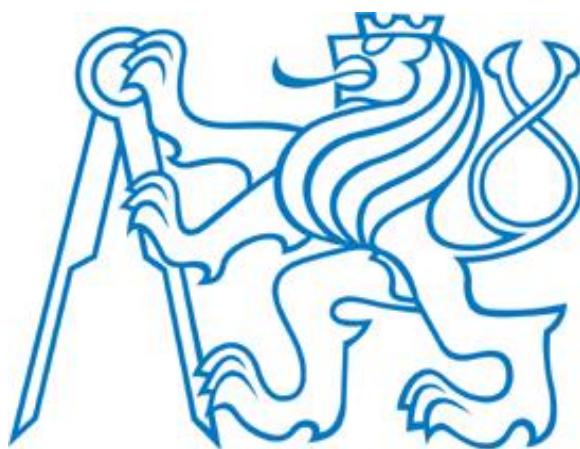


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA HYDRAULIKY A HYDROLOGIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Modelový výzkum proudění na výtoku z propustku

Modelling research flow at the outlet from the culvert

Autor: Bc. Petra Jurečková

Praha, 2017

Vedoucí práce: Doc. Ing. Aleš Havlík, CSc.

Název práce: Modelový výzkum proudění na výtoku z propustku

Autor: Bc. Petra Jurečková

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

Katedra: Katedra hydrauliky a hydrologie

Vedoucí práce: Doc. Ing. Aleš Havlík, CSc.

E-mail vedoucího: Ales.Havlik@cvut.cz

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá ztrátou na výtoku z propustku pro tlakový režim proudění. Za účelem stanovení velikosti ztráty a ztrátového součinitele byl proveden experiment na fyzikálním modelu. Naměřená data byla vyhodnocena pomocí Bernoulliho rovnice a věty o hybnosti proudu. Ztráta na výtoku byla rovněž vypočtena pomocí současně používaných teoretických výrazů a tato hodnota byla porovnána s hodnotou získanou experimentem. Bylo zjištěno, že skutečnosti nejvíce odpovídá rovnice pro ztrátu náhlým rozšířením známá pod názvem Bordova ztráta. V práci byla rovněž stanovena hodnota součinitele místní ztráty na výtoku v závislosti na míře zatopení výtoku a rozměrech otevřeného koryta za propustkem.

Klíčová slova: propustky, ztráta na výtoku z propustku, ztráta náhlým rozšířením, Bordova ztráta, součinitel místní ztráty na výtoku, fyzikální modelování

Title: Modelling research flow at the outlet from the culvert

Author: Bc. Petra Jurečková

Study programme: Civil Engineering

Branch of Study: Water Engineering and Water Structures

Department: Department of Hydraulics and Hydrology

Supervisor: Doc. Ing. Aleš Havlík, CSc.

Supervisor's e-mail address: Ales.Havlik@cvut.cz

Abstract

This master thesis deals with the exit loss at the outlet from the pressurized culvert. In order to determine the value of the exit loss and the exit loss coefficient, an experiment was conducted on the physical model. The Bernoulli equation and the momentum principles were applied on the measured data. The exit loss was also calculated using the current theoretical expressions and this computed value was compared with the value obtained in the experiment. It was detected that the Borda-Carnot equation for the sudden expansion is closest to the reality. In this thesis the value of the exit loss coefficient depending on the rate of submergence and the geometry of the channel at the outlet from the culvert was also specified.

Keywords: culverts, culvert exit loss, loss due to sudden expansion, Borda-Carnot equation, culvert exit loss coefficient, physical modelling

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jurečková** Jméno: **Petra** Osobní číslo: **396526**
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**
Zadávající katedra/ústav:
Studijní program: **Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Vodní hospodářství a vodní stavby**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Modelový výzkum proudění na výtoku z propustku

Název diplomové práce anglicky:

Modelling research flow at the outlet from the culvert

Pokyny pro vypracování:

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Aleš Havlík CSc., katedra hydrauliky a hydrologie FSv

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.09.2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.01.2017**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady uvedené v seznamu citované literatury.

V Praze dne

.....

podpis

Na tomto místě bych ráda poděkovala všem, kteří mi poskytli podklady a přístup k mnoha důležitým informacím a materiálům pro vypracování této práce. Zvláště pak děkuji Doc. Ing. Aleši Havlíkovi, CSc. za odborné vedení a konzultování mé diplomové práce a za rady, které mi poskytoval. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Tomáši Pickovi, Ph.D., který mi pomáhal s výrobou a sestavením modelu. V neposlední řadě patří můj dík mým rodičům a příteli za morální a materiální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu mého studia.

Tato práce je součástí grantového úkolu TAČR TA04030373 „Zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti propustků s ohledem převádění povodňových průtoků“, řešeného na katedře hydrauliky a hydrologie, Fakultě stavební, ČVUT v Praze.

OBSAH

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | ÚVOD..... | 1 |
| 2 | MOSTNÍ OBJEKTY - PROPUSTKY | 2 |
| 2.1 | KONSTRUKCE PROPUSTKU | 5 |
| 2.1.1 | DRUHY TUBUSŮ PROPUSTKŮ..... | 5 |
| 2.1.2 | KONSTRUKČNÍ TYPY USPOŘÁDÁNÍ VTOKU A VÝTOKU..... | 7 |
| 3 | HYDRAULIKA PROPUSTKŮ..... | 10 |
| 3.1 | ZÁKLADNÍ ROVNICE | 11 |
| 3.1.1 | BERNOULLIHO ROVNICE..... | 12 |
| 3.1.2 | VĚTA O HYBNOSTI PROUDU | 14 |
| 3.2 | STAVY A REŽIMY PROUDĚNÍ V PROPUSTKU | 16 |
| 3.2.1 | PRŮBĚHY HLADIN | 17 |
| 3.2.2 | PODMÍNKY ZATOPENÍ DOLNÍ VODOU | 26 |
| 3.3 | ZTRÁTY V PROPUSTKU | 29 |
| 3.3.1 | ZTRÁTY MÍSTNÍ..... | 30 |
| 3.3.2 | ZTRÁTY TŘENÍM..... | 31 |
| 4 | ZTRÁTA NA VÝTOKU Z PROPUSTKU | 33 |
| 4.1 | VÝPOČET V REŽIMU O VOLNÉ HLADINĚ | 34 |
| 4.2 | VÝPOČET V REŽIMU TLAKOVÉM | 35 |
| 5 | PROVEDENÉ VÝZKUMY NA TÉMA ZTRÁTY V PROPUSTKU | 38 |
| 6 | FYZIKÁLNÍ MODELOVÁNÍ | 42 |
| 6.1 | MODELOVÁ PODOBNOST | 44 |
| 7 | POPIS PROVEDENÉHO VÝZKUMU | 45 |
| 7.1 | ZAŘÍZENÍ K MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ | 45 |
| 7.1.1 | HYDRAULICKÝ OKRUH | 45 |
| 7.1.2 | HYDRAULICKÉ ŽLABY S VESTAVBAMI | 46 |
| 7.2 | MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ..... | 52 |
| 7.2.1 | ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ PRŮTOKU | 52 |
| 7.2.2 | ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ HLADIN | 54 |
| 7.3 | PROVEDENÁ MĚŘENÍ..... | 55 |
| 7.3.1 | NEJISTOTY MĚŘENÍ..... | 57 |

| | | |
|-------|--|----|
| 8 | VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT | 61 |
| 8.1 | VYHODNOCENÍ DLE BERNOULLIHO ROVNICE | 61 |
| 8.2 | VYHODNOCENÍ DLE BERNOULLIHO ROVNICE V KOMBINACI S VĚTOU O HYBNOSTI | 64 |
| 9 | VÝSLEDKY EXPERIMENTU | 66 |
| 9.1 | HODNOTY ZTRÁT | 66 |
| 9.2 | HODNOTY SOUČiniteLE ZTRÁTY NA VÝTOKU | 69 |
| 9.2.1 | ZÁVISLOST SOUČiniteLE NA MÍŘE ZATOPENÍ | 76 |
| 9.2.2 | ZÁVISLOST SOUČiniteLE NA POMĚRU PRŮTOČNÝCH PLOCH | 77 |
| 9.3 | PODÍL DÍLČÍCH ZTRÁT NA CELKOVÉ ZTRÁTĚ | 79 |
| 9.3.1 | PODÍL ZTRÁTY NA VTOKU NA CELKOVÉ ZTRÁTĚ | 80 |
| 9.3.2 | PODÍL ZTRÁTY TŘENÍM NA CELKOVÉ ZTRÁTĚ | 81 |
| 9.3.3 | PODÍL ZTRÁTY NA VÝTOKU NA CELKOVÉ ZTRÁTĚ | 82 |
| 10 | VÝPOČET ZTRÁT V TLAKOVÝCH PROPUSTCÍCH DLE RŮZNÝCH AUTORŮ | 83 |
| 10.1 | VÝPOČET ZTRÁT V TLAKOVÝCH PROPUSTCÍCH DLE LITERATURY | 83 |
| 10.2 | VÝPOČET ZTRÁTY NA VÝTOKU DLE MANUÁLŮ K SOFTWAREM | 87 |
| 11 | ZÁVĚR | 89 |
| 12 | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 90 |

Seznam obrázků

- OBR. 2.1 SCHEMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ MOSTU A PROPUSTKU
- OBR. 2.2 ZÁKLADNÍ ČÁSTI PROPUSTKU
- OBR. 2.3 UKÁZKA ODTRŽENÍ PROUDU A VZNIKU VÍRŮ A ZPĚTNÝCH PROUDŮ [25]
- OBR. 2.4 RŮZNÉ DRUHY TRUBNÍCH PROPUSTKŮ
- OBR. 2.5 UKÁZKA DESKOVÉHO PROPUSTKU
- OBR. 2.6 PROPUSTEK TVOŘENÝ UZAVŘENÝM RÁMEM
- OBR. 2.7 PROPUSTEK S KRHOVOU, SEGMENTOVOU A PARABOLICKOU KLENBOU
- OBR. 2.8 KONSTRUKČNÍ TYP ROVNÉ ČELO NÁTOKU A PŘEDSAZENÝ VŤOK
- OBR. 2.9 KONSTRUKČNÍ TYP ŠIKMÉ ČELO NÁTOKU A HYDRAULICKY ROZŠÍŘENÝ NÁTOK
- OBR. 3.1 NÁZVY A UMÍSTĚNÍ PŘÍČNÝCH PROFILŮ V PODÉLNÉM ŘEZU PROPUSTKEM
- OBR. 3.2 JEDNOTLIVÉ VÝŠKY DO BERNOULLIHO ROVNICE PRO DVA SOUSEDNÍ PROFILY
- OBR. 3.3 SCHÉMA PROUDOVÉHO VLÁKNA K OBJASNĚNÍ VĚTY O HYBNOSTI
- OBR. 3.4 DĚLENÍ STAVŮ A REŽIMŮ PROUDĚNÍ V PROPUSTKU
- OBR. 3.5 SCHÉMA PRŮBĚHU HLADINY PRO TYP 1
- OBR. 3.6 SCHÉMA PRŮBĚHU HLADINY PRO TYP 2
- OBR. 3.7 SCHÉMA PRŮBĚHU HLADINY PRO TYP 3
- OBR. 3.8 SCHÉMA PRŮBĚHU HLADINY PRO TYP 4
- OBR. 3.9 SCHÉMA PRŮBĚHU HLADINY PRO TYP 5
- OBR. 3.10 SCHÉMA PRŮBĚHU HLADINY PRO TYP 6
- OBR. 3.11 SCHÉMA PRŮBĚHU HLADINY PRO TYP 7
- OBR. 3.12 SCHÉMA PRŮBĚHU HLADINY PRO TYP 8
- OBR. 3.13 TLAKOVÉ PROUDĚNÍ PROPUSTKEM S VÝTOKEM NEZATOPENÝM DOLNÍ VODOU
- OBR. 3.14 TLAKOVÉ PROUDĚNÍ PROPUSTKEM S VÝTOKEM ZATOPENÝM DOLNÍ VODOU
- OBR. 3.15 ZNÁZORNĚNÍ SKUTEČNÉHO PŘEVÝŠENÍ HLADINY DOLNÍ VODY NAD STROPEM PROPUSTKU
- OBR. 3.16 ZNÁZORNĚNÍ ODTRŽENÍ PAPSUKU OD STĚNY A TVORBY ZPĚTNÝCH VÍRŮ
- OBR. 3.17 MOODYHO DIAGRAM [9]
- OBR. 4.1 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ MÍSTNÍ ZTRÁTY ROZŠÍŘENÍM PRŮŘEZU
- OBR. 5.1 GRAF ZÁVISLOSTI CELKOVÉ ZTRÁTY NA POMĚRU y_H/D OD T. J. FAIRLEYHO
- OBR. 5.2 ZÁVISLOSTI CELKOVÉ ZTRÁTY NA POMĚRU y_H/D OD P. JUREČKOVÉ PRO OBDÉLNÍKOVÉ KORYTO
- OBR. 5.3 ZÁVISLOST CELKOVÉ ZTRÁTY NA POMĚRU y_H/D OD P. JUREČKOVÉ PRO LICHOBĚŽNÍKOVÉ KORYTO
- OBR. 7.1 SCHÉMA HYDRAULICKÉHO OKRUHU
- OBR. 7.2 PODÉLNÝ A PŘÍČNÝ ŘEZ MODELEM I
- OBR. 7.3 PODÉLNÝ A PŘÍČNÝ ŘEZ MODELEM II
- OBR. 7.4 PODÉLNÝ A PŘÍČNÝ ŘEZ MODELU III
- OBR. 7.5 PŘÍČNÉ ŘEZY VÝTOKOVÝCH PROFILŮ VŠECH TŘÍ MODELŮ
- OBR. 7.6 POLOHY PODÉLNÝCH PROFILŮ, V NICHŽ PROBÍHALA MĚŘENÍ
- OBR. 7.7 GRAF NORMÁLNÍHO ROZDĚLENÍ
- OBR. 7.8 GRAF ROVNOMĚRNÉHO ROZDĚLENÍ
- OBR. 8.1 ZNÁZORNĚNÍ HLOUBKY hx V PROFILU C
- OBR. 9.1 BAREVNÁ ŠKÁLA K VYZNAČENÍ ODCHYLEK
- OBR. 9.2 ZÁVISLOST POMĚRU ξ_{EXP}/ξ_{TEOR} NA MÍŘE ZATOPENÍ PRO MODEL I
- OBR. 9.3 ZÁVISLOST POMĚRU ξ_{EXP}/ξ_{TEOR} NA MÍŘE ZATOPENÍ PRO MODEL II
- OBR. 9.4 ZÁVISLOST POMĚRU ξ_{EXP}/ξ_{TEOR} NA MÍŘE ZATOPENÍ PRO MODEL III
- OBR. 9.5 ZÁVISLOST SOUČINITELE ZTRÁTY NA VÝTOKU NA MÍŘE ZATOPENÍ
- OBR. 9.6 ZÁVISLOST SOUČINITELE ZTRÁTY NA VÝTOKU NA POMĚRU PRŮTOČNÝCH PLOCH
- OBR. 9.7 EXTRAPOLOVANÝ GRAF PRO ODEČET SOUČINITELE ZTRÁTY NA VÝTOKU V ZÁVISLOSTI NA POMĚRU PRŮTOČNÝCH PLOCH
- OBR. 9.8 ZNÁZORNĚNÍ CELKOVÉ ZTRÁTY JAKO ROZDÍLU ÚROVNÍ ČÁRY ENERGIE

Seznam tabulek

- TAB. 3.1 HODNOTY CORIOLISOVA ČÍSLA V ZÁVISLOSTI NA OSTATNÍCH PODMÍNKÁCH
- TAB. 3.2 PŘEHLED CHARAKTERISTIK JEDNOTLIVÝCH TYPŮ PROUDĚNÍ
- TAB. 3.3 OVĚŘENÍ VZORCE PRO ZATOPENÍ DOLNÍ VODOU
- TAB. 4.1 VYJÁDRĚNÍ ZTRÁTOVÉHO SOUČINITELE PRO BORDŮV VÝRAZ
- TAB. 4.2 SROVNÁNÍ SOUČINITELŮ PRO OBDÉLNÍKOVÝ (VLEVO) A LICHOBĚŽNÍKOVÝ (VPRAVO) TVAR KORYTA
- TAB. 5.1 PARAMETRY EXPERIMENTU B. P. TULLISE A S. C. ROBINSONA
- TAB. 5.2 POROVNÁNÍ HODNOT TEORETICKÝCH SOUČINITELŮ A SOUČINITELŮ ZÍSKANÝCH EXPERIMENTEM
- TAB. 5.3 SHRNUTÍ HODNOT ZTRÁTOVÝCH SOUČINITELŮ Z PROVEDENÝCH VÝZKUMŮ
- TAB. 7.1 PŘEHLED PARAMETRŮ JEDNOTLIVÝCH MODELŮ
- TAB. 7.2 ZNAČENÍ STAVŮ V ZÁVISLOSTI NA VELIKOSTI ZATOPENÍ
- TAB. 7.3 HODNOTY K FAKTORU V ZÁVISLOSTI NA INTERVALU SPOLEHLIVOSTI
- TAB. 7.4 PŘEHLED NEJISTOT MĚŘENÍ
- TAB. 9.1 HODNOTY CELKOVÝCH ZTRÁT V MM PRO MODEL Y I, II A III
- TAB. 9.2 HODNOTY ZTRÁT NA VÝTOKU V MM PRO MODEL I
- TAB. 9.3 HODNOTY ZTRÁT NA VÝTOKU V MM PRO MODEL Y II A III
- TAB. 9.4 HODNOTY SOUČINITELE ZTRÁTY NA VÝTOKU PRO MODEL Y I, II A III
- TAB. 9.5 HODNOTY PODÍLU ξ_{EXP}/ξ_{TEOR} PRO MODEL I
- TAB. 9.6 HODNOTY PODÍLU ξ_{EXP}/ξ_{TEOR} PRO MODEL Y II A III
- TAB. 9.7 VYZNAČENÍ VHODNOSTI SOUČINITELŮ POMOCÍ BAREVNÉ ŠKÁLY PRO MODEL I
- TAB. 9.8 VYZNAČENÍ VHODNOSTI SOUČINITELŮ POMOCÍ BAREVNÉ ŠKÁLY PRO MODEL Y II A III
- TAB. 9.9 PROCENTUÁLNÍ PODÍL ZTRÁTY NA VÝTOKU NA CELKOVÉ ZTRÁTĚ
- TAB. 9.10 PROCENTUÁLNÍ PODÍL ZTRÁTY TŘENÍM NA CELKOVÉ ZTRÁTĚ
- TAB. 9.11 PROCENTUÁLNÍ PODÍL ZTRÁTY NA VÝTOKU NA CELKOVÉ ZTRÁTĚ
- TAB. 10.1 SROVNÁNÍ METOD VÝPOČTŮ ZTRÁT DLE RŮZNÝCH AUTORŮ

Seznam fotografií

- FOTO 7.1 CELKOVÝ POHLED NA HYDRAULICKÝ ŽLAB A
- FOTO 7.2 POHLED NA VÝTOKOVÝ PROFIL MODELU I
- FOTO 7.3 CELKOVÝ POHLED NA HYDRAULICKÝ ŽLAB B
- FOTO 7.4 POHLED NA VÝTOKOVÝ PROFIL MODELU II
- FOTO 7.5 POHLED NA VÝTOKOVÝ PROFIL MODELU III
- FOTO 7.6 PRŮTOKOMĚR KROHNE - ŽLAB A (VLEVO) A PRŮTOKOMĚR BADGER METER - ŽLAB B (VPRAVO)
- FOTO 7.7 THOMSONŮV MĚRNÝ PŘELIV S ODMĚRNÝM VÁLCEM
- FOTO 7.8 HROTOVÉ MĚŘÍTKO NA POSUVNÉM VOZÍKU PRO ŽLAB A (VLEVO) A ŽLAB B (VPRAVO)

Seznam použitých veličin

| | | |
|--------------------|--------------------------------------|---|
| b | [m] | šířka ve dně v profilech C a D za výtokem z propustku |
| C | [m ^{0.5} ·s ⁻¹] | Chézyho rychlostní součinitel |
| D | [m] | průměr trubního propustku |
| dt | [s] | změna času |
| dv | [m·s ⁻¹] | změna rychlosti hmotného bodu |
| E_A | [m] | energetická výška v profilu A |
| E_C | [m] | energetická výška v profilu C |
| E_D | [m] | energetická výška v profilu D |
| F | [N] | síla působící na hmotný bod |
| Fr | [-] | Froudovo číslo |
| g | [m·s ⁻²] | tíhové zrychlení ($g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$) |
| H | [m] | výška čtvercového či obdélníkového propustku |
| h_x | [m] | hloubka v profilu C dopočtená pomocí věty o hybnosti |
| i_e | [-] | sklon čáry energie |
| i_0 | [-] | podélný sklon dna propustku |
| k | [-] | násobící faktor pro různé intervaly spolehlivosti |
| L | [m] | délka tělesa propustku |
| m | [kg] | hmotnost |
| M_{Fr} | [-] | měřítka Froudova čísla |
| M_g | [-] | měřítka gravitačního zrychlení |
| M_L | [-] | měřítka délek |
| M_Q | [-] | měřítka průtoků |
| M_{Re} | [-] | měřítka Reynoldsova čísla |
| M_v | [-] | měřítka rychlostí |
| M_ν | [-] | měřítka kinematické viskozity |
| n | [-] | Manningova drsnost |
| n_m | [ks] | počet měření |
| p | [Pa] | tlak působící na tekutinu |
| pS | [N] | tlaková síla |
| $\frac{p}{\rho g}$ | [m] | tlaková výška |
| Q | [m ³ ·s ⁻¹] | objemový průtok |
| r | [m] | poloměr kruhového profilu propustku |
| R | [m] | hydraulický poloměr |
| Re | [-] | Reynoldsovo číslo |
| s | [...] | standardní odchylka |
| S | [m ²] | obsah průtočného průřezu v propustku |
| S_C | [m ²] | obsah průtočné plochy v profilu C |
| S_D | [m ²] | obsah průtočné plochy v profilu D |
| u | [...] | standardní nejistota |
| u_c | [...] | kombinovaná standardní nejistota |
| u_e | [...] | rozšířená standardní nejistota |
| v | [m·s ⁻¹] | rychlost proudění v propustku |

| | | |
|--------------------|------------------------------------|--|
| $\frac{v^2}{2g}$ | [m] | rychlostní výška |
| v_c | [m·s ⁻¹] | střední průřezová rychlost v profilu B v zúžené proudnici za vtokem |
| v_D | [m·s ⁻¹] | střední průřezová rychlost v profilu D za výtokem z propustku |
| v_h | [m·s ⁻¹] | střední průřezová rychlost v profilu A před vtokem |
| y | [m] | polohová (geodetická) výška |
| y_B | [m] | zatopená hloubka vody v profilu B za vtokem do propustku |
| y_c | [m] | zúžená hloubka vody v profilu B za vtokem do propustku |
| y_D | [m] | hloubka vody v profilu D za výtokem z propustku |
| y_h | [m] | hloubka vody v profilu A před vtokem do propustku |
| y_S | [m] | setrvačná výška |
| Z_{TC} | [m] | vertikální poloha souřadnice těžiště průtočné plochy v profilu C |
| Z_{TD} | [m] | vertikální poloha souřadnice těžiště průtočné plochy v profilu D |
| Z_{CELK} | [m] | celková ztrátová výška |
| Z_M | [m] | ztrátová výška způsobená místním odporem |
| Z_r | [m] | ztrátová výška způsobená rozšířením proudu |
| $Z_{TŘ}$ | [m] | ztrátová výška způsobená třením |
| Z_{VT} | [m] | ztrátová výška na vtoku do propustku |
| Z_{VTZ} | [m] | místní ztráta na vtoku do propustku způsobená zúžením proudu |
| $Z_{VÝT}$ | [m] | ztrátová výška na výtoku z propustku |
| Z_Z | [m] | ztrátová výška způsobená zúžením proudu |
| α | [-] | Coriolisovo číslo |
| Δ | [m] | hydraulická drsnost |
| $\frac{\Delta}{D}$ | [-] | relativní drsnost |
| Δ_{min} | [m] | minimální převýšení dolní vody nad stropem propustku |
| Δ_{real} | [m] | skutečné převýšení dolní vody nad stropem propustku |
| λ | [-] | součinitel ztráty třením |
| ν | [m ² ·s ⁻¹] | kinematická viskozita |
| ξ | [-] | ztrátový součinitel |
| ξ_{EXP} | [-] | součinitel místní ztráty na výtoku získaný z naměřených dat |
| ξ_{Hanocq} | [-] | součinitel místní ztráty na výtoku dle Hanocquova řešení |
| ξ_{TEOR} | [-] | teoretická hodnota součinitele místní ztráty na výtoku z literatury |
| ξ_{Venant} | [-] | součinitel místní ztráty na výtoku dle Saint Venantova řešení |
| $\xi_{VÝT}$ | [-] | součinitel místní ztráty na výtoku vztahující se k rychlosti v propustku |
| $\xi_{VÝT,D}$ | [-] | součinitel místní ztráty na výtoku vztahující se k rychlosti v profilu D |
| $\xi_{VÝT,TUF}$ | [-] | modifikovaný součinitel ztráty na výtoku dle software TUFLOW |
| π | [-] | Ludolfovo číslo |
| ρ | [kg·m ⁻³] | měrná hmotnost tekutiny (pro vodu $\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) |

1 ÚVOD

Cílem této práce je určit způsob, jak správně vypočítat ztrátu na výtoku z propustku. Současně používané metody výpočtu ztráty na výtoku podávají nepřesné výsledky, a proto je nutné se této problematice věnovat. Správné určení ztráty vede k přesnějším výsledkům při stanovování vzduté hladiny před propustkem. Určení této vzduté hladiny je velmi důležité, jelikož tato hladina smí vystoupit nejvýše 0.5 m pod pláň silnice [5]. Pokud je úroveň této hladiny nepřesně stanovena, může docházet k přelévání náspu komunikace a tím k omezení provozu, či k ohrožení uživatelů této komunikace. Taktéž může dojít k zaplavení komunikace, či přilehlého území.

