ovládací jednotky 38

Obr. 4.12 Fotografie vyhodnocovací jednotky 38

Obr. 4.13 Digitální hrotové měřidlo k odečtu úrovně hladiny 39

Obr. 4.14 Umístění modelu v měrném žlabu [13] 39

Obr. 4.15 Protiproudní pohled na konfiguraci s vloženým blokem a zvětšenou horizontální odlehlostí vtokových objektů 40

Obr. 4.16 Umístění modelu bezpečnostního objektu s vloženým blokem a zvětšenou horizontální odlehlostí vtoků ve žlabu [14] 40

Obr. 5.1 Schéma kombinací otevření výpustí – plně značené jsou uzavřené, bez výplně jsou otevřené 42

Obr. 5.2 Neúplný nálevkovitý vír 47

Obr. 5.3 Soustředěný vláknový vír 47

Obr. 5.4 Soustředěný vláknový vír 48

Obr. 6.1 Poproudní pohled na konfiguraci s vloženým blokem a zvětšenou horizontální odlehlostí vtokových objektů 57

13 SEZNAM GRAFŮ

Graf 6.1 Porovnání závislostí při provozu různého počtu vtoků 52

Graf 6.2 Porovnání závislostí pro dva provozované vtoky 52

Graf 6.3 Závislost výtokového součinitele na druhé mocnině Froudova kritéria 54

Graf 6.4 Porovnání poměrných rozdílů výtokových součinitelů při různém počtu otevřených vtoků..... 55

Graf 6.5 Porovnání poměrných rozdílů výtokových součinitelů pro dva provozované vtoky 56

Graf 6.6 Porovnání mezí vzniku vírů při různém počtu provozovaných vtoků 58

Graf 6.7 Porovnání mezí vzniku vírů pro dva provozované vtoky..... 59

Graf 7.1 Graf pro vertikálně rozvinuté konfuzorové vtoky s čelní stěnou [1]..... 61

Graf 7.2 Grafické porovnání relativních odlehlostí těžiště výtokového profilu od hladiny s výsledky dle Šulce 69

Graf 7.3 Graf závislosti kritických hloubek ponoru vtoku a propadů na kvadrátu Froudova kritéria [1] u vtoků s vertikálním rozvinutím vstupního konfuzoru 71

14 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A ... osová odlehlost [m]

a ... zrychlení [m·s^{-2}]

a ... vztažný rozměr výtoku, v tomto případě šířka [m]

a ... součinitel symetrie přítoku (a = 0,54 pro symetrický, a = 0,72 pro nesymetrický) [-]

a_1 ... obecné zrychlení na modelu [m·s^{-2}]

a_2 ... obecné zrychlení ve skutečnosti [m·s^{-2}]

b ... výška výtokového otvoru [m]

C ... výtokový součinitel dle Knausse [-]

Ca ... Cauchyho kritérium [-]

D ... průměr rozšířeného vstupního otvoru přivaděče [m]

D ... průměr přivaděče [m]

D ... vnitřní průměr potrubí (vztažný průřez) [m]

Fr ... Froudeovo kritérium modelové podobnosti [-]

Fr^2_i ... i-tá druhá mocnina Froudeova kritéria modelové podobnosti [-]

F_1 ... velikost obecné síly na modelu [N]

F_2 ... velikost obecné síly ve skutečnosti [N]

g ... tíhové zrychlení [m·s^{-2}]

H ... odlehlost hladiny od těžiště vztažného profilu [m]

h' ... hloubka ponoru vtoku vztažená k horní hraně výtokového otvoru [m]

h_b ... bezpečná hloubka ponoru vtoku [m]

h_k ... kritická hloubka ponoru vtoku [m]

$h_{prům,i}$ ... i-tá průměrná odlehlost hladiny a koruny přelivu [m]

h_T ... hloubka težiště zvoleného profilu pod hladinou před vtokem [m]

H_T ... tlačná výška, odlehlost hladiny a těžiště výtokového otvoru [m]

$H_{T,i}$ ... i-tá hloubka ponoru vtoku vztažená k těžišti [m]

$H_{T,i}$ ... i-tá tlačná výška [m]

h_z ... ztrátová výška [m]

h_1 .. geodetická výška ve vstupním profilu [m]

h_2 .. geodetická výška ve výstupním profilu [m]

K ... modul objemové stlačitelnosti [Pa]

Ka ... Karmánovo kritérium [-]

L ... délka na které působí povrchové napětí [m]

L_1... obecná délka na modelu [m]

L_2 ... obecná délka ve skutečnosti [m]

M_a ... měřítko zrychlení [-]

M_F ... měřítko sil [-]

M_L ... délkové měřítko [-]

M_m ... měřítko hmotnosti [-]

M_Q ... měřítko průtoků [-]

M_S ... měřítko ploch [-]

M_t ... měřítko času [-]

M_v ... rychlostní měřítko [-]

M_V ... měřítko objemů [-]

M_ρ ... měřítko měrné hmotnosti [-]

m_1 ... obecná hmotnost na modelu [kg]

m_2 ... obecná hmotnost ve skutečnosti [kg]

n ... počet otevřených výpustí [-]