V současné projekční praxi často dochází k předimenzování rozměrů propustku tak, aby byl průchod vody bezpečný a nedošlo tak k výše zmíněnému přelévání náspu komunikace a tím způsobeným problémům. Předimenzování objektů v náspech komunikací je velmi neekonomické a působí nevalným estetickým dojmem. Větší než nutné rozměry jsou nevhodné i z hlediska ekologického, jelikož je spotřebováno více materiálu a je způsoben větší zásah do přirozeného prostředí, než by bylo ve skutečnosti potřeba. Proto je nutné, poskytnout projektantovi správné hodnoty součinitelů a jiných výchozích podkladů, které jsou potřebné ke správnému výpočtu vzduté hladiny před propustkem.

Z ekonomického hlediska jsou náklady na výstavbu propustků v poměru k celkovým nákladům na výstavbu pozemní komunikace nebo železnice zanedbatelné. Nicméně, nevhodně navržený propustek může v konečném důsledku způsobit škody mnohonásobně vyšší, pohybující se v desítkách až stovkách miliónů korun.

Z výše uvedených důvodů je proto nutné věnovat ztrátě na výtoku patřičnou pozornost, jelikož její špatný výpočet může vést nejen k ekonomickým ale i ke škodám na zdraví.

2 MOSTNÍ OBJEKTY - PROPUSTKY

Teoretická část práce obsahuje definici propustku, popis jeho základních částí a různých konstrukčních provedení, principy hydraulického řešení propustku se zaměřením na hydraulické ztráty, především pak na ztrátu na výtoku z propustku. V této části jsou rovněž popsány již provedené výzkumy týkající se ztráty na výtoku z propustku.

Mostní objekt je nedílnou součástí dopravní cesty (pozemní komunikace, dráhy nebo vodní cesty) v místě, v němž je třeba překonat přírodní nebo umělou překážku přemostěním, popřípadě zvolit obdobné řešení z vodohospodářských, ekonomických, ekologických nebo estetických důvodů. Pojem mostní objekt nezahrnuje pouze mosty, ale rovněž lávky a propustky. [4]

MOŽNOSTI PŘEVÁDĚNÍ VODY

K převedení vody přes liniovou překážku, jež často brání pohybu vody z jedné strany území na druhou, jsou často používány propustky, mosty a odvodňovací systémy. Vyskytují se v okolí dálnic, silnic, železničních tras a jiných komunikací, které tvoří tuto liniovou bariéru. Tyto objekty zajišťují odvod stálých vodotečí náhodně se vyskytujícího povrchového odtoku.

Odvodňovací systémy

Jestliže je do potrubí, jež je uloženo v náspe komunikace, zaústěno další potrubí nebo jestliže se v něm vyskytují nějaké vtokové otvory, jedná se o odvodňovací systém. Odvodňovací systém je charakteristický změnami geometrie jako například existencí kolen, rovněž změnami průměru či tvaru potrubí nebo změnami sklonu. Jedná-li se však o křížení vodního toku či koryta pro odvod povrchového odtoku s náspe komunikace, navrhují se na tato místa buď mosty, nebo propustky.

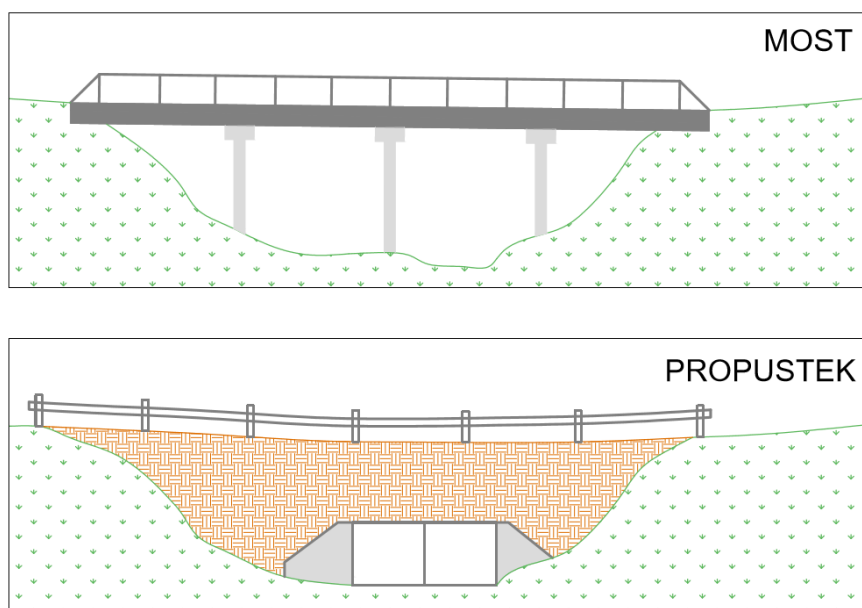
Mosty

Jsou používány tam, kde jsou propustky nepraktické, jelikož mosty jsou na rozdíl od propustků schopné převézt velké množství ledu a spláví. Rovněž jsou přístupnější a také lépe vyhovují environmentálním aspektům z hlediska migrace živočichů. U mostů také nehrozí nebezpečí ucpání a zatopení dolní vodou, což u propustků může vést ke zvýšení hladiny před propustkem a následnému zaplavení komunikace. Z hlediska bezpečnosti provozu jsou mosty méně bezpečné, jelikož mostovka je náchylná k promrzání a na komunikaci se tak může vytvořit náledí. Z estetického hlediska jsou mosty vhodné pro sevřená údolí, kde mohou působit majestátně. [24]

Propustky

Jsou používány v případě, kdy množství ledu a splávi je přijatelné. Propustky jsou rovněž ekonomicky výhodnější než mosty, jelikož mají menší otvor, avšak mohou způsobovat povodňové škody a překážku pro migrující živočichy. Jsou u nich také vyšší náklady na údržbu, jež jsou způsobeny akumulací splávi a materiálu z případné eroze, které je nutno čistit a zajistit tak průtočnost propustku.

Obr. 2.1 Schematické znázornění mostu a propustku



Na Obr. 2.1 lze pozorovat rozdíly mezi výše popsanými objekty sloužícími k převádění vody v blízkosti náspu komunikace. Vzhledem ke komplexnosti problému převádění vody se tato práce zaměří pouze na jeden typ z těchto tří objektů a bude se tak dále věnovat pouze propustkům.

DEFINICE A FUNKCE

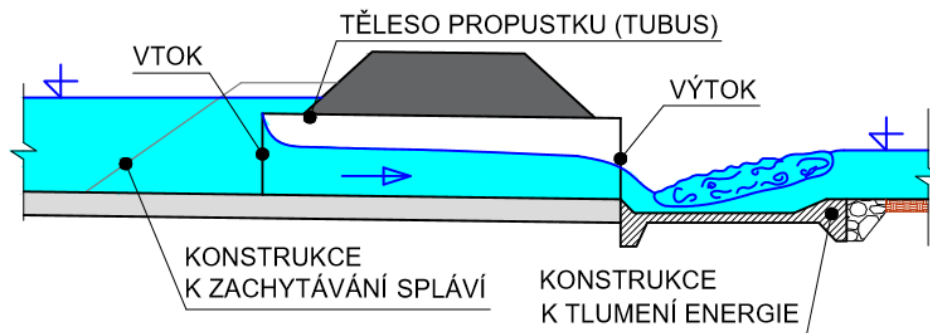
Propustky jsou vodohospodářské objekty, které umožňují průchod vodního toku z jedné strany komunikace na druhou. Dle ČSN 73 6200 je propustek mostní objekt, popř. jeho funkční celek (část), s kolmou světlostí mostního otvoru od 0.4 m do 2.0 m včetně. Objekty do světlosti 0.4 m se zařazují obvykle jako součást potrubního vedení, chrániček, kolektorů apod. [13] Objekty se světlostí větší než 2.0 m jsou souhrnně označovány pojmem mosty.

Propustky jsou zřizované ponejvíce v náspech pro převedení vodních toků. Nejzákladnější hydraulickou funkcí propustku je poskytovat odvodnění skrz liniovou překážku a další hydraulickou funkcí je odlehčení příkopů podél komunikací tím, že odvádí část průtoku mimo příkop. Propustky rovněž naleznou využití ve výpustných zařízeních retenčních nádrží či jiných vodních děl. Kromě hydraulických funkcí plní propustky i jiné funkce, mezi něž patří například i to, že tvoří křižující dílo pod komunikací pro migrující živočichy. [24]

POPIS ČÁSTÍ PROPUSTKU

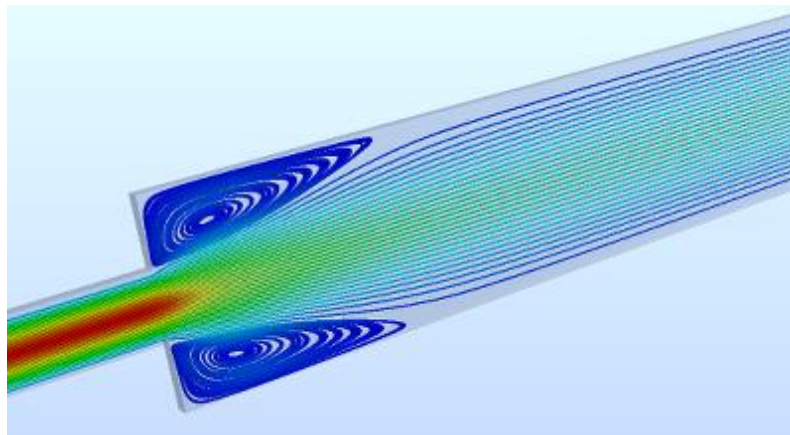
Hlavními částmi propustku je vtok do propustku, samotné těleso propustku neboli tubus a výtok z propustku. Některé propustky mohou navíc obsahovat konstrukci k zachytávání spláví, což jsou ve většině případů česle nebo konstrukci k tlumení energie v korytě za propustkem, což může zajišťovat vývar nebo rozražeče. Schéma základních částí propustku s dalšími možnými konstrukcemi lze vidět na Obr. 2.2.

Obr. 2.2 Základní části propustku



Konstrukční uspořádání vtoku do propustku chrání přilehlé zemní valy před erozí a zároveň zlepšuje hydraulické podmínky na vtoku. Správný konstrukční typ vtoku může snížit místní ztrátu na vtoku. Naopak konstrukční uspořádání výtoku z propustku se navrhuje tak, aby zabránilo abrazi a rovněž napomáhalo hydraulicky plynulejšímu výtoku [10]. Čím je výtok z propustku plynulejší, tím menší je i ztráta na výtoku, jelikož nedochází k přílišnému odtrhávání paprsku od stěn propustku a tím k tvorbě vírů a zpětného proudění, jak lze pozorovat na Obr. 2.3. Jednotlivým konstrukčním uspořádáním vtoku a výtoku se dále věnuje podkapitola 2.1.2.

Obr. 2.3 Ukázka odtržení proudu a vzniku vírů a zpětných proudů [25]



Už v této fázi je jasné, že odtrhávání proudu od stěn způsobuje nemalé místní ztráty na vtoku a výtoku z propustku. Těmito místními ztrátami, podrobněji však místní ztrátě na výtoku se bude dále tato práce věnovat.

2.1 KONSTRUKCE PROPUSTKU

Tato kapitola bude pojednávat o jednotlivých možných řešeních konstrukce propustku v praxi. První podkapitola bude věnována především dnes používaným materiálům a příčným profilům samotných trub, druhá podkapitola bude naopak věnována konstrukčnímu uspořádání vtoku a výtoku.

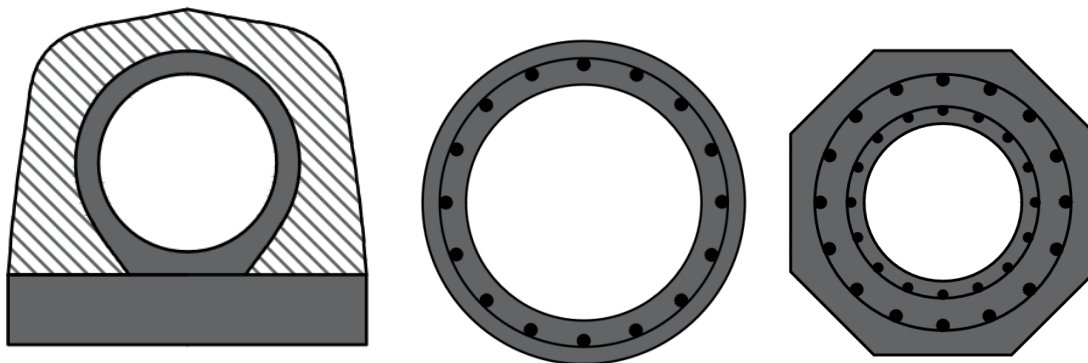
2.1.1 DRUHY TUBUSŮ PROPUSTKŮ

Samotné těleso propustku neboli tubus se může vyskytovat v mnoha různých velikostech a tvarech a může být vyroben z nejrůznějších materiálů. Co se týká tvaru, mohou být propustky kruhové, čtvercové, obdélníkové, elipsovité, půlkruhové, parabolické, vejčité, tlamové, atd. Nejběžnějším typem propustku je však propustek kruhový, s nímž se nejběžněji setkáváme v praxi, jelikož je z hydraulického hlediska velmi vhodný a pak profil obdélníkový, jenž má při stejné hloubce vody větší průřecnou plochu a používá se tedy v případech, kdy je projektant limitován výškou náspu. Z materiálového hlediska rozlišujeme propustky vyrobené z betonu či železobetonu, plastu, vlnitého či spirálového plechu, sklolaminátu a jiných vhodných materiálů. Betonové propustky mohou být buď prefabrikované, nebo mohou být vyrobeny až na místě stavby, pak hovoříme o propustcích monolitických. Dle konstrukce mohou být propustky rozděleny na trubní, deskové, rámové či klenbové.

Trubní propustky

Trouby z prostého betonu se používají jen na účelových komunikacích; pod silničními komunikacemi lze trouby z prostého betonu použít, jen když se obetonují. Trouby ze železobetonu jsou používány nejčastěji a jsou navrhovány pro několik konstrukčních druhů podle velikosti zatížení. Používají se pro silniční propustky ve vysokých náspech. Pro propustky se dříve používaly trouby s vnějším osmiúhelníkovým průřezem (tzv. RT - na Obr. 2.4 vpravo) nebo trouby zvané Vianini. [6]

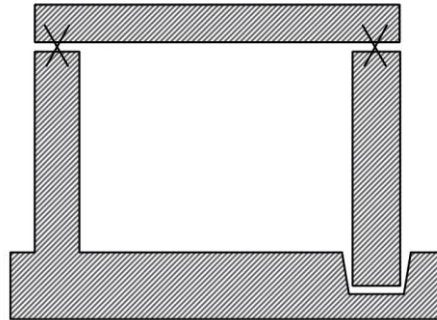
Obr. 2.4 Různé druhy trubních propustků



Deskové propustky

Deskové propustky jsou tvořeny opěrami a nosnou deskou. Protože světlost je malá, mívají opěry zpravidla společný základ. Desku i vertikální prvky je možné prefabrikovat, základ je většinou monolitický.

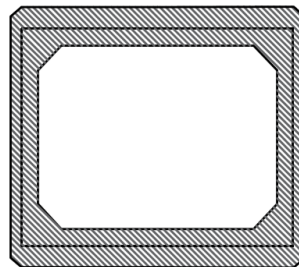
Obr. 2.5 Ukázka deskového propustku



Rámové propustky

Propustky vytvořené jako uzavřené rámy jsou úsporné a staticky výhodné. Tloušťky konstrukčních částí (stěny, horní a spodní desky) jsou menší než u propustků deskových a navíc jsou odolnější proti deformacím terénu.

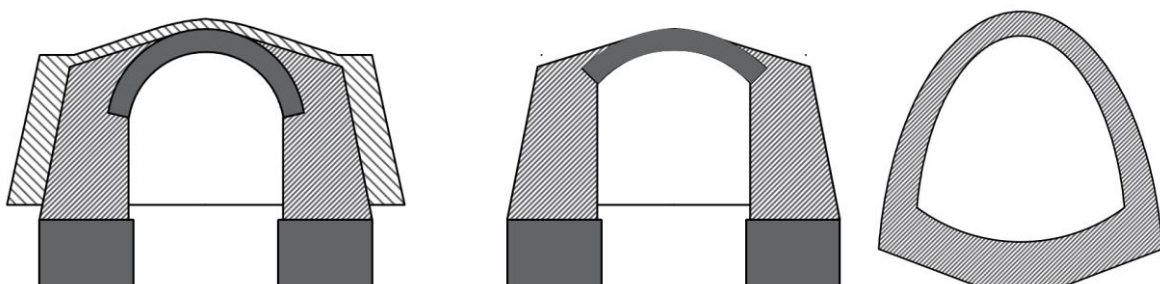
Obr. 2.6 Propustek tvořený uzavřeným rámem



Klenbové propustky

Klenbové propustky (polokruhové, segmentové, eliptické či parabolické klenby) jsou vhodné i pro větší výšky náspu. Klenbové propustky se dříve prováděly z kamene nebo cihel, nyní nejčastěji z prostého betonu nebo ze železobetonu [6].

Obr. 2.7 Propustek s kruhovou, segmentovou a parabolickou klenbou

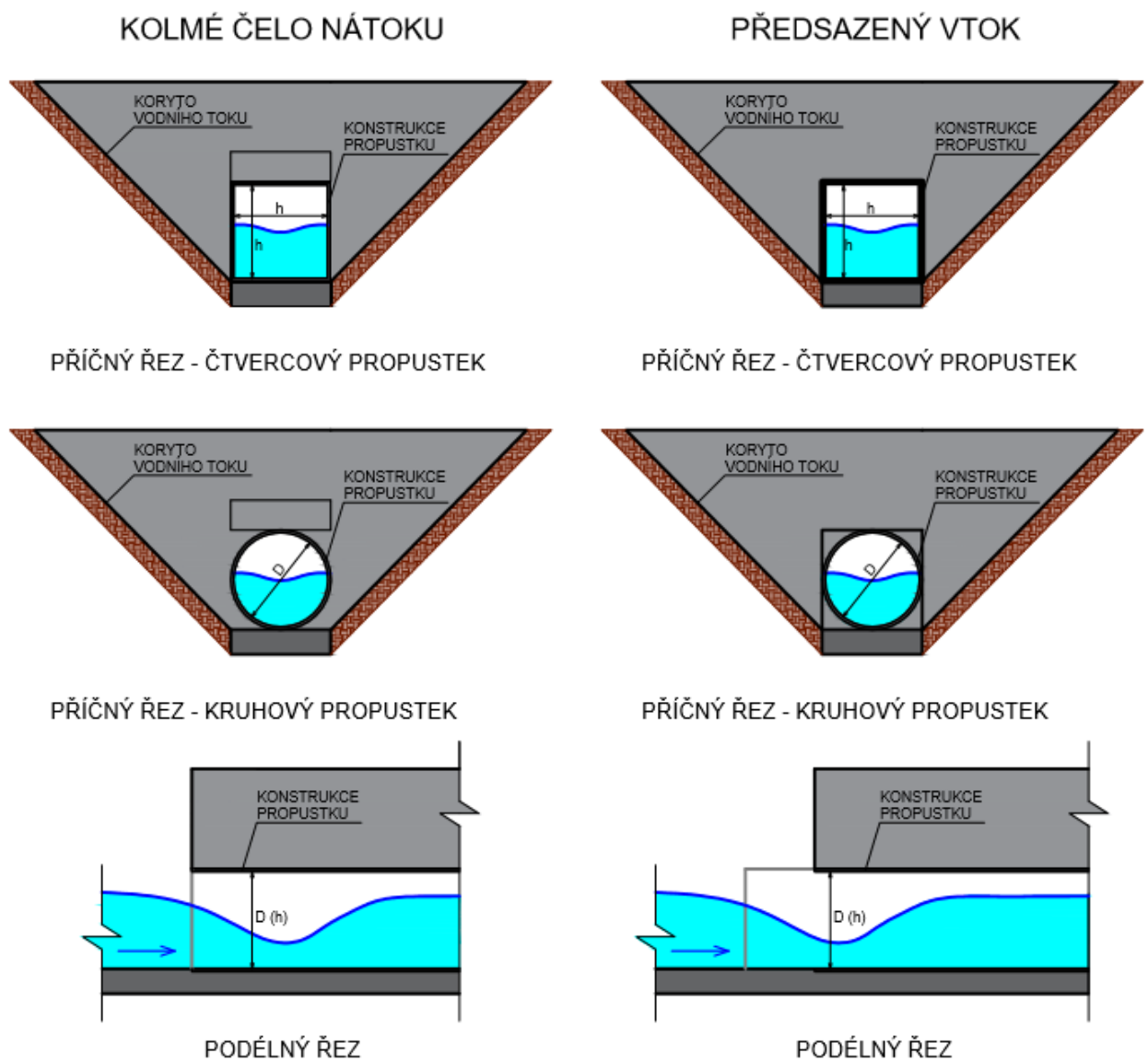


2.1.2 KONSTRUKČNÍ TYPY USPOŘÁDÁNÍ VTOKU A VÝTOKU

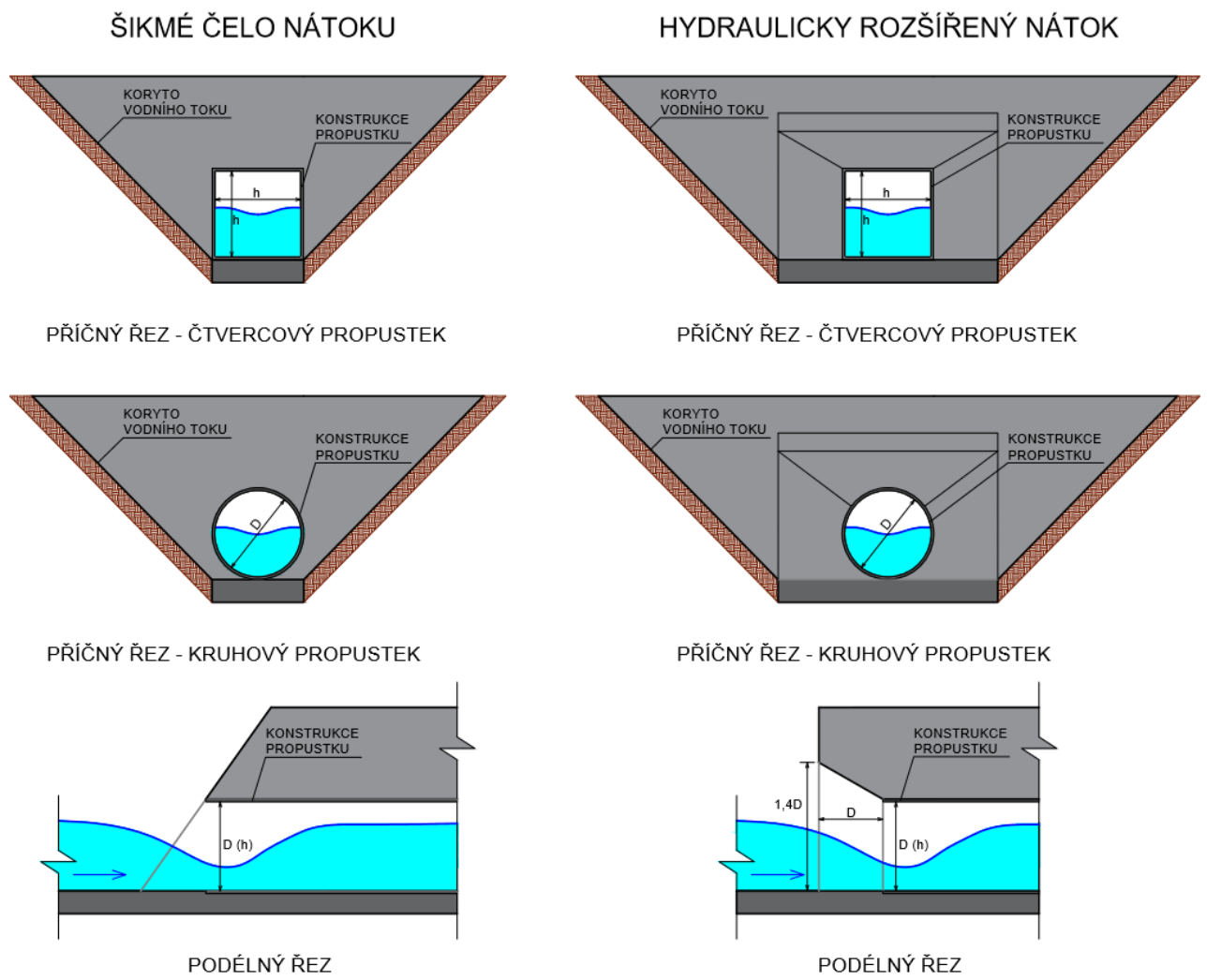
Konstrukční uspořádání vtokové a výtokové části propustků je velmi důležité z hlediska hydraulických ztrát. Například při ostrohranném vtoku do propustku je místní ztráta mnohem vyšší než při zaobleném vtoku, avšak zaoblený vtok je stavebně náročnější. Bohužel ale konstrukční složitost těchto úprav často převažuje nad jejich hydraulickými výhodami, a tak jsou ztráty ve většině praktických případů poměrně velké.[6]

Konstrukční řešení vtoku do propustku a výtoku z něj může mít mnoho podob. Na obrázcích Obr. 2.8 a Obr. 2.9 je možno vidět příčné a podélné řezy čtyř základních konstrukčních typů propustků. Jedná se o propustek s kolmým čelem, s předsazeným vtokem, se šikmým čelem a s hydraulicky rozšířeným nátokem. Pro upřesnění je zde uvedeno, že čelo propustku je konstrukce ukončující těleso propustku (tubus). Čela mohou být kolmá nebo šikmá, jež jsou výhodnější hned z několika důvodů. Mají nižší investiční náklady, netvoří tak nebezpečnou překážku jako čela kolmá a navíc zapadnou lépe do krajiny. Účelem hydraulicky rozšířeného nátoku do propustku je redukovat kontrakci proudu a tím zvýšit jeho průtočnou kapacitu. Na výtoku z propustku dochází ke zmenšení expanze proudu, což vede ke snížení ztráty na výtoku a rovněž ke zvýšení kapacity propustku. Konstrukční typ předsazený vtok se doporučuje spíše nenavrhopvat, jelikož nedávný výzkum prokázal, že při proudění o volné hladině zde dochází k pulzaci hladiny, a tím ke značné nestabilitě proudění v celém propustku. Pro výběr vhodného konstrukčního uspořádání jsou rozhodující nejen hydraulické výpočty a stabilita konstrukce, ale také estetický dojem.

Obr. 2.8 Konstrukční typ rovné čelo nátoku a předsazený vtok



Obr. 2.9 Konstrukční typ šikmé čelo nátoku a hydraulicky rozšířený nátok



3 HYDRAULIKA PROPUSTKŮ

Ač jsou propustky malými objekty a často mohou vypadat jako jednoduché konstrukce, jejich hydraulika je poměrně složitá. V hydraulickém výpočtu propustků je použito hned několik základních hydraulických principů, jako je proudění v potrubí, výtok otvorem nebo proudění s volnou hladinou. [10] Proudění v propustcích se liší v závislosti hned na několika faktorech, jako je tvar příčného průřezu, konstrukční uspořádání vtoku a výtoku, sklon, délka propustku a mnoho dalších. Proudění je většinou nerovnoměrné a může se vyskytovat jako proudění o volné hladině či tlakové a to buď v celém propustku, nebo pouze v jeho části. Režim proudění se zde může vyskytovat jak říční tak i bystřinný a při přechodu z režimu bystřinného na režim říční se v propustku může také objevit vodní skok. Vzhledem k tomu, kolik různých hydraulických jevů se může v propustku vyskytnout, je znovu připomínáno, že ačkoliv se jedná o jednoduchou konstrukci, hydraulika je zde složitá.

Hlavním úkolem při navrhování propustku je určit nejvíce ekonomickou variantu, která bude schopná provést návrhový průtok, aniž by překročil dovolenou úroveň hladiny před propustkem.

3.1 ZÁKLADNÍ ROVNICE

Dvěma základními rovnicemi pro výpočet proudění v propustku jsou bezesporu Bernoulliho rovnice vyjadřující zákon zachování mechanické energie a věta o hybnosti proudu, jež vyjadřuje zákon zachování hybnosti.

Jelikož tato kapitola obsahuje množství rovnic, nerovnic a jiných matematických formulací, je nutno určit, kde se které veličiny nacházejí. Jejich polohu definuje Obr. 3.1, který ukazuje názvy a polohy profilů v podélném řezu propustkem. V následujícím textu jsou již veličiny, jako jsou hloubky, rychlosti, atd. označeny dolním indexem s příslušným písmenem podle názvu profilu. Jsou zde však některé výjimky:

Profil A - vzhledem k poloze profilu A, jež se nachází před vtokem do propustku v tzv. horní vodě, jsou značeny veličiny dolním indexem h (např. y_h , v_h , atd.).

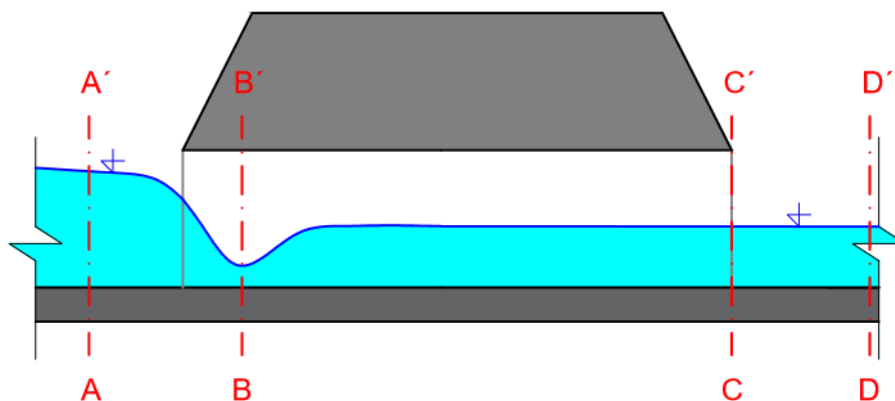
Profil B - poloha profilu B se nachází za vtokem do propustku, kde mohou nastat dvě situace. Jestliže hladina není ovlivněna dolní vodou, vytvoří se v profilu B zúžená hloubka, která je označována y_c . Pokud dojde k ovlivnění dolní vodou, vytvoří se v profilu B zatopená hloubka, která je označena dle názvu profilu, a to y_B .

Profil C - v profilu C, jež se nachází na výtoku z propustku, se mohou vyskytnout dvě situace. Buď je zde proudění o volné hladině, nebo proudění tlakové. V případě proudění o volné hladině jsou veličiny pojmenovány indexy dle názvu profilu (např. y_c). V případě tlakového proudění, kdy voda vyplňuje celý příčný profil propustku, se za hloubku bere hodnota průměru (D) či výšky (H) propustku.

Profil D - vzhledem k poloze profilu D, jež se nachází za výtokem z propustku v tzv. dolní vodě, jsou značeny veličiny s indexem d (např. y_D , v_D , atd.).

Pokud budou v rovnicích použity veličiny bez dolního indexu, vztahují se tyto veličiny k hodnotám, které se vyskytují uvnitř samotného tělesa propustku, v tzv. tubusu.

Obr. 3.1 Názvy a umístění příčných profilů v podélném řezu propustkem



3.1.1 BERNOULLIHO ROVNICE

Bernoulliho rovnice vyjadřuje zákon zachování mechanické energie. Bernoulliho rovnici v diferenciálním tvaru dostaneme vyjádřením Eulerovy rovnice průměty jednotlivých členů do osy myšlené trubice:

$$y + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = konst. \quad (3.1)$$

Celá levá strana této rovnice se souhrnně nazývá energetická výška a je složena ze tří výšek, jmenovitě polohové, tlakové a rychlostní:

| | | |
|--------------------|-----------------------|---|
| y | [m] | polohová výška nad srovnávací rovinou, též geodetická |
| $\frac{p}{\rho g}$ | [m] | tlaková výška, na niž vystoupí tekutina v piezometru |
| $\frac{v^2}{2g}$ | [m] | rychlostní výška, na niž vystoupí hladina v Pitotově trubici |
| p | [Pa] | tlak působící na tekutinu |
| v | [m.s ⁻¹] | rychlost pohybu tekutiny |
| ρ | [kg.m ⁻³] | měrná hmotnost tekutiny (pro vodu $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$) |
| g | [m.s ⁻²] | tíhové zrychlení ($g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$) |

- Tvar Bernoulliho rovnice pro **ustálené**, konzervativní a izotermické proudění **ideální** kapaliny platí pro dvě libovolné částice na téže proudnici a vypadá následovně:

$$y_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (3.2)$$

- Tvar Bernoulliho rovnice pro **neustálené** proudění **ideální** kapaliny obsahuje navíc na pravé straně člen y_s , jež vyjadřuje setrvačnou výšku. Tento tvar vypadá následovně:

$$y_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + y_s \quad (3.3)$$

y_s [m] setrvačná výška

- Bernoulliho rovnice pro **neustálené** proudění **skutečné** kapaliny však zahrnuje navíc ještě ztrátovou výšku Z_{CELK} mezi oběma uvažovanými profily. Ztrátová výška vzniká v důsledku tření kapaliny o stěny, vnitřního tření v kapalině a jiných hydraulických odporů, jež se vyskytují v hydraulickém systému. Bernoulliho rovnice za těchto podmínek vypadá následovně:

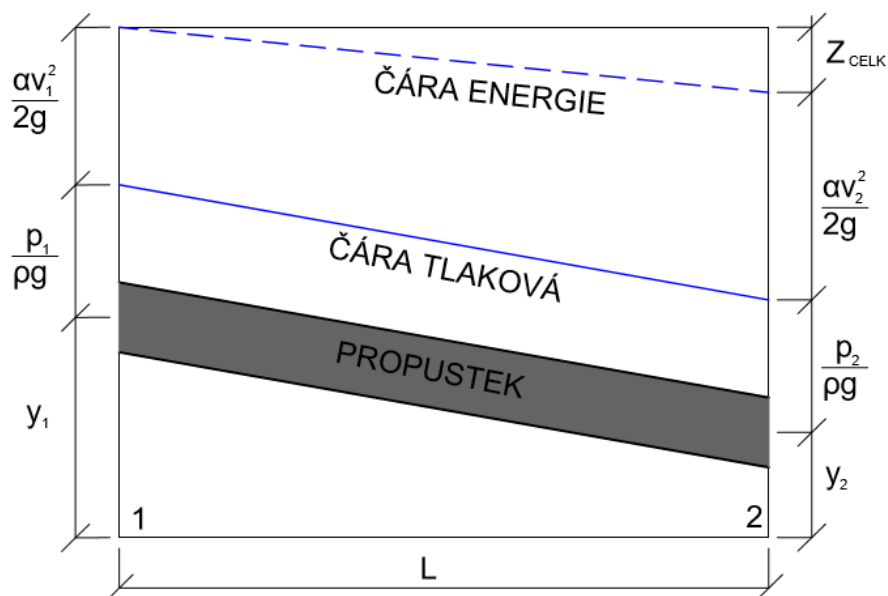
$$y_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_{CELK} + y_s \quad (3.4)$$

Z_{CELK} [m] celková ztrátová výška

- Bernoulliho rovnice v tomto tvaru platí pro *ustálené* proudění *skutečné* kapaliny, takže obsahuje pouze ztrátovou výšku, kdežto setrvačná výška už dále není uvažována:

$$y_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_{CELK} \quad (3.5)$$

Obr. 3.2 Jednotlivé výšky do Bernoulliho rovnice pro dva sousední profily



Pro reálné využití se použije Obr. 3.2, kde je patrné znázornění jednotlivých výšek. Jelikož v potrubí se rychlost v průřezích mění od bodu k bodu, je nutné rychlostní výšku doplnit o Coriolisovo číslo α . Toto číslo vyjadřuje poměr skutečné kinetické energie proudu ke kinetické energii vypočtené ze střední průřezové rychlosti. Je závislé na geometrickém tvaru průtočného profilu a na rozdělení rychlostí v tomto profilu. Hodnotu Coriolisova čísla je možno vyhledat v Tab. 3.1. [13]

Tab. 3.1 Hodnoty Coriolisova čísla v závislosti na ostatních podmínkách

| Coriolisovo číslo | Podmínky proudění |
|------------------------------|---|
| $\alpha > 1.0$ | Pokud nejsou rychlosti v průřezu stejné. |
| $1.02 \leq \alpha \leq 1.12$ | Při turbulentním proudění v kruhových potrubích. |
| $\alpha = 1.0$ | Při rychlostech do 3 m/s, jelikož rychlostní výška je sama o sobě malá a její oprava je tudíž zanedbatelná. |

Vzhledem k podmínkám vyskytujících se při běžných laboratorních experimentech bude nadále v této práci používána hodnota Coriolisova čísla α rovna jedné.

3.1.2 VĚTA O HYBNOSTI PROUDU

V hydraulických výpočtech je často používána Eulerova impulsová věta, neboli věta o změně hybnosti, která vyjadřuje pouze stavy na plochách omezujících uvažovanou část proudící tekutiny a pomíjí poměry uvnitř této tekutiny [13].

Základem věty o hybnosti je Newtonův zákon síly:

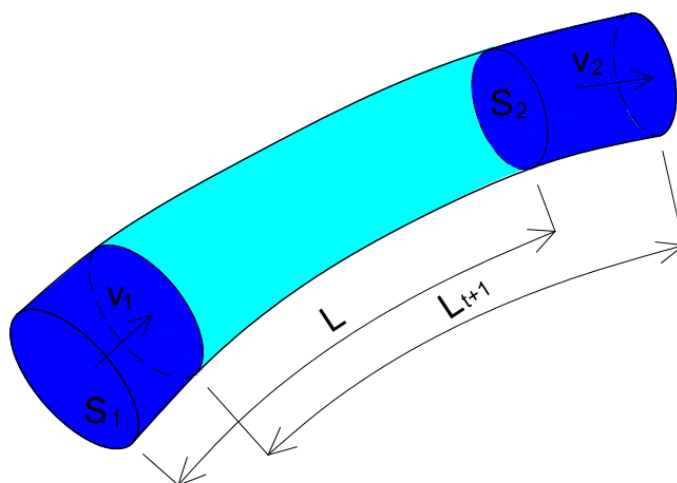
$$F = m \frac{dv}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} \quad (3.6)$$

| | | |
|------|----------------------|-------------------------------|
| F | [N] | síla působící na hmotný bod |
| m | [kg] | hmotnost hmotného bodu |
| dv | [m.s ⁻¹] | změna rychlosti hmotného bodu |
| dt | [s] | změna času |

Součin hmotnosti a rychlosti hmotného bodu tvoří dohromady veličinu zvanou hybnost. Integrací rovnice (3.6) dostaneme impulsovou větu pro čas t_1 až t_2 . Tato věta říká, že časová změna celkové hybnosti hmotného bodu se rovná výslednici vnějších sil působící na tento bod:

$$mv_1 - mv_2 = \int_{t_1}^{t_2} F dt \quad (3.7)$$

Obr. 3.3 Schéma proudového vlákna k objasnění věty o hybnosti



Z Obr. 3.3 je patrné, že za čas dt ubyde hmota dm_1 a přibude hmota dm_2 :

$$dm_1 = \rho S_1 v_1 dt \quad dm_2 = \rho S_2 v_2 dt \quad (3.8)$$

| | | |
|-----|-------------------|--|
| S | [m ²] | obsah průtočného průřezu proudového vlákna |
|-----|-------------------|--|

Platí též rovnice kontinuity:

$$dm_1 = dm_2 \quad (3.9)$$

Vyjádření hybnosti ve vstupním a výstupním průřezu je tedy:

$$dmv_1 = \rho S_1 v_1^2 = \rho Q v_1 \quad dmv_2 = \rho S_2 v_2^2 = \rho Q v_2 \quad (3.10)$$

Q [m³·s⁻¹] objemový průtok

Obecně tedy platí, že výslednice vnějších sil působící na uvažovaný úsek proudu je v rovnováze s rozdílem hybností ve vstupním a výstupním profilu.

$$\Sigma F = \rho Q (v_2 - v_1) \quad (3.11)$$

Vnějšími působícími silami jsou síly tlakové vyjádřené výrazem:

$$F = pS \quad (3.12)$$

Potom věta o hybnosti pro jednorozměrné proudění ve směru osy x je následující [12]:

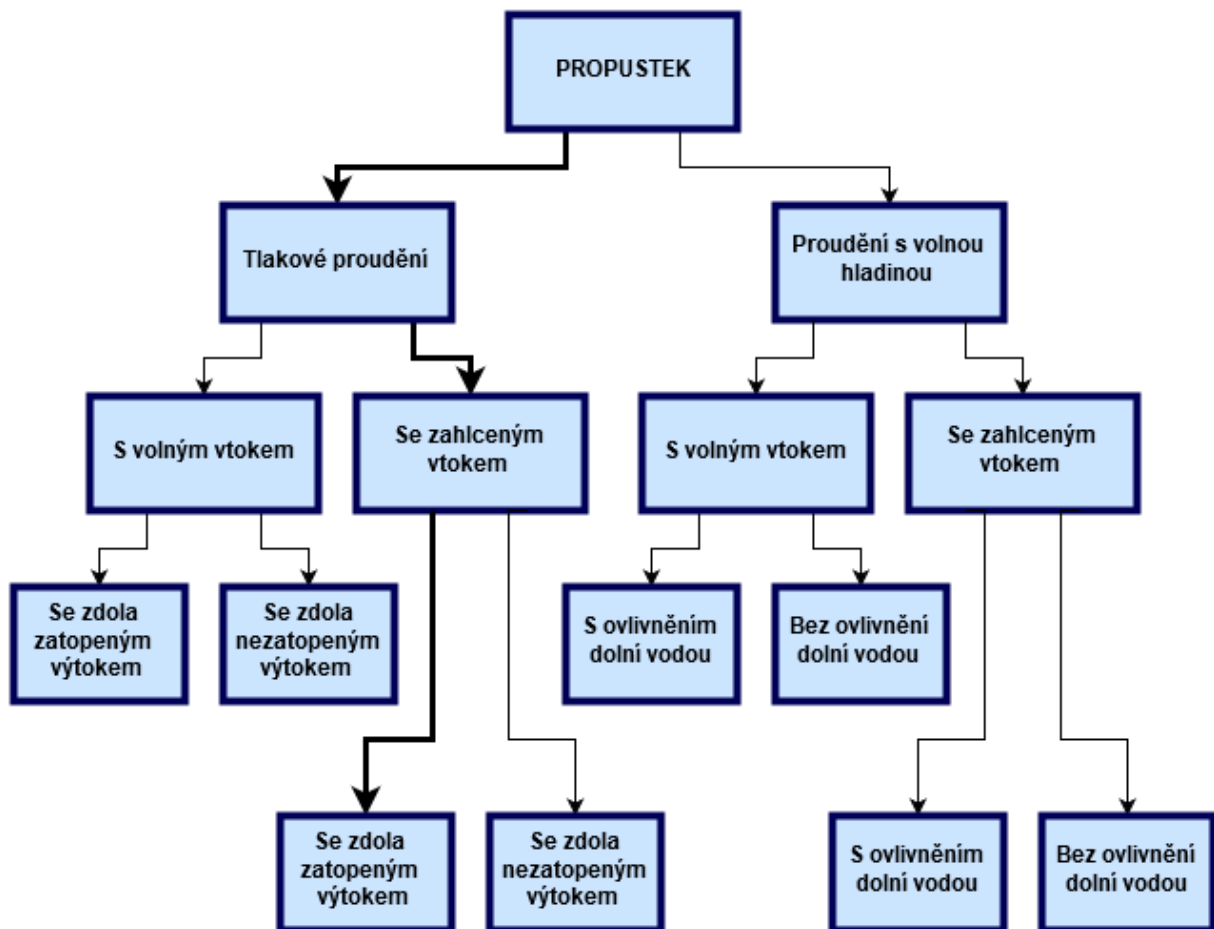
$$p_1 S_1 - p_2 S_2 = \rho Q v_2 - \rho Q v_1 \quad (3.13)$$

pS [N] tlaková síla na vstupním (výstupním) profilu
 v [m·s⁻¹] průřezová rychlost ve vstupním (výstupním) profilu
 ρ [kg·m⁻³] měrná hmotnost tekutiny
 Q [m³·s⁻¹] objemový průtok

3.2 STAVY A REŽIMY PROUDĚNÍ V PROPUSTKU

Proudění v propustcích může probíhat v nejrůznějších stavech a režimech. Jejich základní dělení je na proudění tlakové a proudění o volné hladině. Dále jsou pak rozlišovány situace, kdy je vtok do propustku zahlcen či zůstává volný a také situace, kdy je či není proudění v propustku ovlivněno dolní vodou. Pro jednoduchost je rozlišení nejrůznějších stavů a režimů proudění uvedeno v následujícím diagramu na Obr. 3.4, který ukazuje možné varianty, jak může proudění v propustku vypadat.

Obr. 3.4 Dělení stavů a režimů proudění v propustku



Pro lepší představu o tom, jak mohou jednotlivé stavy vypadat, je v následující podkapitole 3.2.1 uvedeno všech 8 typů proudění tak, jak je možno je vidět v diagramu na Obr. 3.4. Rovněž je zde pro každý typ znázorněn i průběh hladiny v podélném řezu. Pro zajímavost je na tomto místě taktéž uveden fakt, že dle Kunštátského [15] existuje 95 možných způsobů průběhů hladin, zatímco v této práci je tento počet redukován na základních 8 typů.

3.2.1 PRŮBĚHY HLADIN

Typ proudění vyskytující se v propustku je závislý na jeho třech již zmíněných hlavních částech. Jmenovitě na vtokové části, samotné konstrukci propustku a výtokové části. V jednotlivých částech hrají roli následující vlastnosti:

A) **vtoková část** – ve vtokové části hraje hlavní roli hloubka horní vody před vtokem do propustku a geometrické uspořádání vtoku do propustku

B) **konstrukce propustku** – u konstrukce propustku je hlavní vlastností drsnost vnitřních stěn potrubí, velikost a tvar příčného průřezu potrubí a v neposlední řadě délka a podélný sklon konstrukce propustku

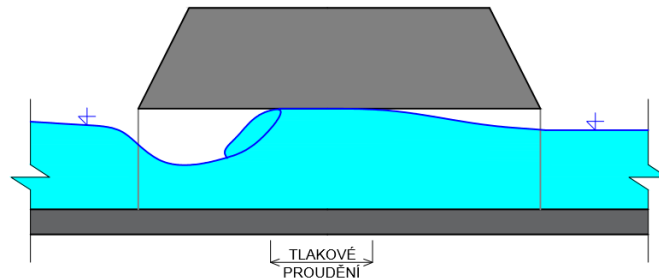
C) **výtoková část** – u výtoku z propustku je důležitým parametrem hloubka dolní vody za výtokem z propustku a geometrické uspořádání výtoku z propustku [7]

Jak již bylo zmíněno v předchozím textu, v konstrukci propustku je důležitým parametrem délka a sklon propustku. Lze tedy rozlišovat propustky hydraulicky krátké a dlouhé. Zda je propustek hydraulicky krátký či dlouhý závisí kromě délky a sklonu na několika dalších parametrech jako je velikost a tvar příčného průřezu, geometrické uspořádání vtoku a výtoku a hloubka horní vody. Propustek se nazývá hydraulicky krátký, jestliže propustek není dostatečně dlouhý na to, aby se zúžená hloubka y_c dále propagovala a zvyšovala až by voda zaplnila celý profil propustku. Pokud však zúžená hloubka expanduje v takové míře, že po nějaké určité vzdálenosti zaplní celý profil, jde o propustek hydraulicky dlouhý. [7]

Typ 1 Tlakové proudění s volným vtokem a zdola nezatopeným výtokem

Jak lze pozorovat na Obr. 3.5 vtok do propustku není zahlcen a současně výtok z propustku zůstává volný. Pak situace vypadá tak, že tlakové proudění se vyskytuje pouze v části propustku, tam kde se hladina dotýká stropu propustku a vyplňuje tak celý jeho profil.