P_{atm} ... atmosférický tlak [Pa]

P_{dyn} ... dynamický tlak [Pa]

P_1 ... tlak na hladinu ve vstupním profilu [Pa]

P_2 ... tlak na hladinu ve výstupním profilu [Pa]

Q ... průtok [$m^3.s^{-1}$]

Q_i ... i-tý průtok provozovanými výpustmi [$m^3.s^{-1}$]

$Q_{zad,i}$ ... i-tý zadaný průtok [$m^3.s^{-1}$]

Q_1 ... průtok na modelu [$m^3 \cdot s^{-1}$]

Q_2 ... průtok ve skutečnosti [$m^3 \cdot s^{-1}$]

R ... relativní rozdíl ztrátových součinitelů [%]

Re ... Reynoldsovo kritérium modelové podobnosti [-]

Re_M ... Reynoldsovo kritérium modelové podobnosti na modelu [-]

S ... plocha vztažného průřezu [m^2]

S ... průtočná plocha ve zvoleném profilu [m^2]

Sh ... Strouhalovo kritérium [-]

S_1 ... obecná plocha na modelu [m^2]

S_1 ... plocha výstupního profilu jednoho uzávěru [m^2]

S_2 ... obecná plocha ve skutečnosti [m^2]

t_1 ... obecný čas na modelu [s]

t_2 ... obecný čas ve skutečnosti [s]

v ... rychlost proudění ve vztažném průřezu [$m \cdot s^{-1}$]

v_i ... i-tá rychlost proudění ve vztažném průřezu [$m \cdot s^{-1}$]

V_1 ... velikost obecného objemu na modelu [m^3]

v_1 ... rychlost ve vstupním profilu [$m \cdot s^{-1}$]

v_1 ... obecná rychlost na modelu [m·s^{-1}]

V_2 ... velikost obecného objemu ve skutečnosti [m^3]

v_2 ... rychlost ve výstupním profilu [m·s^{-1}]

v_2 ... obecná rychlost ve skutečnosti [m·s^{-1}]

We ... Weberovo kritérium modelové podobnosti [-]

α_1 ... hodnota Coriolisova kritéria ve vstupním profilu

α_2 ... hodnota Coriolisova kritéria ve výstupním profilu

ΔH ... výšková odlehlost koruny přelivu a těžiště vztažného průřezu ΔH = 0,584 m [m]

Δh ... rozdíl geodetických výšek [m]

Δh ... výšková odlehlost hladiny a težiště výtokového otvoru [m]

$\Delta\mu_i$ ... i-tý poměrný rozdíl výtokových součinitelů vztažený k účinnosti jednoho vtoku [-]

ε ... součinitel kontrakce [-]

μ ... výtokový součinitel [-]

μ_i ... i-tá účinnost při provozu více vtoků [-]

μ_i ... i-tý výtokový součinitel [-]

μ_1 ... účinnost jednoho vtoku [-]

ν ... kinematická viskozita [m^2·s^{-1}]

ξ ... ztrátový součinitel [-]

$\xi_{1\ \mathrm{vtok}}$ ... ztrátový součinitel pro jeden vtok [-]

$\xi_{2\ \mathrm{vtoky}}$ ... ztrátový součinitel pro dva provozované vtoky [-]

ρ ... měrná hmotnost [kg·m^{-3}]

ρ_1 ... obecná měrná hmotnost na modelu [kg·m^{-3}]

ρ_2 ... obecná měrná hmotnost ve skutečnosti [kg·m^{-3}]

σ ... povrchové napětí [N·m^{-1}]

φ ... součinitel výtokové rychlosti [-]

DP ... diplomová práce

VD ... vodní dílo

MVE ... malá vodní elektrárna

15 SUMMARY

The hydropower inlets are often designed of more individual inlets. Their design lays stress on the smallest dimensions possible, which means considerable financial savings. When decreasing their dimensions, it is necessary not only to consider the possibility of creating complete inlet vortices at a level lower than the critical depth of dive (or the safe depth of dive, according to the relevant definition) and the associated hazards (pressure pulsations, turbine efficiency, etc.) but also to consider influence of the mutual operation of the neighbouring inlets from the point of view of the inlet vortices. The critical depth of dive is further reduced at that point. The mutual operation of two or more inlets also results in a reduction of energy efficiency, which should be also considered.

Problematics of the influence of the operation of two neighbouring inlets has been discussed in the past. Complete results and conclusions are contained in the research report [1]. However, using three or more inlets, there is another influence that has not yet been fully solved. The influence of the operation of two to four entrances on their energy efficiency and the creation of complete inlet vortices was quantified in this diploma thesis. The influence of the relative distance of the inlets on the above mentioned was further researched at two inlets. The energy efficiency is further reduced with increased number of inlets

All results contained in this diploma thesis refer to the model configuration given in Chapter 4 and the range of the second power of Froud's criterion $Fr^2 \in$ <9,152; 14,406> related to the outlet profile of the bottom outlet.