Obr. 3.5 Schéma průběhu hladiny pro typ 1

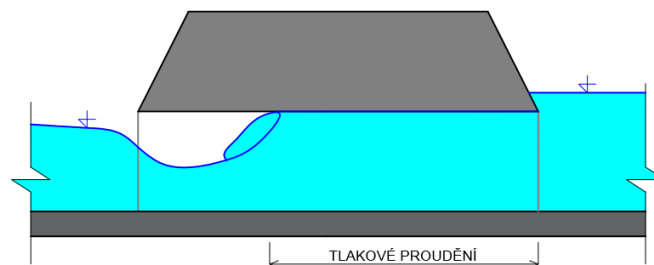


Výskyt takového stavu v běžné praxi není žádoucí, jelikož zde může docházet k pulzacím hladiny, což může narušovat stabilitu celé konstrukce. Je tudíž silně doporučeno propustky, v nichž se může vyskytovat proudění částečně tlakovému a částečně o volné hladině, nenavrhopvat. Rovnice pro výpočet zde tedy nebude uvedena.

Typ 2 Tlakové proudění s volným vtokem a zdola zatopeným výtokem

Důvodem vzniku tlakového proudění u konce propustku může být vytvoření zpětného tlaku daného vysokou úrovní hladiny dolní vody za propustkem. Bez ohledu na příčinu, je kapacita propustku v tlakovém režimu proudění ovlivněna podmínkami před i za objektem a hydraulickými charakteristikami propustku. V tomto režimu je propustek v koncové části své délky celý vyplněn vodou.

Obr. 3.6 Schéma průběhu hladiny pro typ 2



Jak již bylo popsáno u předchozího typu, je silně doporučeno nenavrhopvat propustky, v nichž se může vyskytovat proudění částečně tlakovému a částečně o volné hladině.

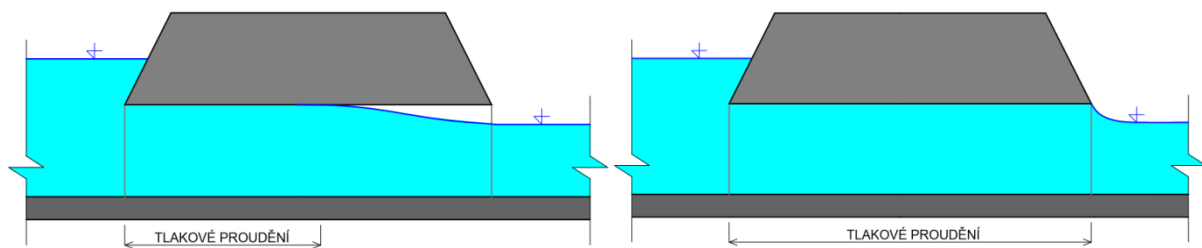
Typ 3 Tlakové proudění se zahlceným vtokem a zdola nezatopeným výtokem

U tohoto typu mohou nastat hned dvě situace. První případ proudění lze vidět na Obr. 3.7 vlevo, kdy část proudění probíhá v tlakovém režimu a část v režimu o volné hladině. Naopak druhý případ proudění na Obr. 3.7 vpravo již znázorňuje stav, kdy už je celý profil propustku vyplněn vodou a není zatopen pouze výtok. Rozdíl mezi těmito dvěma případy proudění později objasní podkapitola 3.2.2.

Již bylo uvedeno, že pokud se v propustku vyskytuje částečně proudění tlakové, a částečně o volné hladině, je doporučeno takovéto propustky nenavrhopat, a proto se následující text bude zabývat pouze druhým případem z Obr. 3.7 vpravo.

Jestliže průtok vedený propustkem má kritickou hloubku větší, než je výška popřípadě průměr potrubí propustku, pak bude proudění takové, že bude vyplňovat celý příčný průřez i za podmínky, že úroveň hladiny dolní vody bude níž než strop propustku na výtoku (viz Obr. 3.7 vpravo). V tomto případě je kapacita propustku ovlivněna především úrovní hladiny horní vody a ztrátami v celém propustku [2].

Obr. 3.7 Schéma průběhu hladiny pro typ 3



Hydraulický výpočet pro druhý případ bude tedy obsahovat Bernoulliho rovnici. Jak lze pozorovat v rovnici (3.14), geodetická výška v profilu C na výtoku je uvažována hodnotou průměru profilu propustku a rychlostní výška je pro nezatopený výtok počítána z rychlosti proudění v propustku. Bernoulliho rovnice pro profil A na vtoku a profil C na výtoku, kde je hloubka rovna vnitřnímu průměru propustku:

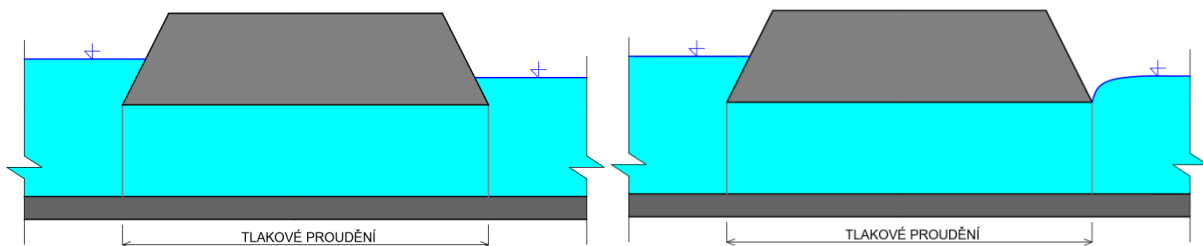
$$y_h + \frac{\alpha v_h^2}{2g} + i_0 L = D + \frac{\alpha v^2}{2g} + Z_z + \lambda \frac{L v^2}{D 2g} \quad (3.14)$$

| | | |
|-----------|----------------------|--|
| y_h | [m] | hloubka vody v profilu A před vtokem do propustku |
| α | [-] | Coriolisovo číslo |
| g | [m·s ⁻²] | tíhové zrychlení |
| i_0 | [-] | podélný sklon dna propustku |
| L | [m] | délka tělesa propustku |
| D | [m] | průměr trubního propustku |
| v | [m·s ⁻¹] | rychlost proudění v propustku |
| Z_z | [m] | ztrátová výška zúžením proudu |
| λ | [-] | součinitel ztráty třením |
| v_h | [m·s ⁻¹] | střední průřezová rychlost v profilu A před vtokem [8] |

Typ 4 Tlakové proudění se zahlceným vtokem a zdola zatopeným výtokem

V případě, kdy je zatopen výtok z propustku a současně i vtok do propustku, bude proudění v tlakovém režimu po celé délce a bude tak vodou vyplněn celý příčný profil. V tomto případě je kapacita propustku ovlivněna především úrovní hladiny dolní vody a ztrátami v celém propustku, bez ohledu na podélný sklon propustku.

Obr. 3.8 Schéma průběhu hladiny pro typ 4



Výpočet bude probíhat jako u tlakového proudění v potrubí a ztráta bude vypočtena jako suma místní ztráty na vtoku, ztráty třením a místní ztráty na výtoku. Výtok se v tomto případě řeší jako součást tlakového proudění, takže místní ztráta na výtoku se dopočte jako ztráta rozšířením průřezu. Jak lze pozorovat v rovnici (3.15), geodetická výška v profilu D je uvažována hodnotou hloubky dolní vody a rychlostní výška je počítána z rychlosti, která se vyskytuje taktéž v profilu D v dostatečné vzdálenosti za výtokem z propustku. Oproti typu 3 ještě v rovnici na pravé straně přibyla ztráta rozšířením proudu, jejíž výpočet popisuje rovnice (3.16).

Bernoulliho rovnice pro profil A – A' na vtoku a profil D – D' za výtokem, kde je již hloubka y_D :

$$y_h + \frac{\alpha v_h^2}{2g} + i_0 L = y_D + \frac{\alpha v_D^2}{2g} + Z_z + \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + Z_r \quad (3.15)$$

| | | |
|-------|----------------------|--|
| y_D | [m] | hloubka vody v korytě za výtokem |
| v_D | [m·s ⁻¹] | střední průřezová rychlost v korytě za výtokem |
| Z_r | [m] | ztrátová výška rozšířením proudu [8] |

$$Z_r = Z_{Borda} = \frac{(v - v_D)^2}{2g} \quad (3.16)$$

Typ 5 Proudění s volnou hladinou a volným vtokem bez ovlivnění dolní vodou

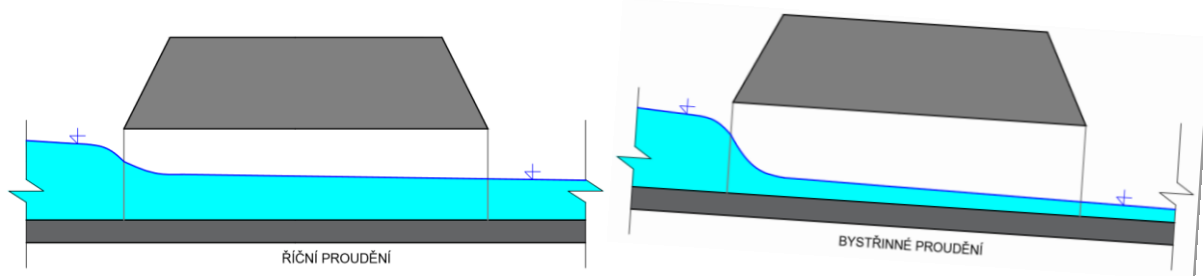
Při tomto typu proudění je volná hladina po celé délce propustku, včetně vtoku a výtoku. Voda v žádné části nevyplňuje celou plochu příčného profilu propustku. Stejně jako proudění v otevřeném korytě může být proudění v propustku kategorizováno jako říční, kritické nebo bystřinné.

Jestliže je hydrostatická výška před vtokem do propustku menší než $1.2 D$, pak se do tělesa propustku dostane společně s vodou i vzduch a proudění je tak nadále charakterizováno jako proudění o volné hladině. V tomto případě je kapacita propustku ovlivněna především podélným sklonem propustku a třením, jako je tomu u proudění vody v otevřených korytech. V rámci tohoto typu může nastat několik situací proudění. Nejčastěji je rozdělujeme dle podélného sklonu na propustky s malým či velkým sklonem.

Pokud jde o propustek s **malým sklonem**, úroveň hladiny se po délce postupně snižuje směrem k výtoku z propustku, až je dosaženo hloubky rovnoměrného říčního proudění, jak lze vidět na Obr. 3.9 vlevo.

Pokud jde naopak o propustek s **velkým sklonem**, přichází voda do propustku za kritické hloubky a poměrně rychle se tato hloubka snižuje, až je dosaženo hloubky rovnoměrného bystřinného proudění. [10]

Obr. 3.9 Schéma průběhu hladiny pro typ 5



Pro hydraulický výpočet vzduuté hloubky před propustkem se použije Bernoulliho rovnice pro profil A a profil B:

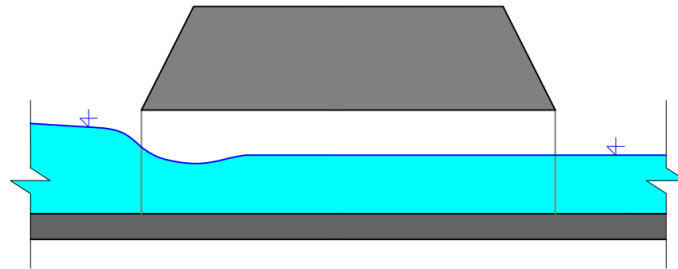
$$y_h + \frac{\alpha v_h^2}{2g} + i_0 L = y_c + \frac{\alpha v_c^2}{2g} + Z_{VTZ} \quad (3.17)$$

| | | |
|-----------|--------------------|---|
| y_c | [m] | zúžená hloubka vody v profilu B za vtokem do propustku |
| v_c | $[m \cdot s^{-1}]$ | střední průřezová rychlost v profilu B v zúžené proudnici za vtokem |
| Z_{VTZ} | [m] | místní ztráta na vtoku do propustku zúžením proudu |

Typ 6 Proudění s volnou hladinou a volným vtokem s ovlivněním dolní vodou

Při tomto typu proudění je volná hladina v celém propustku a voda v žádném profilu nevyplňuje celou plochu příčného průřezu propustku. Vtok do propustku je v každém případě volný a ihned za ním v profilu B dojde k zatopení zúžené hloubky y_c hloubkou y_B jelikož je proudění ovlivňováno dolní vodou. Tento jev lze pozorovat na Obr. 3.10.

Obr. 3.10 Schéma průběhu hladiny pro typ 6



Pro výpočet vzduché hladiny před propustkem za tohoto typu proudění se využije Bernoulliho rovnice pro profil A – A' a profil B – B':

$$y_h + \frac{\alpha v_h^2}{2g} + i_0 L = y_B + \frac{\alpha v_c^2}{2g} + Z_{VTZ} \quad (3.18)$$

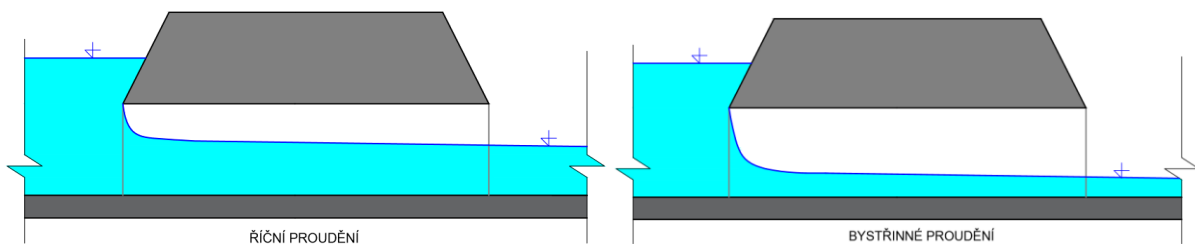
| | | |
|-------|----------------------|---|
| y_B | [m] | zatopená hloubka vody v profilu B za vtokem do propustku |
| v_c | [m·s ⁻¹] | střední průřezová rychlost v profilu B v zúžené proudnici za vtokem |

Typ 7 Proudění s volnou hladinou a zahlceným vtokem bez ovlivnění dolní vodou

V tomto případě je celý světlý průřez vtokového otvoru zcela zaplněn vodou, hladina vody před vtokem je výše než strop propustku, avšak ve zbývajících částech propustku je hladina volná. Propustek není dále ovlivněn dolní vodou. V tomto případě je proud, jenž vstupuje do propustku ihned za vtokem rapidně zúžen a minimální hloubka, která se v propustku objeví, se nazývá zúžená hloubka y_c . Tato zúžená hloubka se rovněž vyskytuje v případě výtoku vody pod stavidlem. Čím je paprskem více zúžený, tím větší rychlost se nachází v jeho profilu a tato vysoká rychlost je však postupem délky snižována díky tření o stěny propustku. Příklad průběhu hladiny při tomto typu proudění lze vidět na Obr. 3.11. [7]

Jestliže vtok do propustku je zatopen a výtok z propustku není ovlivněn dolní vodou a současně se jedná o hydraulický krátký propustek, pak nastává rozlišení v závislosti na sklonu. Pokud je sklon malý, dochází k nárůstu hladiny, pokud je naopak sklon velký, dochází k ještě většímu poklesu hladiny.

Obr. 3.11 Schéma průběhu hladiny pro typ 7

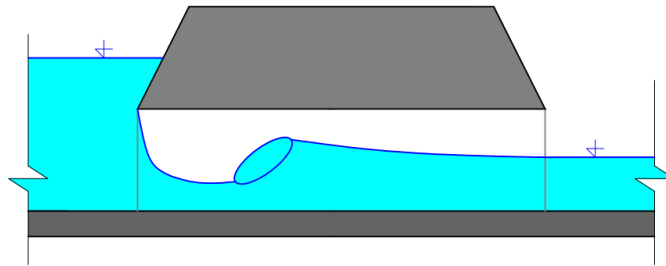


V tomto případě probíhá hydraulický výpočet metodou po úsecích, jako je tomu při proudění v korytech. Bude-li se jednat o říční proudění, bude směr výpočtu takzvaně proti proudu, bude-li se naopak jednat o bystrinné proudění, bude výpočet postupovat takzvaně po proudu.

Typ 8 Proudění s volnou hladinou a zahlceným vtokem s ovlivněním dolní vodou

V tomto případě je celý světlý průřez vtokového otvoru zcela zaplněn vodou, hladina vody před vtokem je výše než strop propustku, avšak ve zbývajících částech propustku je volná hladina. Těsně za vtokem do propustku v profilu B dochází ke vzniku zúžené hloubky y_c a vyskytují se zde vysoké rychlosti, což znamená, že se zde vyskytuje proudění bystřinného charakteru. Proudění za výtokem z propustku má říční charakter, a jelikož zde dochází k ovlivnění dolní vodou, vznikne uvnitř tubusu vodní skok, který je možno pozorovat na Obr. 3.12.

Obr. 3.12 Schéma průběhu hladiny pro typ 8



V tomto případě probíhá hydraulický výpočet metodou po úsecích, jako je tomu při proudění v korytech. Bude-li se jednat o říční proudění, bude směr výpočtu takzvaně proti proudu, bude-li se naopak jednat o bystřinné proudění, bude výpočet postupovat takzvaně po proudu. Vodní skok se vypočítá dle základních hydraulických principů.

Pro přehlednost byla vytvořena tabulka se základními odlišnostmi jednotlivých, výše popsaných typů.

Tab. 3.2 Přehled charakteristik jednotlivých typů proudění

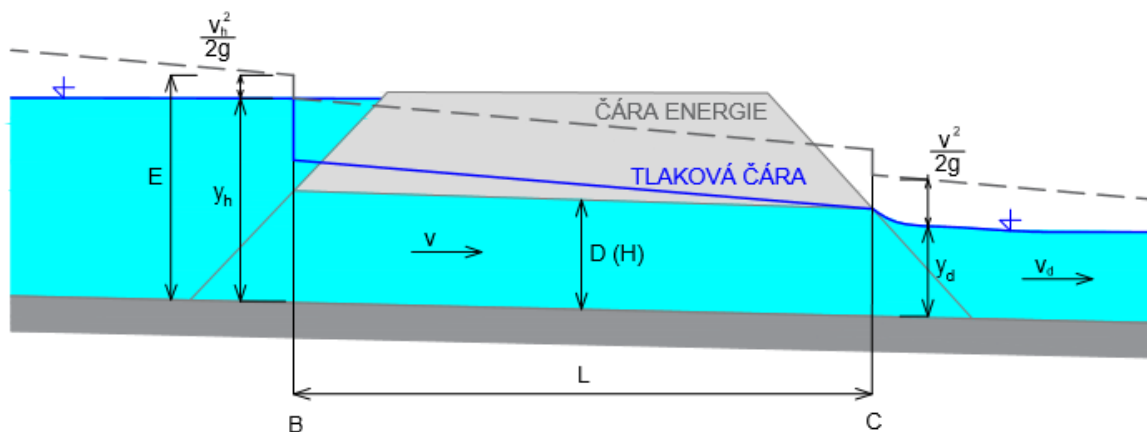
| Typ | Vtok zatopen | Výtok zatopen/ ovlivnění dolní vodou | Proudění | Výpočet |
|-----|--------------|---|-----------------|--|
| 1 | ne | ne | v části tlakové | Tento typ nenavrhopat |
| 2 | ne | ano | v části tlakové | Tento typ nenavrhopat |
| 3 | ano | ne | v části tlakové | Tento typ nenavrhopat / Bernoulli rovnice mezi profily A - C |
| 4 | ano | ano | tlakové | Bernoulli rovnice mezi profily A - D |
| 5 | ne | ne | o volné hladině | Bernoulli rovnice mezi profily A - B |
| 6 | ne | ano | o volné hladině | Bernoulli rovnice mezi profily A - B |
| 7 | ano | ne | o volné hladině | Metodou po úsecích |
| 8 | ano | ano | o volné hladině | Metodou po úsecích |

Tato práce se nadále bude věnovat tlakovému proudění v propustku se zahlceným vtokem, což odpovídá typům 3 a 4. Rozdílnost mezi typem 3 a typem 4 je zatopení výtoku dolní vodou. Kritérium pro rozlišení, zda se jedná o výtok zatopený či nezatopený, je výška hladiny za výtokem z propustku. Podrobněji se této problematice věnuje následující podkapitola 3.2.2.

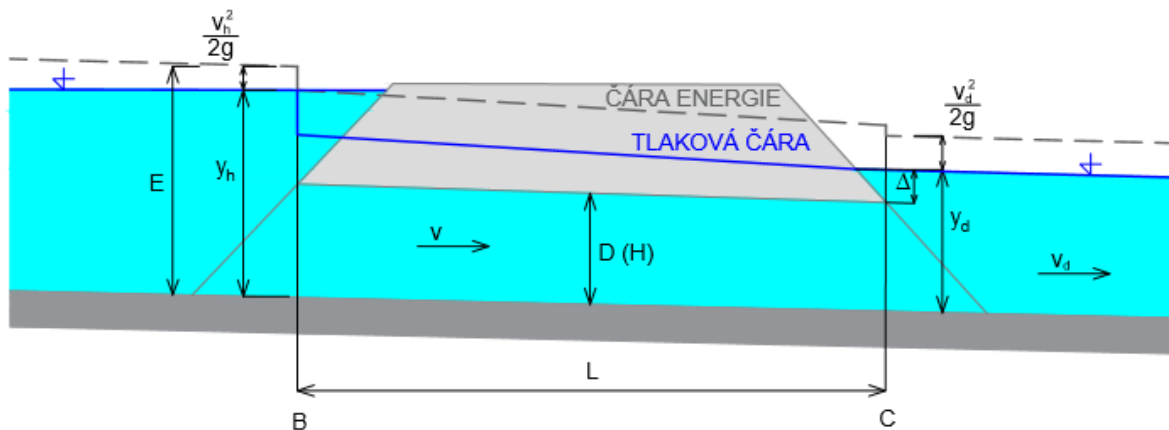
3.2.2 PODMÍNKA ZATOPENÍ DOLNÍ VODOU

Jak již bylo zmíněno, u propustků v tlakovém režimu proudění na celé délce se může vyskytovat výtok zatopený či nezatopený. Pro pochopení problematiky je nutné si objasnit pojem strop propustku, který lze definovat jako vnitřní horní hranu příčného průřezu propustku. Na Obr. 3.13 je vyobrazen propustek nezatopený dolní vodou a je možné sledovat pokles hladiny těsně za výtokem z propustku. Naproti tomu Obr. 3.14 znázorňuje propustek zatopený dolní vodou a je z něj patrné, že úroveň hladiny dolní vody je výš než strop propustku.

Obr. 3.13 Tlakové proudění propustkem s výtokem nezatopeným dolní vodou



Obr. 3.14 Tlakové proudění propustkem s výtokem zatopeným dolní vodou



Zda se jedná o výtok zatopený nebo nezatopený dolní vodou je možno určit pomocí rovnice (3.19) vyjadřující minimální převýšení úrovně dolní vody nad stropem propustku:

$$\Delta_{min} = \frac{v_D \cdot (v - v_D)}{g} \quad (3.19)$$

| | | |
|----------------|----------------------|---|
| Δ_{min} | [m] | minimální převýšení dolní vody nad stropem propustku |
| v_D | [m·s ⁻¹] | střední průřezová rychlost v profilu D za výtokem z propustku |
| v | [m·s ⁻¹] | rychlost proudění v propustku |

Skutečné převýšení hladiny dolní vody nad stropem propustku je možno vidět na Obr. 3.15 a je dáno vztahem:

pro obdélníkový propustek:

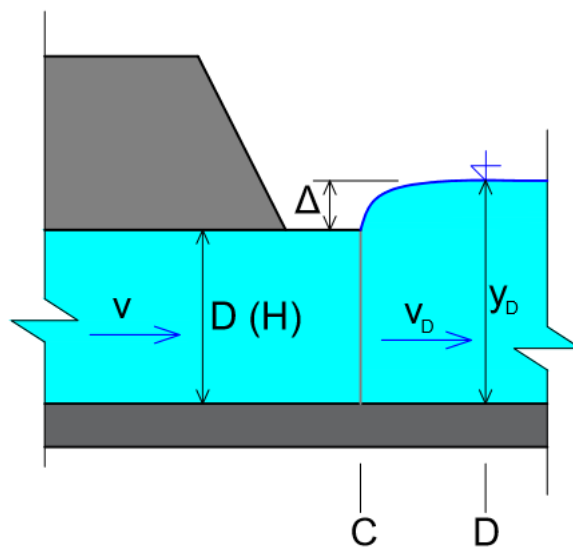
$$\Delta_{real} = y_D - H \quad (3.20)$$

pro kruhový propustek:

$$\Delta_{real} = y_D - D \quad (3.21)$$

Δ_{real} [m] skutečné převýšení dolní vody nad stropem propustku
 y_D [m] hloubka vody nade dnem za výtokem z propustku

Obr. 3.15 Znárodnění skutečného převýšení hladiny dolní vody nad stropem propustku



Pokud je skutečné převýšení úrovně hladiny dolní vody nad stropem propustku větší než minimální ($\Delta_{real} > \Delta_{min}$), jedná se o výtok zatopený dolní vodou. Pokud je naopak reálné převýšení menší než minimální ($\Delta_{real} < \Delta_{min}$), je výtok dolní vodou nezatopený.

Podmínkou zatopení výtoku z propustku se tato práce zabývá především z toho důvodu, že provedený výzkum, jenž je popsán dále, probíhal při současně zatopeném vtoku i výtoku. Tato charakteristika odpovídá již popsanému typu 4, kdy proudění je v tlakovém režimu po celé délce propustku.

Rovnice (3.19) pro určení Δ_{min} je však primárně určena pro výtok do velké nádrže. Byly provedeny výpočty s experimentálně naměřenými daty, jimiž bylo ověřeno, že je tento výraz možno použít i pro případ propustků s průběhem hladin jako u typu 4. Ověření ukazuje následující Tab. 3.3. Ve třetím sloupci je patrné, že nerovnice $\Delta_{real} > \Delta_{min}$, platí ve všech případech. Ve čtvrtém sloupci je naopak vidět, že ve všech změřených případech byla hloubka h_x těsně zavýtokem z propustku větší, než průměr propustku, což dokazuje, že výtok byl skutečně zatopen.

Tab. 3.3 Ověření vzorce pro zatopení dolní vodou

| Δ_{\min} [cm] | Δ_{real} [cm] | $\Delta_{\text{real}} > \Delta_{\min}$ | $h_x > D$ |
|----------------------|-----------------------------|--|-----------|
| 3.64 | 12.00 | ANO | ANO |
| 3.99 | 9.53 | ANO | ANO |
| 4.20 | 8.22 | ANO | ANO |
| 4.44 | 6.84 | ANO | ANO |
| 2.01 | 16.54 | ANO | ANO |
| 2.33 | 11.99 | ANO | ANO |
| 2.63 | 8.79 | ANO | ANO |
| 2.67 | 8.42 | ANO | ANO |
| 3.30 | 3.43 | ANO | ANO |
| 1.18 | 15.19 | ANO | ANO |
| 1.35 | 11.13 | ANO | ANO |
| 1.56 | 7.50 | ANO | ANO |
| 1.73 | 5.06 | ANO | ANO |
| 1.91 | 2.82 | ANO | ANO |
| 0.53 | 14.60 | ANO | ANO |
| 0.63 | 9.92 | ANO | ANO |
| 0.74 | 5.76 | ANO | ANO |
| 0.82 | 3.54 | ANO | ANO |
| 0.90 | 1.60 | ANO | ANO |
| 0.22 | 2.27 | ANO | ANO |
| 0.23 | 0.92 | ANO | ANO |
| 5.16 | 13.58 | ANO | ANO |
| 5.40 | 12.41 | ANO | ANO |
| 5.70 | 10.95 | ANO | ANO |
| 6.07 | 9.12 | ANO | ANO |
| 3.05 | 15.71 | ANO | ANO |
| 3.59 | 11.34 | ANO | ANO |
| 3.85 | 9.41 | ANO | ANO |
| 4.13 | 7.10 | ANO | ANO |
| 4.25 | 5.87 | ANO | ANO |
| 1.75 | 15.13 | ANO | ANO |
| 2.11 | 10.16 | ANO | ANO |
| 2.32 | 7.10 | ANO | ANO |
| 2.41 | 5.33 | ANO | ANO |
| 2.42 | 3.12 | ANO | ANO |
| 0.78 | 14.95 | ANO | ANO |
| 0.95 | 9.71 | ANO | ANO |
| 1.07 | 5.58 | ANO | ANO |
| 1.08 | 3.51 | ANO | ANO |
| 1.00 | 1.46 | ANO | ANO |
| 0.27 | 3.58 | ANO | ANO |
| 0.23 | 0.78 | ANO | ANO |

3.3 ZTRÁTY V PROPUSTKU

Celková ztráta, jež vzniká při proudění v propustku, se skládá ze tří částí. Zaprvé z místní ztráty na vtoku, která představuje ztrátu zúžením a následným rozšířením proudu. Druhou ztrátou je ztráta třením po celé délce propustku. Třetí částí je místní ztráta na výtoku, která představuje ztrátu rozšířením průřezu. Na rozdíl od ztráty rozšířením v potrubí se však nejedná o přechod z tlakového režimu proudění do tlakového, ale o přechod z tlakového proudění do režimu o volné hladině. Místní ztrátě na výtoku se nadále bude podrobně věnovat tato práce, jejíž hlavním cílem je zpřesnění dosud používaných výpočtů ztráty na výtoku.

$$Z_{CELK} = Z_{VT} + Z_{TŘ} + Z_{VÝT} \quad (3.22)$$

| | |
|----------------|--------------------------------------|
| Z_{CELK} [m] | celková ztrátová výška |
| Z_{VT} [m] | ztrátová výška na vtoku do propustku |
| $Z_{TŘ}$ [m] | ztrátová výška způsobená třením |
| $Z_{VÝT}$ [m] | ztrátová výška na výtoku z propustku |

O významnosti jednotlivých dílčích ztrát se podrobněji zmiňuje kapitola 9.3, ve které jsou uvedeny tabulky s jednotlivými procentuálními zastoupeními dílčích ztrát na ztrátě celkové.

3.3.1 ZTRÁTY MÍSTNÍ

Následující text popisuje místní ztráty tak, jak jsou známé při řešení potrubí. To znamená, že ve vstupním i výstupním profilu se nachází proudění tlakové a tekutina tak vyplňuje celý příčný profil. Hydraulické ztráty místní vznikají každou změnou směru proudu tekutiny nebo změnou průřezu potrubí ve tvarovkách, ohybech, kolenech, odbočkách, v rozšiřujících se či zužujících se potrubích. U dlouhých potrubí převažují ztráty třením nad ostatními ztrátami. Propustky jsou však konstrukce krátké, a tak mají ztráty třením jen velmi malý podíl na celkové ztrátě a pozornost je soustředěna především na ztráty místní. Místní hydraulické ztráty je možno dělit do 5 kategorií dle toho, jaká situace v potrubí nastane:

1. Změna průřezu - rozšíření nebo zúžení - náhlé či v difuzoru nebo konfuzoru, atd.
2. Změna směru - kolena, kruhové oblouky, jinak zakřivená potrubí, atd.
3. Dělení proudu - rozvětvené potrubí, výtlačné odbočky, tvarovky typu T, atd.
4. Spojení proudů - přípojky, sací odbočky, tvarovky typu T, atd.
5. Uzávěry, škrtky a regulační zařízení - stavítka, šoupátka, ventily, kohouty, klapky, atd.

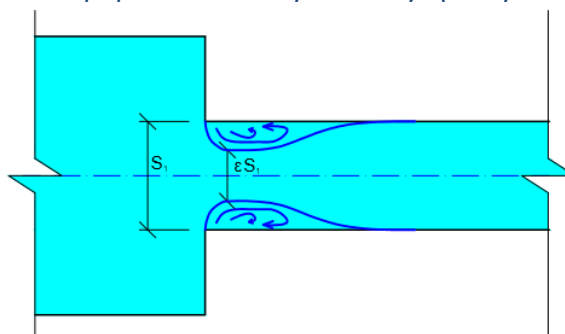
Ztráta energie v místních odporech se projevuje odtržením proudu od stěny a tvorbou podružných proudů a vírů, jak ukazuje Obr. 3.16. Víry, jež se vytvoří v místním odporu, se propagují i za místním odporem a rozpadají se až ve značné délce za místem svého vzniku. Obecně se ztrátová výška určuje jako součin bezrozměrného ztrátového součinitele ξ a rychlostní výšky:

$$Z_M = \xi \frac{v^2}{2g} \quad (3.23)$$

| | | |
|-------|-----|--|
| Z_M | [m] | ztrátová výška způsobená místním odporem |
| ξ | [-] | ztrátový součinitel |

Hodnoty ztrátových součinitelů ξ však platí pouze za určitých podmínek. Údaje v odborné a firemní literatuře nevedou vždy ke skutečným hodnotám ztrát ve tvarovce nebo armatuře. Výrobci udávají pro bezpečnost až o 50 % vyšší hodnoty [13]. U dlouhých potrubí, kde převažují ztráty třením, tento fakt není až tak důležitý. Avšak u propustků, jež jsou potrubími krátkými a místní ztráty zde převažují nad ztrátami třením, je volba hodnot ztrátových součinitelů velmi důležitá.

Obr. 3.16 Znázornění odtržení paprsku od stěny a tvorby zpětných vírů



3.3.2 ZTRÁTY TŘENÍM

Na rozdíl od mostních objektů je u propustků délka významným rozměrem vzhledem k příčnému profilu, z čehož plyne, že není možné zanedbat ztráty třením, jako je tomu u mostních objektů. Jediným případem, kdy ztráty třením zanedbat lze, je hydraulicky krátký propustek s velmi malou drsností stěn. Pokud je tedy propustek dlouhý a drsnost stěn propustku relativně vysoká, vznikají tedy mezi počátečním a koncovým profilem propustku nejen ztráty místní, ale i ztráty třením. Ty mají za následek klesající tendenci čáry energie i čáry tlakové při znázorňování ztrát, jak je vidět na Obr. 4.1. Výpočet ztráty třením se liší pro proudění v režimu o volné hladině a v režimu tlakovém.

Režim s volnou hladinou

Ztráta třením se pro proudění s volnou hladinou vypočítá z rovnice:

$$Z_{TŘ} = i_e L \quad (3.24)$$

| | | |
|-------|-----|--------------------------|
| L | [m] | délka úseku mezi profily |
| i_e | [-] | sklon čáry energie |

Za předpokladu ustáleného rovnoměrného proudění je sklon čáry energie roven skutečnému sklonu, který se dopočte z Chézyho rovnice:

$$Q = CS\sqrt{Ri_0} \quad (3.25)$$

Odtud je vyjádřen sklon jako:

$$i_0 = i_e = \frac{Q^2}{C^2 \cdot S^2 \cdot R} \quad (3.26)$$

| | | |
|-----|--------------------------|-------------------------------|
| Q | $[m^3 \cdot s^{-1}]$ | objemový průtok |
| S | $[m^2]$ | plocha průtočného profilu |
| R | [m] | hydraulický poloměr |
| C | $[m^{0.5} \cdot s^{-1}]$ | Chézyho rychlostní součinitel |

Chézyho rychlostní součinitel se spočte dle rovnice:

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \quad (3.27)$$

| | | |
|-----|-----|--------------------------------|
| n | [-] | Manningova drsnost (z tabulek) |
|-----|-----|--------------------------------|

Režim tlakový

Ztráty třením při tlakovém proudění v kruhovém propustku se řeší pomocí Darcy-Weisbachovy rovnice:

$$Z_{T\ddot{R}} = \lambda \frac{L v^2}{D 2g} \quad (3.28)$$

| | | |
|-----------|----------------------|---|
| λ | [-] | součinitel tření |
| L | [m] | délka úseku s tlakovým prouděním |
| D | [m] | vnitřní průměr propustku |
| v | [m·s ⁻¹] | průřezová rychlost vody v propustku při tlakovém proudění |

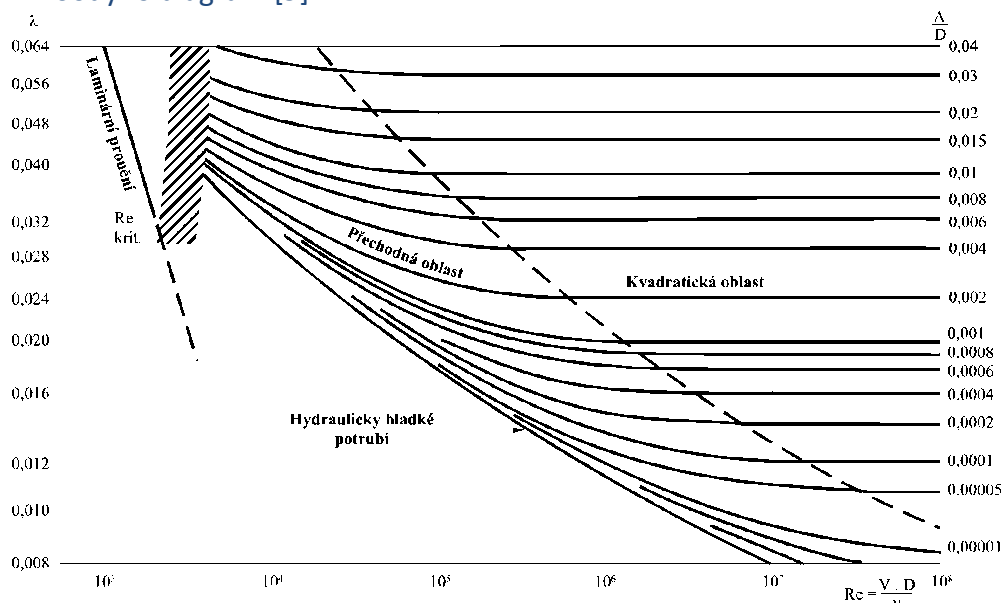
Součinitel tření λ je v případě turbulentního režimu proudění funkcí relativní drsnosti a Reynoldsova čísla. Relativní drsnost a Reynoldsovo číslo se vypočtou dle rovnice (3.29). Obě tyto bezrozměrné veličiny jsou použity v grafu zvaném Moodyho diagram na Obr. 3.17, na němž je pak odečtena hodnota součinitele tření λ .

$$\frac{\Delta}{D} \quad Re = \frac{vD}{\nu} \quad (3.29)$$

| | | |
|--------------------|------------------------------------|-----------------------|
| $\frac{\Delta}{D}$ | [-] | relativní drsnost |
| Re | [-] | Reynoldsovo číslo |
| Δ | [m] | hydraulická drsnost |
| ν | [m ² ·s ⁻¹] | kinematická viskozita |

Reynoldsovo číslo umožňuje stanovit, zda proudění probíhá v laminárním ($Re < 2320$) nebo turbulentním režimu ($Re > 2320$). Oblast turbulentního proudění se dále člení na hydraulicky hladké potrubí (λ je funkcí Re), kvadratickou oblast turbulentního proudění (λ je funkcí Δ/D) a přechodnou oblast turbulentního proudění, kde součinitel tření λ závisí na obou zmíněných parametrech.

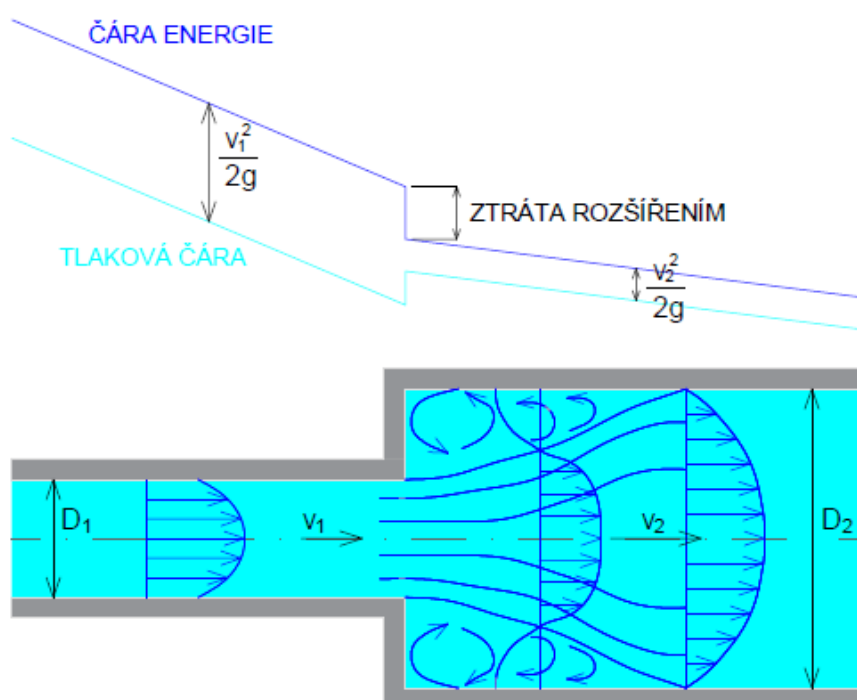
Obr. 3.17 Moodyho diagram [9]



4 ZTRÁTA NA VÝTOKU Z PROPUSTKU

Při výtoku vody z propustku dochází ke změně režimu proudění z tlakového na režim s volnou hladinou. Dochází tedy k rozšíření proudu, snížení rychlosti a tím k významné ztrátě energie. Grafické vyjádření ztráty je patrné z Obr. 4.1, na kterém lze sledovat skokový pokles čáry energie, jenž reprezentuje velikost místní ztráty na výtoku. Toto znázornění je běžně používané, není však zcela správné. Místní ztráta se totiž neprojeví pouze v profilu rozšíření, nýbrž se propaguje značně daleko za oním profilem. Detailnímu řešení výpočtu ztráty na výtoku je věnována celá kapitola 4.

Obr. 4.1 Grafické znázornění místní ztráty rozšířením průřezu



Následující podkapitoly jsou věnovány výpočtu v režimu o volné hladině a výpočtu v režimu tlakovém. Skutečné situaci však nejvíce odpovídá přechod proudění z režimu tlakového do režimu o volné hladině. Ztráta energie při tomto přechodu proudění však nebyla detailně popsána v žádné nalezené literatuře, a proto nebude dále popsána.

4.1 VÝPOČET V REŽIMU O VOLNÉ HLADINĚ

Metoda výpočtu ztráty na výtoku při přechodu z proudění o volné hladině do proudění taktéž o volné hladině je založena na Bernoulliho rovnici vyjadřující zákon zachování energie a na větě o hybnosti proudu. Rovnice výtokové ztráty (4.1) vyjadřuje ztrátu jako část rozdílu kvadrátů rychlostních výšek: [24]

$$Z_{v\acute{y}T} = \xi_{v\acute{y}T} \cdot \left(\frac{v^2 - v_D^2}{2g} \right) \quad (4.1)$$

| | | |
|---------------------|--------------------|---|
| $Z_{v\acute{y}T}$ | [m] | ztrátová výška na výtoku z propustku |
| v | $[m \cdot s^{-1}]$ | rychlost proudění v propustku |
| v_D | $[m \cdot s^{-1}]$ | střední průřezová rychlost v profilu D za výtokem z propustku |
| $\xi_{v\acute{y}T}$ | [-] | součinitel místní ztráty na výtoku |

Součinitel místní ztráty na výtoku je nejčastěji vyčíslen hodnotou 1.0, který však může výtokovou ztrátu značně nadhodnocovat. [20] Proto se v některých případech používá hodnota součinitele 0.75 či nižší, pokud je přechod z propustku do koryta méně náhlý [1]. Je záhodno na tomto místě připomenout, že velká většina běžně dostupných a užívaných výpočetních programů používá do svého výpočtu právě výše zmíněnou rovnici (4.1). Jednotlivé výpočetní programy a jejich metody výpočtu jsou podrobněji popsány v podkapitole 10.2.

Je-li rychlost v korytě za propustkem mnohonásobně menší než v propustku (např. při výtoku do velké nádrže), je možné ji ve výpočtu zanedbat ($v_D = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) a hodnotu ztrátového součinitele uvažovat 1.0 [13]. Vzorec pro výpočet místní ztráty na výtoku do velké nádrže s klidnou kapalinou pak vypadá následovně:

$$Z_{v\acute{y}T} = 1.0 \cdot \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (4.2)$$

4.2 VÝPOČET V REŽIMU TLAKOVÉM

Text této podkapitoly se věnuje ztrátě při náhlém rozšíření průřezu, tak jak je známá při řešení potrubí. Při náhlém rozšíření průřezu vzniká tzv. Bordova ztráta (v zahraniční literatuře často označovaná Borda-Carnot), jejíž hodnota se stanovuje z d'Alembertova-Carnotova zákona. Tento zákon říká, že ztráta pohybové energie se rovná součtu pohybových energií, příslušných ztraceným rychlostem:

$$Z_{Borda} = \frac{(v - v_D)^2}{2g} \quad (4.3)$$

| | |
|----------------------------|---|
| Z_{Borda} [m] | ztrátová výška na výtoku z propustku spočtena pomocí Bordova výrazu |
| v [m.s ⁻¹] | rychlost v propustku |
| v_D [m.s ⁻¹] | rychlost v profilu D za výtokem z propustku |

Lze si povšimnout, že na rozdíl od rovnice (4.1) z předchozí kapitoly, v níž se objevuje rozdíl kvadrátů rychlostních výšek, v této rovnici (4.3) se objevuje kvadrát rozdílu rychlostí. Tato ztráta se dá rovněž vyjádřit jako součin bezrozměrného ztrátového součinitele $\xi_{V\dot{Y}T}$ a rychlostní výšky jak bylo popsáno výše, avšak nejdříve musí být provedeny následující úpravy [9]. Z rovnice kontinuity:

$$Sv = S_D v_D \quad (4.4)$$

Vyjádřením v_D a dosazením do rovnice pro Bordovu ztrátu:

$$Z_{Borda} = \frac{\left(v - \frac{Sv}{S_D}\right)^2}{2g} \quad (4.5)$$

Vytknutím v získáme tuto rovnici:

$$Z_{Borda} = \frac{v^2 \left(1 - \frac{S}{S_D}\right)^2}{2g} \quad (4.6)$$

V níž lze pozorovat součin závorky a rychlostní výšky. Závorku tedy dáme rovnu ztrátovému součiniteli:

$$\xi_{V\dot{Y}T} = \left(1 - \frac{S}{S_D}\right)^2 \quad (4.7)$$

A nyní vyjádříme ztrátu jako součin bezrozměrného ztrátového součinitele $\xi_{V\dot{Y}T}$ a rychlostní výšky:

$$Z_{Borda} = \xi_{V\dot{Y}T} \frac{v^2}{2g} \quad (4.8)$$

V závislosti na tom, zda je v prvním kroku vyjádřena rychlost v nebo v_D , mohou nastat dvě situace. Upravováním výrazů dle výše popsaných kroků se na závěr dostane jiná hodnota ztrátového součinitele $\xi_{V\dot{Y}T}$, která pak náleží různé rychlostní výšce. Srovnání těchto dvou postupů je uvedeno v Tab. 4.1.

Tab. 4.1 Vyjádření ztrátového součinitele pro Bordův výraz

| Popis kroků výpočtu: | 1. situace | 2. situace |
|--|---|---|
| Rovnice kontinuity. | $Sv = S_D v_D$ | $Sv = S_D v_D$ |
| Vyjádření jedné z rychlostí a dosazení do Bordova výrazu. | $Z_{Borda} = \frac{\left(\frac{S_D v_D}{S} - v_D\right)^2}{2g}$ | $Z_{Borda} = \frac{\left(v - \frac{Sv}{S_D}\right)^2}{2g}$ |
| Vytknutí jedné z rychlostí z čitatele. | $Z_{Borda} = \frac{v_D^2 \left(\frac{S_D}{S} - 1\right)^2}{2g}$ | $Z_{Borda} = \frac{v^2 \left(1 - \frac{S}{S_D}\right)^2}{2g}$ |
| Závorka z předchozího kroku je rovna součiniteli místní ztráty. | $\xi_{V\dot{Y}T,D} = \left(\frac{S_D}{S} - 1\right)^2$ | $\xi_{V\dot{Y}T} = \left(1 - \frac{S}{S_D}\right)^2$ |
| Ztráta jako součin součinitele a rychlostní výšky. | $Z_{Borda} = \xi_{V\dot{Y}T,D} \frac{v_D^2}{2g}$ | $Z_{Borda} = \xi_{V\dot{Y}T} \frac{v^2}{2g}$ |

Jak lze vidět z Tab. 4.1 součinitel místní ztráty na výtoku vychází z poměru průtočných ploch v propustku a v korytě za výtokem z propustku. Lze tedy předpokládat, že vyjádření ztráty pomocí Bordova výrazu bude přesnější než použití rovnice (4.1) s konstantní hodnotou součinitele, jež není závislá na geometrickém uspořádání propustku a je tudíž stejná pro všechny vyskytující se případy.

Modifikace Bordova výrazu

Snaha zpřesnit Bordův výraz tak, aby co nejvíce odpovídal realitě, vedla autory Saint Venanta a Hanocqua k drobným úpravám Bordova výrazu, které jsou popsány níže:

1) *Saint Venantovo řešení* - uvažuje ztráty nerovnoměrným rozdělením rychlostí, třením o stěny a vnitřním třením. Proto je do rovnice zaveden doplňující člen $\frac{1}{9} \frac{v_D^2}{2g}$ [13]:

$$Z_{Borda} = \frac{(v - v_D)^2}{2g} + \frac{1}{9} \frac{v_D^2}{2g} \quad (4.9)$$

Tento člen je možno implementovat do rovnice pro ztrátový součinitel:

$$\xi_{Venant} = \left(\frac{S_D}{S} - 1\right)^2 + \frac{1}{9} \quad (4.10)$$

2) *Hanocqovo řešení* - do rovnice pro ztrátový součinitel je opět zaveden doplňující člen, tentokrát však ne konstantní hodnotou, nýbrž obecnějším tvarem v závislosti na velikosti průtočných ploch [13]:

$$\xi_{Hanocq} = \left(\frac{S_D}{S} - 1\right)^2 + 0.2 \left(\frac{S_D}{S} - 1\right) \quad (4.11)$$

Provedeným experimentem však bylo dokázáno, že tato dvě modifikovaná řešení nevedou k přesnějším hodnotám ztráty na výtok, alespoň co se týká tohoto konkrétního výzkumu. Z Tab. 4.2 je patrné, že vypočtená hodnota ztrátového součinitele dle Bordova výrazu je mírně vyšší než hodnota získaná z experimentu. Saint Venantovo řešení hodnotu součinitele navyšuje ještě o něco více než Bordovo řešení a Hanocqův výraz se hodnotě získané experimentem blíží úplně nejméně. Proto se nedoporučuje tato modifikovaná řešení používat a raději se držet prostého Bordova výrazu.

Tab. 4.2 Srovnání součinitelů pro obdélníkový (vlevo) a lichoběžníkový (vpravo) tvar koryta

| Q [l/s] | ξ_{exp} | ξ_{Borda} | ξ_{Venant} | ξ_{Hanocq} |
|-----------|-------------|---------------|----------------|----------------|
| 15 | 0.680 | 0.705 | 0.708 | 0.732 |
| | 0.637 | 0.673 | 0.677 | 0.702 |
| | 0.608 | 0.653 | 0.657 | 0.684 |
| | 0.572 | 0.629 | 0.634 | 0.662 |
| 12 | 0.741 | 0.751 | 0.753 | 0.774 |
| | 0.690 | 0.705 | 0.708 | 0.732 |
| | 0.638 | 0.662 | 0.666 | 0.692 |
| | 0.631 | 0.656 | 0.660 | 0.687 |
| | 0.494 | 0.553 | 0.560 | 0.591 |
| 9 | 0.733 | 0.739 | 0.741 | 0.763 |
| | 0.686 | 0.695 | 0.698 | 0.722 |
| | 0.626 | 0.641 | 0.645 | 0.673 |
| | 0.571 | 0.593 | 0.599 | 0.628 |
| | 0.504 | 0.536 | 0.544 | 0.575 |
| 6 | 0.730 | 0.733 | 0.735 | 0.758 |
| | 0.674 | 0.679 | 0.682 | 0.708 |
| | 0.600 | 0.608 | 0.613 | 0.642 |
| | 0.544 | 0.556 | 0.563 | 0.594 |
| | 0.482 | 0.498 | 0.508 | 0.540 |
| 3 | 0.516 | 0.520 | 0.528 | 0.560 |
| | 0.470 | 0.474 | 0.485 | 0.517 |

| Q [l/s] | ξ_{exp} | ξ_{Borda} | ξ_{Venant} | ξ_{Hanocq} |
|-----------|-------------|---------------|----------------|----------------|
| 15 | 0.519 | 0.553 | 0.560 | 0.591 |
| | 0.447 | 0.526 | 0.534 | 0.566 |
| | 0.355 | 0.489 | 0.499 | 0.531 |
| | 0.281 | 0.436 | 0.449 | 0.481 |
| 12 | 0.564 | 0.596 | 0.602 | 0.632 |
| | 0.459 | 0.499 | 0.508 | 0.540 |
| | 0.426 | 0.445 | 0.457 | 0.489 |
| | 0.296 | 0.369 | 0.386 | 0.417 |
| | 0.251 | 0.323 | 0.344 | 0.372 |
| 9 | 0.538 | 0.585 | 0.591 | 0.621 |
| | 0.465 | 0.467 | 0.478 | 0.510 |
| | 0.355 | 0.369 | 0.386 | 0.417 |
| | 0.312 | 0.302 | 0.324 | 0.351 |
| | 0.226 | 0.206 | 0.239 | 0.256 |
| 6 | 0.574 | 0.582 | 0.588 | 0.618 |
| | 0.450 | 0.454 | 0.466 | 0.498 |
| | 0.325 | 0.312 | 0.333 | 0.361 |
| | 0.307 | 0.224 | 0.255 | 0.274 |
| | 0.251 | 0.128 | 0.174 | 0.174 |
| 3 | 0.264 | 0.227 | 0.257 | 0.277 |
| | 0.284 | 0.096 | 0.149 | 0.139 |

5 PROVEDENÉ VÝZKUMY NA TÉMA ZTRÁTY V PROPUSTKU

V této kapitole jsou popsány již provedené výzkumy na téma výpočtu ztráty v propustcích. Zásadním dokumentem je článek popisující výzkum amerických autorů z Utah State University B. P. Tullise a S. C. Robinsona. Dále je popsán výzkum amerického akademika T. J. Fairleyho působících na University of Durham. Z českých autorů se ztrátě na výtok z propustku věnuje publikace T. Picka z Českého vysokého učení technického v Praze.

Výzkum B. P. Tullise a S. C. Robinsona

Měření probíhalo na kruhových propustcích s průměry od 0.3 m do 1.5 m s konstrukčním typem předřazený vtok (viz Obr. 2.8). Hladiny byly měřeny jak pro režim tlakový, tak pro proudění s volnou hladinou a to pro výtok zatopený i nezatopený. Následující text bude zaměřen především na proudění tlakové se zatopeným výtokem. Jednotlivé parametry jako průměr propustku D , míra zatopení y_D/D , poměr průtočných ploch v korytě a v propustku S_D/D a experimentálně zjištěná hodnota ztráty na výtoku $Z_{V\dot{T}}$ jsou uvedeny v Tab. 5.1.

Tab. 5.1 Parametry experimentu B. P. Tullise a S. C. Robinsona

| Případ | D [m] | Výtok | Proudění | y_D/D [-] | S_D/S [-] | $Z_{V\dot{T}}$ [m] |
|--------|---------|---------|----------|-------------|-------------|--------------------|
| 1 | 0.30 | zatopen | tlakové | 1.99 | 45.9 | 0.360 |
| 2 | 0.61 | zatopen | tlakové | 1.26 | 12.4 | 0.128 |

Na výše popsaných modelech byly prováděny experimenty, jež byly vyhodnoceny na základě rovnic (4.1) a (4.3). V Tab 5:2 lze pozorovat hodnoty součinitelů získaných experimentem ξ_{exp} a hodnoty součinitelů ξ_{teor} , které byly získány dle uvedených rovnic. Poslední sloupec tabulky uvádí procentuální chybu mezi jednotlivými součiniteli a lze vidět, že použití Bordova výrazu (4.3) má mnohem menší chybu než použití rovnice (4.1) pro proudění s volnou hladinou. Pro proudění s volnou hladinou a nezatopeným výtokem je tato chyba ještě mnohonásobně větší, ztráta je rovnicí (4.1) nadhodnocena až o 187 %. Nadhodnocení ztráty na výtoku je tím větší, čím je poměr průtočných ploch S_D/S menší.

Tab. 5.2 Porovnání hodnot teoretických součinitelů a součinitelů získaných experimentem

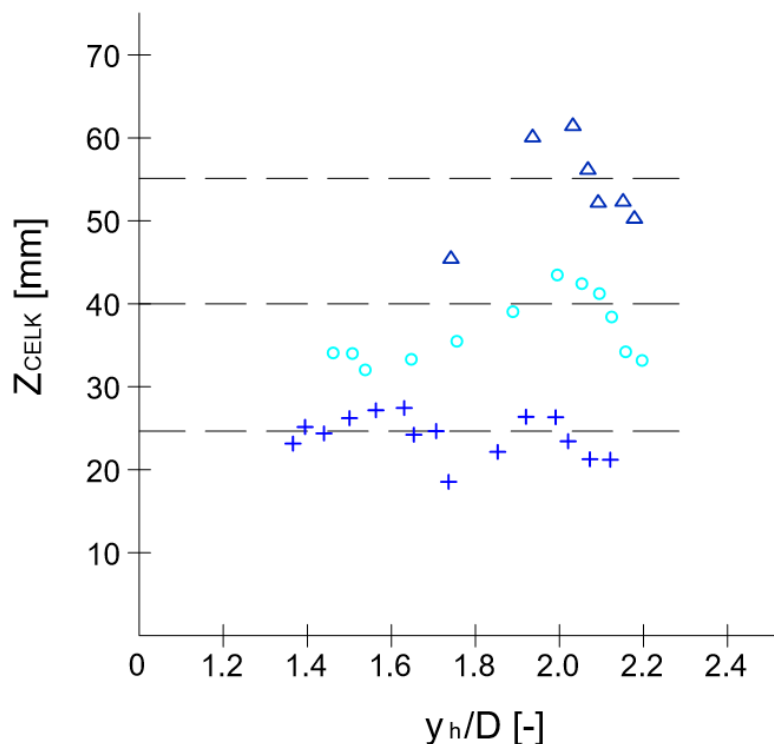
| | Případ | ξ_{exp} [-] | ξ_{teor} [-] | Chyba [%] |
|--------------|--------|-----------------|------------------|-----------|
| rce (4.1) | 1 | 0.93 | 1.00 | 7 |
| | 2 | 0.88 | 1.00 | 14 |
| rce (4.2) | 1 | 0.93 | 0.96 | 3 |
| | 2 | 0.87 | 0.85 | 3 |

Výzkum T. J. Fairleyho [7]

T. J. Fairley z University of Durham se zabýval celkovou ztrátou v propustku. Celková ztráta byla vypočtena jako součet místní ztráty na vtoku, ztráty třením v celém propustku a místní ztráty na výtoku. T. J. Fairley tvrdí, že součinitele ztráty na vtoku a na výtoku uvažuje stejnou hodnotou, jelikož jejich charakter je prakticky totožný. Součinitele ztráty na vtoku a na výtoku byly spočteny jako $\xi_{V\dot{Y}T} = 0.79$, $\xi_{V\dot{Y}T} = 0.73$ a $\xi_{V\dot{Y}T} = 0.62$. Pro srovnání je zde uveden součinitel $\xi_{V\dot{Y}T} = 0.50$, který je dle Cartera [22] dán pro podobné geometrické uspořádání.

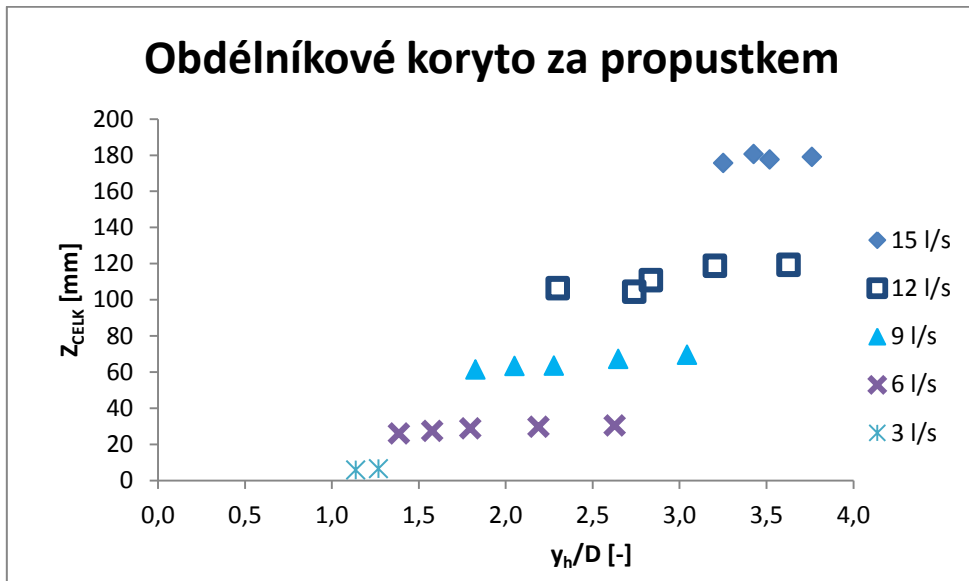
V publikaci [7] lze rovněž nalézt graf závislosti celkové ztráty v propustku na poměru hloubky horní vody k průměru potrubí propustku (y_h/D). Tento graf byl sestrojen pro tři různé průtoky, jimž odpovídají tři křivky, jak lze vidět na Obr. 5.1. Ideálně by tyto křivky měly být vodorovné (dle výzkumu Mavise [17]), avšak jak lze vidět na grafu, data prezentovaná v publikaci [7] tomu příliš neodpovídala.

Obr. 5.1 Graf závislosti celkové ztráty na poměru y_h/D od T. J. Fairleyho

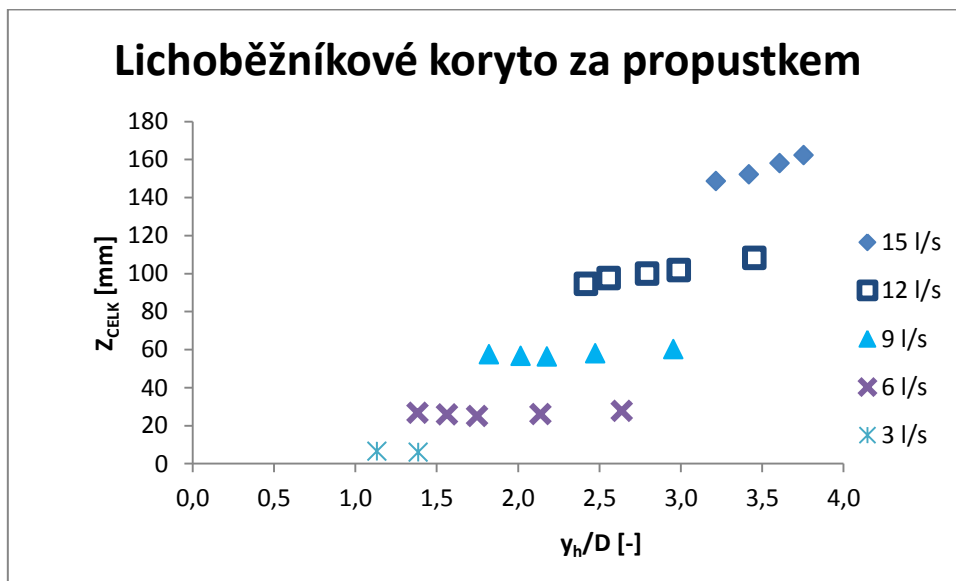


Stejný graf byl vytvořen na základě dat změřených autorkou této práce a byly dosaženy podobné výsledky jako v publikaci od T. J. Fairleyho. Pro pět různých průtoků byly tedy sestrojeny křivky závislosti celkové ztráty na poměru hloubky y_h k průměru propustku D , jak lze pozorovat na Obr. 5.2. Lze vidět, že všech pět křivek je téměř vodorovných. Tento graf tedy znázorňuje, že celková ztráta energie při proudění propustkem není závislá na úrovni hladiny před vtokem do propustku.

Obr. 5.2 Závislosti celkové ztráty na poměru y_h/D od P. Jurečkové pro obdélníkové koryto



Obr. 5.3 Závislost celkové ztráty na poměru y_h/D od P. Jurečkové pro lichoběžníkové koryto



Výzkum T. Picka

Výzkum T. Picka probíhal na výsekovém modelu obdélníkového propustku délky 1000 mm a šířky 250 mm, kde nedocházelo k boční expanzi proudu. Měření byla prováděna ve dvou variantách, a to pro obdélníkový průřez výšky 37.5 mm nebo pro otvor větší s výškou 75 mm. Při výšce otvoru 75 mm byla měření provedena pro průtoky 10 l/s, 15 l/s a 20 l/s, při výšce otvoru 37.5 mm pro průtoky 5.3 l/s a 7.5 l/s.

Hladiny byly měřeny hrotovým měřítkem a kóta tlakové čáry byla stanovena pomocí tlakových odběrů. Ztráta rozšířením byla vypočtena jako výškový rozdíl čáry energie ve výtokovém profilu a v profilu za výtokem z propustku v místě, kde již hladina nebyla ovlivněna rozšířením proudu. I přes absenci boční expanze, tvořila ztráta na výtoku podstatnou část celkové ztráty energie.

Autor ve svém článku neuvádí konkrétní hodnoty součinitele ztráty na výtoku $\xi_{V\dot{Y}T}$, avšak porovnává experimentálně získané hodnoty ztrátové výšky s hodnotami ztrát, jež byly vypočteny na základě údajů známých z literatury. T. Picek svým výzkumem dokázal, že stanovení ztráty na výtoku pomocí rovnice o volné hladině (4.1) se součinitelem místní ztráty $\xi_{V\dot{Y}T} = 1.0$ skutečnou hodnotu ztráty na výtoku značně nadhodnocuje, a to zejména při méně výrazném rozšíření proudu. Pokud je ztráta počítána stejnou rovnicí pouze s jiným součinitelem místní ztráty $\xi_{V\dot{Y}T} = 0.75$ hodnoty vypočtené ztrátové výšky se více přibližují skutečným hodnotám, zvláště v případě vyšší úrovně hladiny dolní vody. Autor publikace [22] učinil závěr, že nejlépe reálným hodnotám odpovídá Bordaův výraz (4.3) pro náhlé rozšíření potrubí, jež v sobě zahrnuje poměr průtočných ploch v korytě a v propustku. Rovněž zdůraznil, že největší nejistota při vyčíslení místní ztráty na výtoku nastává při méně výrazném rozšíření proudu.

Shrnutí hodnot součinitelů ztráty na výtoku pro všechny tři popsané výzkumy obsahuje Tab. 5.3. Lze si povšimnout, že všechny popsané výzkumy doporučují použití hodnot součinitele ztráty na výtoku $\xi_{V\dot{Y}T}$ menší než 1.0. Dvě z výše popsaných publikací rovněž doporučují použití rovnice dle Borda při výpočtu ztráty na výtoku z propustku.

Tab. 5.3 Shrnutí hodnot ztrátových součinitelů z provedených výzkumů

| Autor | Hodnoty součinitele ztráty na výtoku $\xi_{V\dot{Y}T}$ | | | |
|------------------------------|--|------|------|------|
| B. P. Tullis, S. C. Robinson | 0.93 | 0.88 | 0.93 | 0.87 |
| T. J. Fairley | 0.79 | 0.73 | 0.62 | |
| T. Picek | Nestanovil konkrétní hodnoty | | | |

6 FYZIKÁLNÍ MODELOVÁNÍ

Tato kapitola pojednává o fyzikálním modelování. Popisuje jeho výhody, definuje zákony podobnosti a rovněž udává rovnice pro výpočet měřítek vhodných pro různé situace. Důvodem, proč se tato kapitola zabývá fyzikálním modelováním, je objasnění základních pojmů týkajících se této problematiky, jelikož počínaje kapitolou 7 se tato práce nadále věnuje výzkumu právě na fyzikálním modelu.

Výhodou modelového výzkumu je fakt, že nákladnost výstavby není příliš vysoká a fyzikální model je snadno a rychle modifikovatelný. Další přednost použití fyzikálního modelu je jeho nezávislost na vnějších vlivech a klimatických podmínkách, jak by tomu bylo u prototypu. Díky tomu lze zkoumané veličiny měřit s velkou přesností, jež je rovněž zajištěna možností opakování měření.

Podstatou fyzikálního modelování je myšlenka existence dvou fyzikálně stejnorodých jevů. Pak je možno modelovat skutečnost (tzv. prototyp) na zmenšeném modelu. Jedná-li se o hydraulický model, kdy na modelu i prototypu proudí stejné médium - voda, je fyzikální modelování podloženo teorií podobnosti hydrodynamických jevů [19]. K matematickému vyjádření vzájemných vztahů mezi modelem a prototypem slouží zákony mechanické podobnosti (např. Froudův, Reynoldsův, Weberův, apod.) [3]. Mechanická podobnost stanovuje zásady, podle nichž se experimentálně získaná data vyhodnocují a podle nichž se rovněž výsledky výzkumu převádí do skutečnosti. Aby bylo proudění na modelu věrným obrazem proudění ve skutečnosti, musí být na fyzikálním modelu uplatněna úplná mechanická podobnost. Ta je zajištěna v případě, že jsou si jevy podobné jednak geometricky, ale i kinematicky a dynamicky.

Geometrická podobnost je zajištěna, pokud jsou všechny rozměry a úhly na modelu zmenšeny vůči prototypu dle stejného měřítka. Podobnost se tedy řídí měřítkem délky M_L .

Kinematická podobnost znamená, že dráhy, které opisují sobě odpovídající částice v úměrně dlouhých dobách, si musí být podobné. Podobnost se tedy řídí měřítkem délky M_L a měřítkem času M_t .

Dynamická podobnost platí, pokud síly působící na model a na prototyp si jsou vzájemně úměrné dle stejného měřítka. Podobnost se tedy řídí měřítkem síly M_F . [19]

Jak již bylo zmíněno, existuje několik zákonů podobnosti, povětšinou pojmenovaných dle svých objevitelů. Mezi dva nejzákladnější zákony patří Froudův zákon podobnosti a Reynoldsův zákon podobnosti. Pokud se jedná o proudění s jednou převažující silou, jak je tomu u modelování objektů, kritérium dle Frouda nebo Reynoldse je dostačující. Froudův ani Reynoldsův zákon podobnosti však není dostačující, jedná-li se o proudění s více významnými silami, jako je tomu například u proudění v říčních korytech, kde významně působí i síla třecí [18]. Následující text pojednává o kritériích dynamické podobnosti těchto dvou zákonů, jelikož ostatní typy podobností se v praxi zanedbávají.

Froudovo kritérium dynamické podobnosti

Froudovo číslo zajišťuje přibližnou dynamickou podobnost porovnávaných proudění na modelu a na prototypu. Používá se u jevů, u nichž mají převažující účinek setrvačné a gravitační síly. Takovýmto jevem je například proudění s volnou hladinou. Pro měřítko Froudova čísla platí rovnice (6.1).

$$M_{Fr} = \frac{M_v^2}{M_g \cdot M_L} = 1 \quad (6.1)$$

| | | |
|----------|-----|--------------------------------|
| M_{Fr} | [-] | měřítka Froudova čísla |
| M_v | [-] | měřítka rychlostí |
| M_g | [-] | měřítka gravitačního zrychlení |
| M_L | [-] | měřítka délek |

Nejčastěji se při výpočtu hydrodynamických jevů užívá měřítko rychlosti a průtoku. Jelikož se model i prototyp nacházejí v oblasti stejného gravitačního zrychlení, je gravitační měřítko $M_g = 1$, a pro měřítko rychlosti platí rovnice (6.2).

$$M_v = \sqrt{M_L} \quad (6.2)$$

A pro měřítko průtoku rovnice (6.3).

$$M_Q = M_L^{5/2} \quad (6.3)$$

| | | |
|-------|-----|-----------------|
| M_Q | [-] | měřítka průtoků |
|-------|-----|-----------------|

Reynoldsovo kritérium podobnosti

Reynoldsovo číslo zajišťuje přibližnou dynamickou podobnost porovnávaných proudění na modelu a na prototypu. Používá se u jevů, u nichž mají převažující účinek setrvačné a vazké neboli třecí síly. Takovýmto jevem je například proudění s napjatou hladinou (v tlakových systémech). Pro měřítko Reynoldsova čísla platí rovnice (6.4)

$$M_{Re} = \frac{M_v \cdot M_L}{M_\nu} = 1 \quad (6.4)$$

| | | |
|----------|-----|-------------------------------|
| M_{Re} | [-] | měřítka Reynoldsova čísla |
| M_ν | [-] | měřítka kinematické viskozity |

Nejčastěji se při výpočtu hydrodynamických jevů užívá měřítko rychlosti a průtoku. Jelikož je na modelu i prototypu použito stejné médium - voda, je měřítko kinematické viskozity $M_\nu = 1$, a pro měřítko rychlosti platí rovnice (6.5).

$$M_v = \frac{1}{M_L} \quad (6.5)$$

A pro měřítko průtoku rovnice (6.6).

$$M_Q = M_L \quad (6.6)$$

Modelování dle Froudova čísla je z praktického hlediska jednodušší než modelování podle Reynoldsova čísla. Pro splnění kritérií Reynoldsova zákona podobnosti je totiž nutné zajistit velké průtoky, což může být v některých laboratořích problémové. Je téměř vyloučeno, aby byla dodržena obě kritéria současně. Pokud by totiž na modelu i prototypu byly použité stejné tekutiny, muselo by se měřítko průtoků dle Froudova zákona rovnat měřítko průtoků dle Reynoldsova zákona $M_{Q,Fr} = M_{Q,Re}$, z čehož se odvodí měřítko délky $M_L = 1$. To by znamenalo, že model musí mít stejnou velikost jako prototyp a byl by tudíž nezmenšený [19].

6.1 MODELOVÁ PODOBNOST

Při výzkumu místních ztrát a s tím spojeného součinitele místní ztráty ξ je základní podmínkou úplná geometrická podobnost sledované změny průtočného profilu. Jelikož tato změna vyvolává podružné proudění nejen ve vlastním sledovaném profilu, ale i v úseku před a hlavně za ním, je proudění na modelu i ve skutečnosti vždy turbulentní, což bylo potvrzeno výpočtem Reynoldsova čísla, jež se pohybuje v řádech 10^4 i pro nejmenší měřené průtoky. Proto je v převážné většině případů možno zanedbat vliv vazkosti, z čehož vyplývá, že součinitel místní ztráty ξ je nezávislý na hodnotě Reynoldsova čísla.

Při modelovém výzkumu hydraulicky dlouhého potrubí se uplatní kombinace ztrát třením se ztrátami místními (např. změnou průřezu), tak jak bylo popsáno v podkapitole 3.3.2. Jestliže je zvoleno měřítko zmenšení modelu tak, aby při použití Froudova zákona podobnosti byla zaručena totožnost součinitele ztráty třením na modelu a prototypu $\lambda_M = \lambda_P$, pak je při zachování geometrické podobnosti změny profilu dosaženo podobnosti celého systému [3].

V případě modelování reálného objektu by byla pro jednotlivé veličiny použita měřítka podle Reynoldsova nebo Froudova zákona mechanické podobnosti, která jsou uvedena v předchozím textu. Tato práce ovšem počítá pouze s daty naměřenými na modelu propustku a nedochází zde k převádění těchto jevů do skutečnosti a žádná veličina tudíž nebude zmenšena ani zvětšena dle odpovídajících měřítek. Navíc, jak je popsáno dále v této práci, je výzkum zaměřen především na určení hodnoty ztrátového součinitele $\xi_{V\dot{Y}T}$, který je však bezrozměrný, a není tudíž nutné se zde podobností hydrodynamických jevů zabývat.

7 POPIS PROVEDENÉHO VÝZKUMU

Tato kapitola obsahuje popis prvků, jež byly použity k fyzikálnímu modelování hydraulického jevu proudění v propustku. Jsou zde popsána jednak zařízení, na nichž bylo měření prováděno a rovněž i přístroje, jimiž byly zjišťovány hodnoty měřených veličin. Měření bylo prováděno ve Vodohospodářské laboratoři Fakulty stavební Českého vysokého učení technického v Praze a celkem bylo provedeno 61 sad měření.

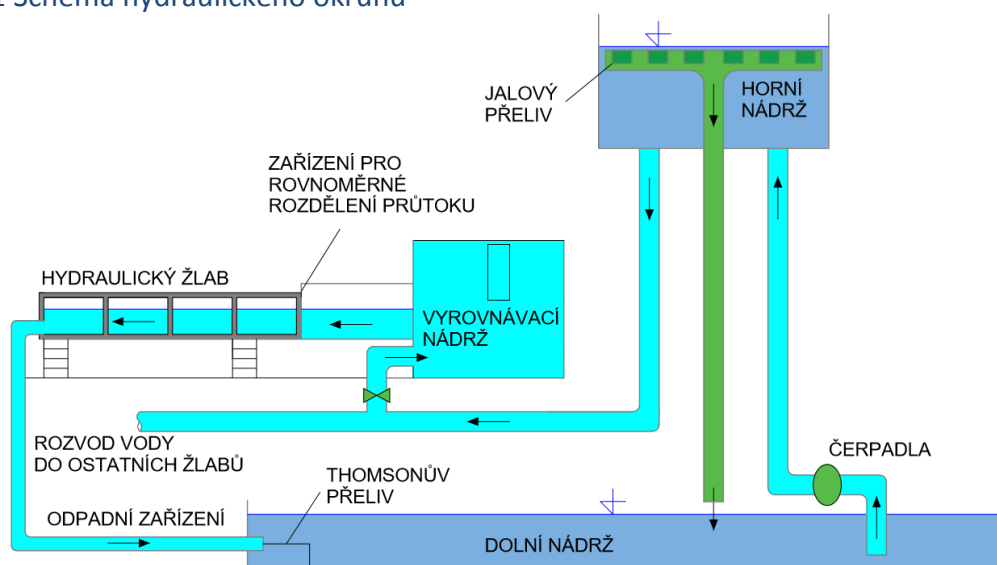
7.1 ZAŘÍZENÍ K MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ

Celkem byly provedeny experimenty na třech modelech, jež jsou nadále označovány římskými číslicemi (model I – model III). Zařízení, na nichž byla prováděna měření, jsou popsána v následujícím textu. Jedná se o hydraulický okruh, jenž má stejné parametry pro všechny tři modely a o hydraulické žlaby s vestavbami, které jsou pro tyto tři modely různé.

7.1.1 HYDRAULICKÝ OKRUH

Žlaby, jež byly použity na všech třech modelech, jsou napojeny na uzavřený hydraulický okruh, který začíná v horní zásobní nádrži umístěné na střeše budovy. Odtud voda teče samospádem a potrubími je rozváděna do jednotlivých hydraulických žlabů. Před vtokem do žlabu je voda dopravena do vyrovnávací nádrže, která je umístěna v dostatečné výšce nad modely. Potom voda pokračuje do žlabů, na jejichž začátcích jsou umístěna zařízení pro rovnoměrné rozdělení přítoků vody před nátoky do propustků. Následně voda proudí modely a její koloběh uzavírají odpadní zařízení odvádějící vodu ze žlabů přes Thomsonovy přelivy do dolní zásobní nádrže v suterénu laboratoře. Odtud je pak voda vytlačena čerpadly vzhůru zpět do horní zásobní nádrže na střeše budovy, čímž je celý hydraulický okruh uzavřen. K regulaci průtoků v hydraulickém okruhu slouží uzávěry na výtlačném potrubí za čerpadly a rovněž uzávěr pro jemnou regulaci, který je umístěn na obtokovém potrubí. Popsaný hydraulický okruh je možno sledovat na Obr. 7.1.

Obr. 7.1 Schéma hydraulického okruhu



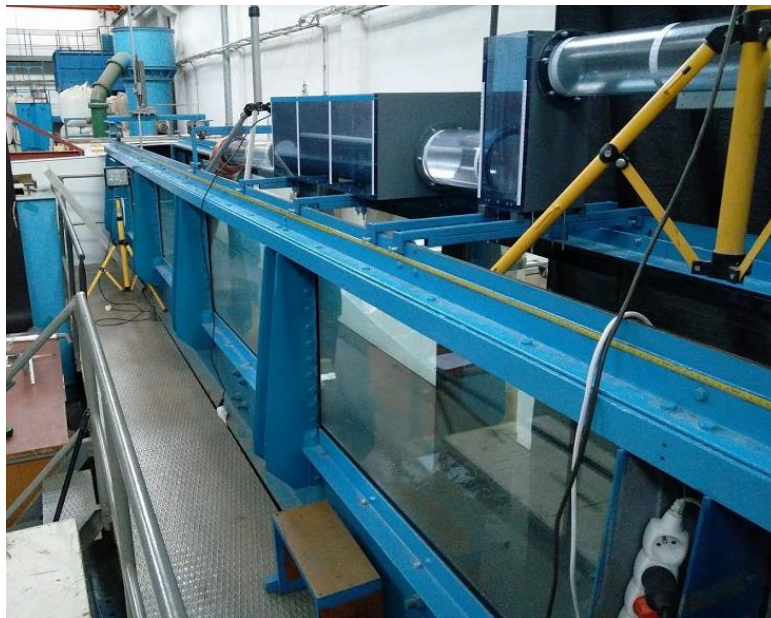
7.1.2 HYDRAULICKÉ ŽLABY S VESTAVBAMI

Hydraulický výzkum byl prováděn na třech různých fyzikálních modelech, které jsou popsány v této kapitole. Každý z modelů sestával z kruhového propustku osazeného do pevného hydraulického žlabu. Model I byl osazen v hydraulickém žlabu A, zatímco modely II a III byly osazeny ve žlabu B. Následující text podrobně popisuje jednotlivé modely, jejich rozměry a umístění v hydraulických žlabech.

Model I

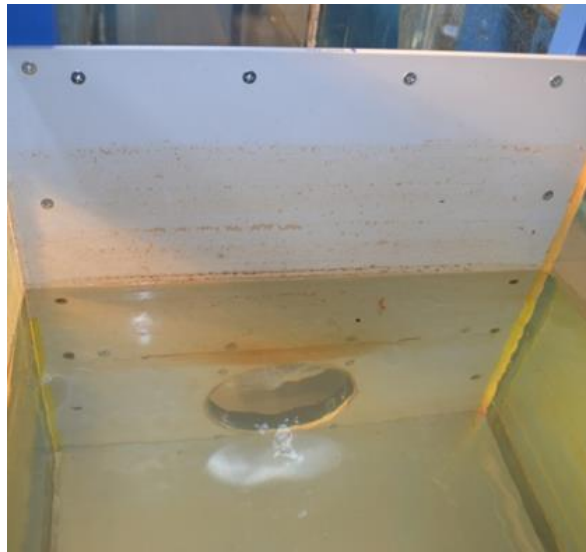
Model I sestával z kruhového propustku, který byl vložen do hydraulického žlabu A. Pevný hydraulický žlab A měl šířku 522 mm a délku 8800 mm. Tento žlab měl svislé, rovnoběžné boční stěny, které byly zhotoveny z tabulí skla a měly výšku 650 mm. Skleněné tabule byly osazený do nosné ocelové konstrukce žlabu a části modelu byly zakotveny do dna vyrobeného z tlustého ocelového plechu. Na bočních stěnách žlabu byly osazený vodorovné kolejnice pro pojezd vozíku s měřícím zařízením. Na začátku žlabu bylo umístěno síto z děrovaného plechu pro rovnoměrné rozdělení přítoku vody po celém vstupním průtočném profilu před nátokem do propustku. Na konci žlabu byly umístěny ocelové pásy k regulaci hloubky dolní vody, která zde tvořila dolní okrajovou podmínku. Žlab byl instalován na zvýšené podestě a jeho podobu lze vidět na Foto 7.1.

Foto 7.1 Celkový pohled na hydraulický žlab A



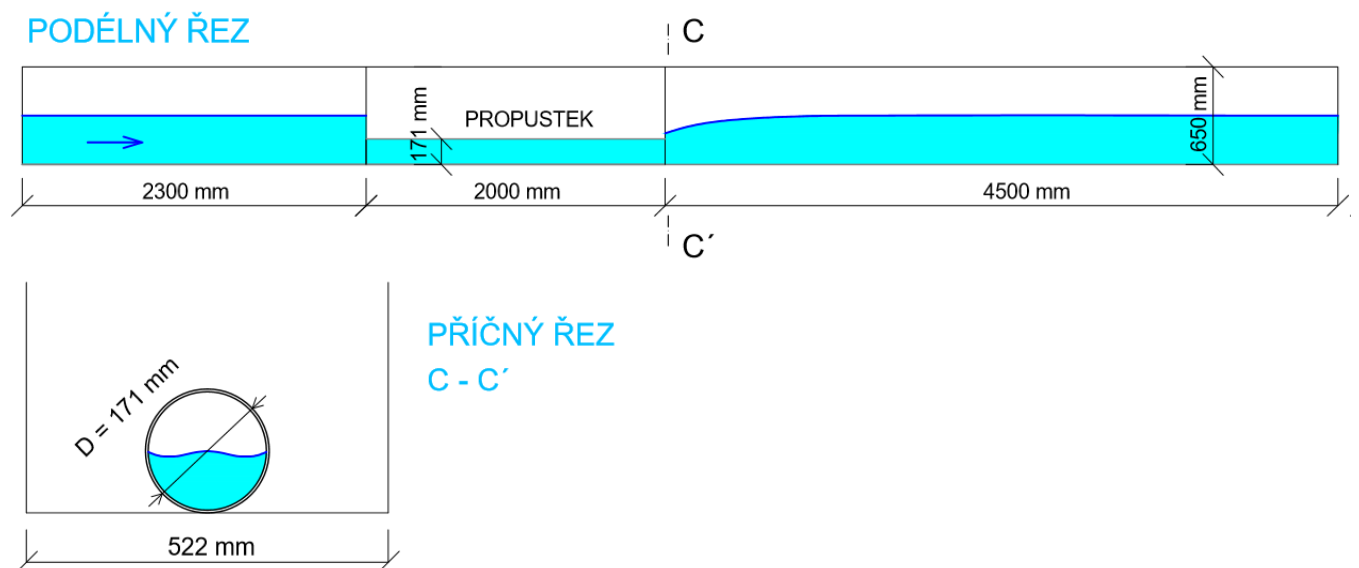
Průměr kruhového profilu propustku vyrobeného z plexiskla byl 171 mm. Vzdálenost mezi uklidňovacím sítem a vtokem do propustku činila 2300 mm, délka modelu byla 2000 mm a prostor mezi výtokem z modelu a odpadním zařízením byl dlouhý 4500 mm. Model propustku byl uložen v podélném sklonu 0.5 %. Čela na vtoku i na výtoku byla kolmá, bez zkosení či zaoblení, jak lze vidět na Foto 7.2. Tvar koryta za propustkem odpovídal tvaru žlabu a byl tudíž obdélníkový s šířkou ve dně 522 mm.

Foto 7.2 Pohled na výtokový profil modelu I



Pro usnadnění představy o tom, jak byl model I sestaven a kde se nacházely které rozměry, byl zhotoven Obr. 7.2, na kterém lze vidět jak podélný, tak příčný řez modelem I.

Obr. 7.2 Podélný a příčný řez modelem I



Model II

Model II sestával rovněž z kruhového propustku, který však byl usazen v hydraulickém žlabu B. Pevný hydraulický žlab B šířky 252 mm a délky 6300 mm měl na bocích opět ocelovou konstrukci, do níž byly osazeny svislé tabule skla výšky 1000 mm v první části žlabu a výšky 500 mm v druhé části žlabu. Na horních hranách těchto bočních stěn byly opět osazeny kolejnice, po nichž pojížděl vozík s hrotovým měřítkem. Na začátku žlabu byl umístěn voštinový usměrňovač pro rovnoměrné rozdělení přítoku vody před nátokem do propustku a na konci žlabu byl umístěn žaluziový uzávěr k regulaci hloubky dolní vody. Žlab byl také umístěn na zvýšené podestě a celkový pohled na konstrukci žlabu je možné vidět na Obr. 7.3.

Foto 7.3 Celkový pohled na hydraulický žlab B



Vestavbou byl rovněž propustek z plexiskla, avšak jeho průměr byl pro tento případ 108 mm. Vzdálenost mezi voštinovým usměřňovačem a vtokem do propustku činila 1800 mm, délka kruhového propustku byla 1250 mm a prostor mezi výtokem z propustku a odpadním zařízením byl dlouhý 3250 mm. Model propustku byl uložen v podélném sklonu 0.5 %. Obě čela byla kolmá, bez zkosení či zaoblení, jak lze pozorovat na Foto 7.4. Tvar koryta za propustkem byl stejný jako tvar hydraulického žlabu, to znamená obdélníkový s šířkou ve dně 252 mm.

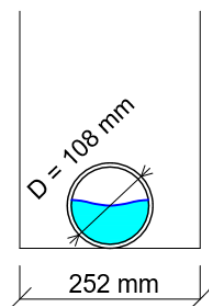
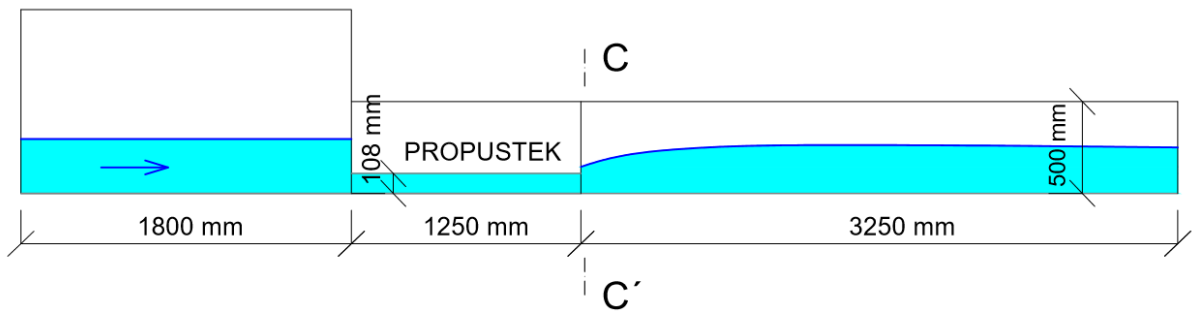
Foto 7.4 Pohled na výtokový profil modelu II



Pro usnadnění představy o tom, jak model II vypadal a jaké byly jeho rozměry, bylo vytvořeno schéma, jež lze sledovat na Obr. 7.3. Obrázek obsahuje jak podélný, tak příčný řez modelem II.

Obr. 7.3 Podélný a příčný řez modelem II

PODÉLNÝ ŘEZ



PŘÍČNÝ ŘEZ C - C'

Model III

Model III rovněž představoval kruhový propustek, který byl usazen v hydraulickém žlabu B stejně jako model II, a proto nebudou rozměry žlabu dále popisovány, jelikož jsou totožné. Model propustku byl také stejný jako u modelu II, takže průměr kruhového profilu činil opět 108 mm. Jediný rozdíl byl ve tvaru koryta za propustkem, jenž měl v tomto případě tvar lichoběžníku s šířkou ve dně 86 mm a sklonem šikmých stěn 4:1. Tvar výtokového profilu lze vidět na Foto 7.5.

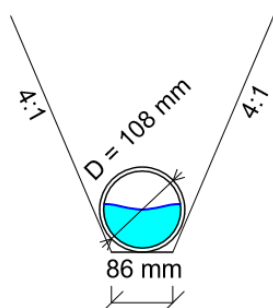
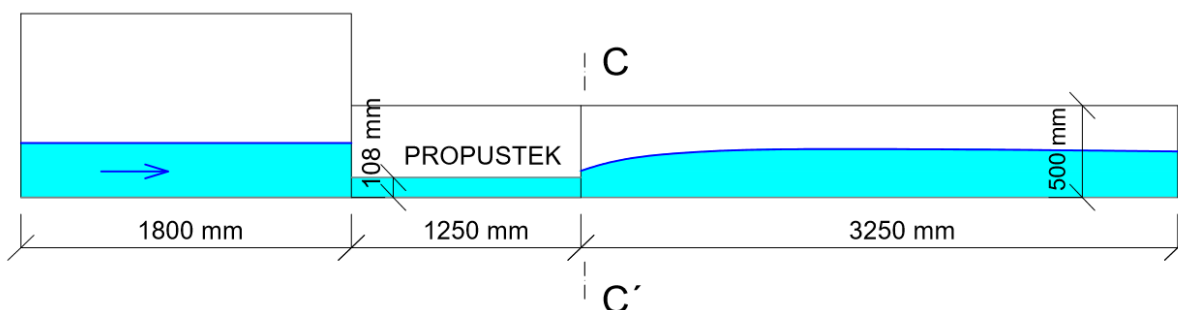
Foto 7.5 Pohled na výtokový profil modelu III



Schéma modelu III včetně jeho rozměrů lze sledovat na Obr. 7.4. Na obrázku je možno vidět jak podélný, tak příčný řez modelem III.

Obr. 7.4 Podélný a příčný řez modelem III

PODÉLNÝ ŘEZ



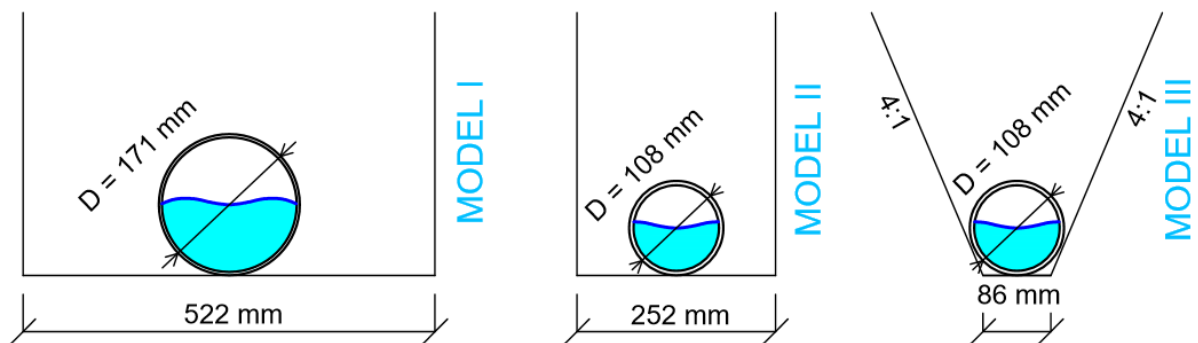
PŘÍČNÝ ŘEZ C - C'

Pro přehlednost byla vytvořena Tab. 7.1, která obsahuje nejdůležitější parametry jednotlivých modelů. Rovněž byl vytvořen Obr. 7.5, jež má podat základní představu o tom, jak vypadaly výtokové profily jednotlivých modelů.

Tab. 7.1 Přehled parametrů jednotlivých modelů

| Model | Šířka žlabu [mm] | Délka potrubí [mm] | Průměr potrubí [mm] | Tvar výtokového profilu | Umístění ve žlabu |
|-------|------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|-------------------|
| I | 522 | 2000 | 171 | obdélník | A |
| II | 252 | 1250 | 108 | obdélník | B |
| III | 252 | 1250 | 108 | lichoběžník | B |

Obr. 7.5 Příčné řezy výtokových profilů všech tří modelů



Poměrně velký rozměr délky obou žlabů byl zvolen z následujícího důvodu. Tato práce se zaměřuje na místní ztrátu na výtoku a víry, jež se v tomto odporu vytvářejí, se propagují i za místem svého vzniku a rozpadají se až ve značné délce za výtokem. Hodnotu úrovně hladiny za výtokem je tedy nutno měřit v dostatečné vzdálenosti za místním odporem, kde se jeho vliv již dále neprojevuje. Jestliže by žlab nebyl dostatečně dlouhý, naměřené výsledky by nebyly příliš spolehlivé.

7.2 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ

Na modelech se měřily pouze dvě veličiny, a to průtok modelem a výšky úrovní hladin při jednotlivých měřených stavech. K měření průtoků byly využity indukční průtokoměry, jež jsou podrobněji popsány dále, k měření hladin bylo použito mechanické hrotové měřítko umístěné na pojezdném vozíku. Všechna měření byla prováděna manuálně autorkou této práce.

7.2.1 ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ PRŮTOKU

Průtok protékající modelem I byl měřen elektrickým indukčním průtokoměrem značky Krohne, který byl instalován na přívodním potrubí do žlabu. Chyba měření, která mohla být způsobena tímto přístrojem, se pohybuje od 0.37 % do 0.74 % ze skutečné hodnoty v závislosti na velikosti průtoku [14]. Na modelu II a III byl k měření použit indukční průtokoměr značky Badger Meter Magnetoflow Primo, jehož chyba se pohybovala v rozmezí od 0.25 % pro větší průtoky až do 0.5 % pro menší průtoky [16]. Fotografie obou průtokoměrů lze vidět na Foto 7.6.

Foto 7.6 Průtokoměr Krohne - žlab A (vlevo) a průtokoměr Badger Meter - žlab B (vpravo)



Měření bylo též průběžně ověřováno dvěma měrnými Thomsonovými přelivy, které byly umístěny ve zmíněných nádržích. Úrovně hladin nad měrnými přelivy byly měřeny hrotovými měřítky umístěnými v tlumících skleněných válcích, které byly spojeny s měrnými nádržemi a dohromady tak tvořily spojené nádoby. Výšky hladin, které byly odečteny v odměrných válcích, byly pomocí tabulek a vzorců přepočteny na velikosti průtoků. Kontrolní zařízení pro správné hodnoty průtoků (viz Foto 7.7) tedy tvořily Thomsonovy přelivy s odměrnými válci a hrotovými měřítky.

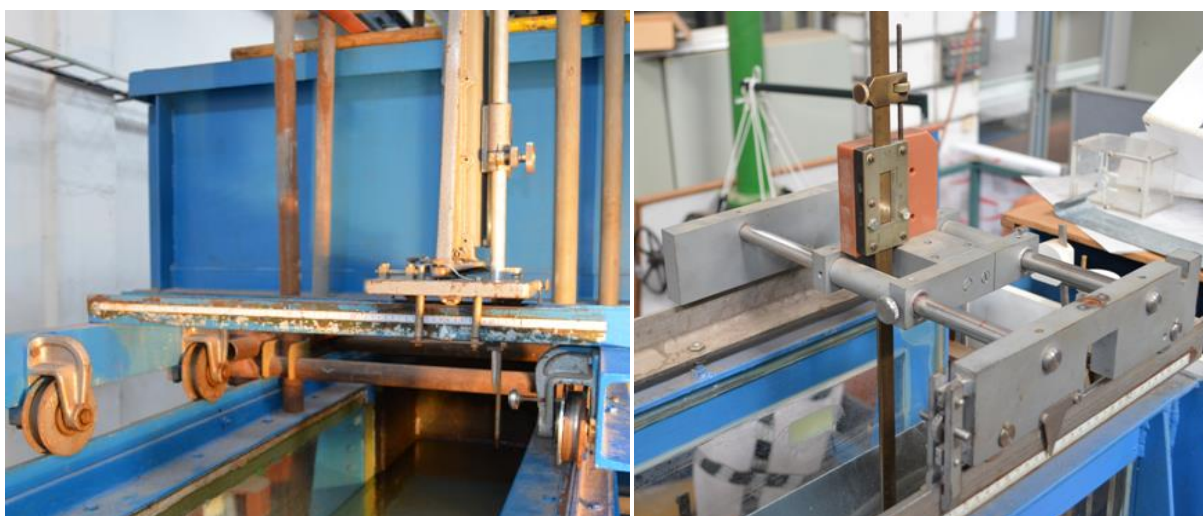
Foto 7.7 Thomsonův měrný přeliv s odměrným válcem



7.2.2 ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ HLADIN

Úrovně hladin byly na všech třech modelech měřeny pomocí posuvných hrotových měřitek, která byla umístěna na pojízdných vozících pohybujících se po kolejnicích žlabů. Měřítka byla posuvná jak v podélném směru (po délce žlabů), tak v příčném směru (po šířce žlabů), jak lze vidět na Foto 7.8. V obou směrech byla rovněž umístěna délková měřítka, aby bylo možno odečítat přesnou polohu měřících zařízení. Vertikální polohy hladin byly měřeny pomocí hrotů, které bylo možné spouštět a vytahovat tak, aby ostré hroty byly v přesném kontaktu s měřenou hladinou. Úrovně hladin byly odečítány na dělených měřících s nonii o přesnosti 0.1 mm.

Foto 7.8 Hrotové měřítko na posuvném vozíku pro žlab A (vlevo) a žlab B (vpravo)



7.3 PROVEDENÁ MĚŘENÍ

Na všech třech modelech byly měřeny průtoky a úrovně hladin v několika bodech. Na modelu I byla provedena měření pro pět různých průtoků (45 l/s, 35 l/s, 25 l/s, 15 l/s a 7 l/s) a pro každý z nich byly modelovány čtyři stavy dle hloubky zatopení dolní vodou, což je celkem 20 stavů. Stav s největším průtokem v kombinaci s největší hloubkou zatopení dolní vodou však nemohl být změřen z důvodu nedostatečné kapacity žlabu A, a proto bylo na modelu I celkem provedeno pouze 19 měření.

Na každém z modelů II a III bylo provedeno 21 měření, dohromady tedy 42 měření. Měření probíhala opět pro pět různých průtoků (15 l/s, 12 l/s, 9 l/s, 6 l/s a 3 l/s) a pět stavů zatopení. Měření byla prováděna pro takové průtoky a stavy zatopení, aby byla pokryta prakticky celá kapacita laboratorního žlabu B.

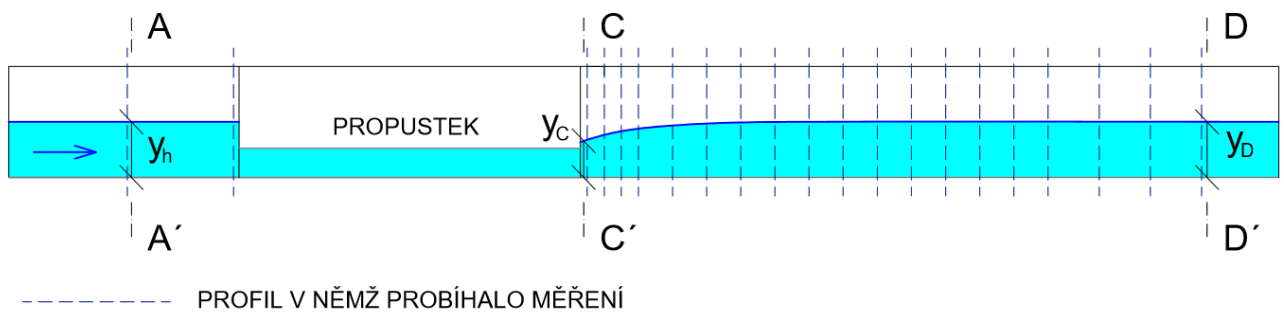
Velikosti průtoků a stavy zatopení pro jednotlivé modely lze vidět v Tab. 7.2, jež rovněž znázorňuje označení jednotlivých stavů zatopení pomocí římských číslic v závislosti na úrovni hladiny za výtokem z propustku.

Tab. 7.2 Značení stavů v závislosti na velikosti zatopení

| Model | I | II a III |
|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Označení stavu zatopení | Úroveň hladiny nad stropem propustku | Úroveň hladiny nad stropem propustku |
| I | 0 cm | 0 cm |
| II | 1 - 2 cm | 1 - 2 cm |
| III | 8 - 9 cm | 4 - 5 cm |
| IV | 18 - 19 cm | 8 - 9 cm |
| V | \ | 13 - 14 cm |

Pro každý stav tedy bylo měřeno několik úrovní hladin v různých místech. Převážně byly měřeny hladiny v podélném směru v osách žlabů, avšak byla také provedena měření ve směru příčném po šířkách žlabů. Úrovně hladin horní vody před vtoky do propustků byly měřeny ve dvou profilech a hladiny v úsecích za výtoky z propustků byly ve většině případů měřeny v 18 až 19 profilech. Polohy podélných profilů, v nichž se odehrávala měření, jsou vyznačeny na Obr. 7.6. Na tomto obrázku jsou rovněž vyznačeny hloubky, jež byly na modelech měřeny a s jejichž hodnotami bylo dále počítáno.

Obr. 7.6 Polohy podélných profilů, v nichž probíhala měření



Na Obr. 7.6 jsou vyznačeny tři nejdůležitější úrovně hladin. Jedná se o úroveň hladiny horní vody, což je hloubka y_h , která se nachází před vtokem do propustku (v profilu A) a reprezentuje hodnotu energetické výšky potřebné k převedení daného průtoku propustkem. Dále se jedná o úroveň hladiny těsně za výtokem z propustku v profilu C, jež je v textu nadále označena symbolem y_c nebo h_x . Třetí důležitou hladinou je hladina dolní vody y_D , což je taková hloubka vody, která se nachází v dostatečné vzdálenosti za výtokem z propustku (v profilu D), kde již proudění není ovlivněno změnou průřezu.

Všechny naměřené úrovně hladin byly pečlivě zaznamenány včetně velikostí průtoků protékající modely za daných podmínek. Z těchto dat byly následovně vyhodnoceny podstatné údaje a učiněny patřičné závěry. O způsobu vyhodnocení naměřených veličin pojednává kapitola 8. Před samotným vyhodnocením je však nutné zamyslet se nad správností naměřených hodnot, a proto je následující podkapitola 7.3.1 věnována nejistotám měření.

7.3.1 NEJISTOTY MĚŘENÍ

Nejdříve je nutno definovat dva základní pojmy, kterými jsou pojem chyba a pojem nepřesnost. Chyba je rozdíl mezi měřenou a skutečnou hodnotou, zatímco nejistota je kvantifikace pochyby o naměřené hodnotě. Hodnotu nejistoty měření je nutno znát, jelikož je požadováno dosáhnout kvalitních výsledků měření. Rovněž jsou nejistoty měření důležité při kalibraci různých přístrojů, při testech a při určování tolerance, tzn., zda je hodnota v určitém tolerovaném rozmezí či nikoli.

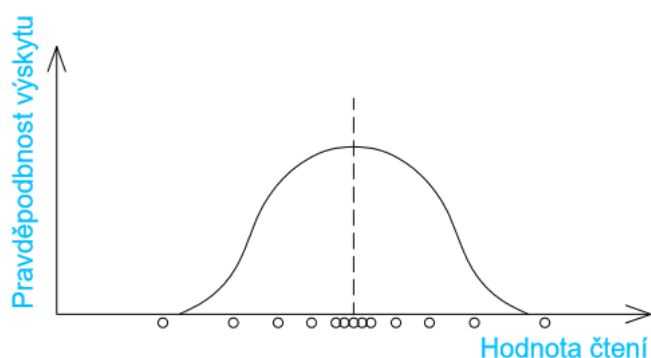
Nejistoty měření mohou být způsobeny:

- *Měřícím přístrojem* – existuje možnost, že samotný přístroj bude mít odchylku od skutečné hodnoty, nebo mohou nastat problémy z důvodu stárnutí mechanismu, či se může stát, že je měřítko špatně čitelné. Konkrétně v této práci může být tato nejistota způsobena hrotovým měřítkem a průtokoměrem.
- *Měřeným subjektem* - zde například může docházet ke kolísání hladiny nebo průtoků. Vzhledem k uzavřenému hydraulickému okruhu zde může docházet ke změnám hladiny v dolní nádrži a tím i dopravní výšky čerpadla. To pak nemusí čerpat konstantní množství vody a průtok tak může být rozkolísaný.
- *Měřícím procesem* – v tomto případě je nelehkým úkolem odhadnout okamžik, kdy se hrot posuvného měřítka přesně dotkne stále se měnící hladiny a nepřesnost tak může vzniknout velmi snadno.
- *Dovednostmi měřící osoby* – každý člověk může čtení na měřítku vyhodnotit jinak, stejně tak jako může určit jinak polohu hladiny. V provedeném výzkumu však celý soubor měření prováděla pouze jedna osoba, čímž se zčásti eliminoval tento typ nejistoty.
- *Okolními podmínkami* - okolní podmínky jako jsou teplota, tlak vzduchu, vlhkost a mnoho dalších okolností mohou ovlivnit výsledky experimentu. Při provádění výzkumu však byly laboratorní podmínky téměř stálé a neměnily se natolik, aby ovlivnily výsledky experimentu.

Následující text je věnován definicím teoretických pojmů, které jsou dále potřeba k zjištění nejistot měření. Jsou zde popsána rozdělení pravděpodobnosti výskytu hodnot měření a také rovnice pro výpočet standardních nejistot.

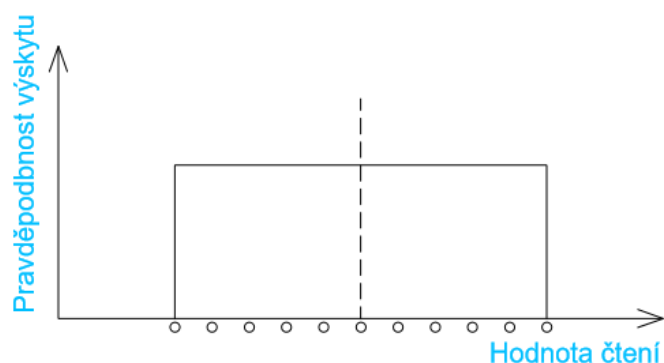
V případě měření hladiny a průtoku se při měření nejpravděpodobněji dostane střední hodnota úrovně hladiny a měření s velkou odchylkou od této střední hodnoty bude méně pravděpodobné. To znamená, že naměřené hodnoty se budou pohybovat v blízkosti střední hodnoty. Z toho vyplývá, že se v tomto případě jedná o normální (Gaussovo) rozdělení nejistot, jehož podobu lze sledovat na Obr. 7.7.

Obr. 7.7 Graf normálního rozdělení



Rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti se používá v případě, že jsou hodnoty libovolně rozmístěny mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou. Znázornění rovnoměrného rozdělení lze sledovat na Obr. 7.8. Toto rozdělení je použito pro nejistoty uvedené v kalibračním listu měřících zařízení a rovněž pro nejistoty způsobené kolísáním hodnot.

Obr. 7.8 Graf rovnoměrného rozdělení



Nyní budou definovány pojmy potřebné k určení nejistot. Standardní nejistota u je interval, jehož horní a dolní limit je možno určit přičtením, případně odečtením standardní odchylky. Standardní nejistota neinformuje pouze o rozsahu naměřených hodnot, ale především o nejistotě průměru. Pro normální rozdělení se počítá jako podíl standardní odchylky a odmocniny z počtu měření, jak lze vidět v rovnici (7.1). Pro rovnoměrné rozdělení je vzorec stejný, pouze v čitateli se objevuje odmocnina ze tří.

Kombinovaná standardní nejistota u_c je kombinací dílčích standardních nejistot a spočte se pomocí rovnice (7.2) jako druhá odmocnina ze součtu kvadrátů jednotlivých nejistot. Rozšířená standardní nejistota u_e vznikne součinem kombinované standardní nejistoty a faktoru k , jež je zapsán v rovnici (7.3).

$$u = \frac{s}{\sqrt{n_m}} \quad u = \frac{s}{\sqrt{3}} \quad (7.1)$$

u [...] standardní nejistota
 s [...] standardní odchylka
 n_m [ks] počet měření

$$u_c = \sqrt{\sum u_i^2} \quad (7.2)$$

u_c [...] kombinovaná standardní nejistota

$$u_e = k \cdot u_c \quad (7.3)$$

u_e [...] rozšířená standardní nejistota
 k [-] násobící faktor pro různé intervaly spolehlivosti

Předchozí text však platí jen v případě, že jednotlivé veličiny nejsou korelované, což znamená, že musí být vzájemně nezávislé. Pro normální rozdělení je faktor k roven 1.0 pro interval spolehlivosti 68 %. Další hodnoty faktoru k pro jednotlivé intervaly spolehlivosti jsou uvedeny v Tab. 7.3.

Tab. 7.3 Hodnoty k faktoru v závislosti na intervalu spolehlivosti

| k | interval spolehlivosti |
|------|------------------------|
| 1.00 | 68.0 % |
| 2.00 | 95.0 % |
| 2.58 | 99.0 % |
| 3.00 | 99.7 % |

Při zjišťování velikosti nejistot měření byl zvolen následující postup. Nejdříve byly zaznamenány naměřené hodnoty veličin včetně detailních informací o měřících zařízeních a o teplotě a jiných okolních podmínkách. Dále byla provedena úvaha, které nejistoty mohly při měření vzniknout a všechny tyto zdroje nejistot byly zaznamnány do Tab. 7.4. Poté byl proveden odhad velikostí jednotlivých nejistot a výpočet kombinované a rozšířené standardní nejistoty a vše bylo zaznamenáno do Tab. 7.4.

Pro ukázkou je zde počítáno s jednou konkrétní naměřenou hodnotou úrovně hladiny (407 mm) a jednou konkrétní velikostí průtoku (15 l/s).

Tab. 7.4 Přehled nejistot měření

| Zdroj nejistoty | Hodnota | Rozdělení pravděpodobnosti | Dělicí faktor | Standardní nejistota |
|-------------------------------------|---------|-------------------------------|------------------|-------------------------|
| Úroveň hladiny | | | | |
| Nejistota z kalibračního listu | 0.0407 | rovnoměrné | $\sqrt{3}$ | 0.0235 |
| Rozlišení (velikost dílků) | 0.1000 | rovnoměrné | $\sqrt{3}$ | 0.0577 |
| Kolísání hladiny | 2.0350 | rovnoměrné | $\sqrt{3}$ | 1.1749 |
| Standardní nejistota měřené hladiny | 0.5000 | rovnoměrné | $\sqrt{3}$ | 0.2887 |
| Kombinovaná standardní nejistota | | normální | \ | 1.2115 |
| Rozšířená standardní nejistota | | normální | k = 2.0 | 2.4229 |
| Průtok | | | | |
| Nejistota z kalibračního listu | 0.0750 | rovnoměrné | $\sqrt{3}$ | 0.0433 |
| Kolísání průtoku | 0.1500 | rovnoměrné | $\sqrt{3}$ | 0.0866 |
| Kombinovaná standardní nejistota | | normální | \ | 0.0968 |
| Rozšířená standardní nejistota | | normální | k = 2.0 | 0.1937 |

Pro tento případ je tedy výsledek zapsán ve tvaru: úroveň hladiny je 407.00 mm ± 2.42 mm pro interval spolehlivosti 95 % a velikost průtoku činí 15 l/s ± 0.19 l/s pro interval spolehlivosti 95 %.

8 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Z naměřených dat byly zjišťovány jednak hodnoty celkové ztráty v propustku a rovněž hodnoty ztráty na výtoku z propustku. Naměřená data byla z hlediska celkové ztráty vyhodnocována pomocí Bernoulliho rovnice, avšak při výpočtech ztráty na výtoku bylo vyhodnocení provedeno dvěma způsoby. Nejdříve byla použita samotná Bernoulliho rovnice a poté Bernoulliho rovnice v kombinaci s větou o hybnosti. O obou těchto rovnicích pojednává podkapitola 3.1.

8.1 VYHODNOCENÍ DLE BERNOULLIHO ROVNICE

Jelikož byla k experimentům používána jako proudící médium voda, jež je skutečnou kapalinou a proudění bylo považováno za ustálené, byla pro vyhodnocení naměřených dat použita Bernoulliho rovnice ve tvaru rovnice (3.5), jak již byla odvozena v podkapitole 3.1.1:

$$y_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_{CELK} \quad (8.1)$$

Jak již bylo zmíněno, součet polohové, tlakové a rychlostní výšky je roven energetické výšce v profilu, jež se značí symbolem E . Předchozí rovnici je tudíž možno zapsat ve tvaru:

$$E_1 = E_2 + Z_{CELK} \quad (8.2)$$

CELKOVÁ ZTRÁTA

Pro výpočet celkové ztráty v propustku byla Bernoulliho rovnice použita pro profil A před vtokem a profil D v dostatečné vzdálenosti za výtokem z propustku. Jelikož oba profily se nacházely v místech, kde probíhalo proudění o volné hladině, působil na obě hladiny atmosférický tlak a hodnoty tlakových výšek tudíž byly na obou stranách rovnice shodné a vzájemně se odečetly. Pak byla tedy celková ztráta vypočtena dle rovnice:

$$Z_{CELK} = E_A - E_D = \left(y_h + \frac{v_h^2}{2g} \right) - \left(y_D + \frac{v_D^2}{2g} \right) \quad (8.3)$$

| | | |
|--------------------|-----|-------------------------------|
| E_A | [m] | energetická výška v profilu A |
| E_D | [m] | energetická výška v profilu D |
| y_h | [m] | úroveň hladiny horní vody |
| y_D | [m] | úroveň hladiny dolní vody |
| $\frac{v_h^2}{2g}$ | [m] | rychlostní výška v profilu A |
| $\frac{v_D^2}{2g}$ | [m] | rychlostní výška v profilu D |

Úrovně hladin y_h a y_D byly naměřeny na modelu v místech, která lze vidět na Obr. 7.6. Rychlosti však experimentálně zjišťovány nebyly, avšak byl měřen průtok, z jehož hodnoty se snadno dopočetly rychlosti v_h a v_D v jednotlivých profilech. Rychlosti byly spočteny z následujících výrazů:

$$v_h = \frac{Q}{S_h} \quad a \quad v_D = \frac{Q}{S_D} \quad (8.4)$$

| | | |
|-------|------------------------------------|-----------------------------------|
| v_h | [m.s ⁻¹] | rychlost v profilu A |
| v_D | [m.s ⁻¹] | rychlost v profilu D |
| Q | [m ³ .s ⁻¹] | průtok protékající modelem |
| S_h | [m ²] | obsah průtočné plochy v profilu A |
| S_D | [m ²] | obsah průtočné plochy v profilu D |

ZTRÁTA NA VÝTOKU

Pro výpočet ztráty na výtoku byla Bernoulliho rovnice počítána pro profil C těsně za výtokem a profil D na konci žlabu. Na hladiny v profilech C a D rovněž působil atmosférický tlak a tlakové výšky se rovněž vyrovnaly. Rovnice pro výpočet ztráty na výtoku pak vypadala následovně:

$$Z_{VÝT} = E_C - E_D = \left(y_C + \frac{v_C^2}{2g} \right) - \left(y_D + \frac{v_D^2}{2g} \right) \quad (8.5)$$

| | | |
|--------------------|-----|--|
| E_C | [m] | energetická výška v profilu C |
| E_D | [m] | energetická výška v profilu D |
| y_C | [m] | úroveň hladiny vody těsně za výtokem z propustku v profilu C |
| y_D | [m] | úroveň hladiny dolní vody |
| $\frac{v_C^2}{2g}$ | [m] | rychlostní výška v profilu C |
| $\frac{v_D^2}{2g}$ | [m] | rychlostní výška v profilu D |

Na modelu byly opět měřeny pouze úrovně hladin y_C a y_D (viz Obr. 7.6) a rychlosti v jednotlivých profilech byly spočteny pomocí průtoků a obsahů průtočných profilů:

$$v_C = \frac{Q}{S_C} \quad a \quad v_D = \frac{Q}{S_D} \quad (8.6)$$

| | | |
|-------|------------------------------------|-----------------------------------|
| v_C | [m.s ⁻¹] | rychlost v profilu C |
| v_D | [m.s ⁻¹] | rychlost v profilu D |
| Q | [m ³ .s ⁻¹] | průtok protékající modelem |
| S_C | [m ²] | obsah průtočné plochy v profilu C |
| S_D | [m ²] | obsah průtočné plochy v profilu D |

SOUČINITEL MÍSTNÍ ZTRÁTY NA VÝTOKU

Kromě hodnoty ztráty na výtoku byl též dopočítáván součinitel místní ztráty na výtoku. Ten byl získán z rovnice (4.1) pro proudění o volné hladině a následně vyjádřen pomocí rovnice (8.7).

$$\xi_{VÝT} = \frac{Z_{VÝT}}{\left(\frac{v^2 - v_D^2}{2g}\right)} \quad (8.7)$$

| | | |
|-------------|----------------------|--|
| $\xi_{VÝT}$ | [-] | součinitel místní ztráty na výtoku |
| $Z_{VÝT}$ | [m] | hodnota ztráty na výtoku |
| v | [m·s ⁻¹] | rychlost proudění v propustku |
| v_D | [m·s ⁻¹] | střední průřezová rychlost v korytě za výtokem z propustku |

Součinitel místní ztráty na výtoku byl také získán z rovnice (4.8) pro tlakové proudění a jeho vyjádření je možno sledovat v rovnici (8.8). V podkapitole 9.2, jež se věnuje ztrátovým součinitelům, jsou hodnoty součinitelů vypočtené těmito dvěma způsoby (pomocí rovnic (8.7) a (8.8)) porovnány.

$$\xi_{VÝT} = \frac{Z_{VÝT}}{\frac{v^2}{2g}} \quad (8.8)$$

8.2 VYHODNOCENÍ DLE BERNOULLIHO ROVNICE V KOMBINACI S VĚTOU O HYBNOSTI

Tato podkapitola se týká pouze vyhodnocování ztráty na výtoku, jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly. Jelikož hladina v profilu C byla při fyzikálním modelování proudění velmi neklidná a rozvlněná, mohlo tak snadno dojít k nepřesnému odečtu hodnoty úrovně této hladiny. Hladina v profilu C těsně za výtokem byla proto dopočtena pomocí věty o hybnosti a následně dosazena do výše popsané Bernoulliho rovnice. Věta o hybnosti pro profily C a D vypadá následovně:

$$S_C z_{TC} = S_D z_{TD} + \frac{Q^2}{g} \left(\frac{1}{S_D} - \frac{1}{S_C} \right) \quad (8.9)$$

| | | |
|----------|-------------------|--|
| S_C | [m ²] | obsah průtočné plochy v profilu C |
| S_D | [m ²] | obsah průtočné plochy v profilu D |
| z_{TC} | [m] | vertikální poloha souřadnice těžiště průtočné plochy v profilu C |
| z_{TD} | [m] | vertikální poloha souřadnice těžiště průtočné plochy v profilu D |

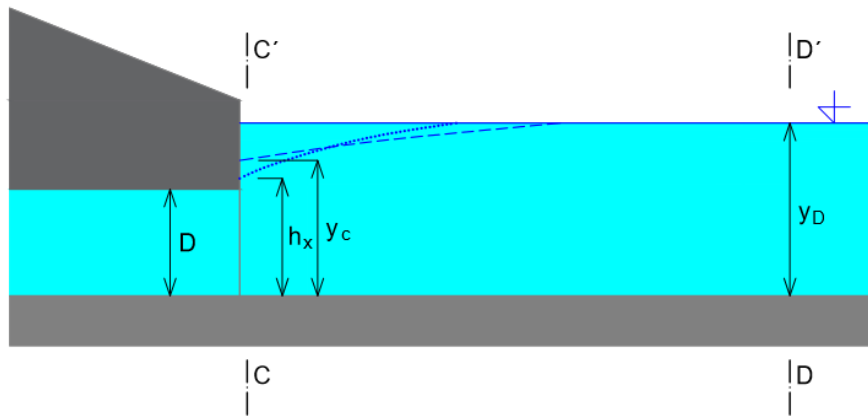
Do této rovnice bylo následně dosazeno. Lze si povšimnout, že v profilu D bylo vždy počítáno s hloubkou y_D , zatímco při výpočtu v profilu C byly použity dvě různé hodnoty hloubek. Rychlostní výška byla spočtena pro profil uvnitř propustku, zatímco hydrostatická síla byla počítána pro profil C těsně za výtokem z propustku.

$$S_C z_{TC} = S_D z_{TD} + \frac{Q^2}{g} \left(\frac{1}{S_D} - \frac{1}{S} \right) \quad (8.10)$$

| | | |
|-----|-------------------|--------------------------------------|
| S | [m ²] | obsah průtočného průřezu v propustku |
|-----|-------------------|--------------------------------------|

V rovnicích (8.11) a (8.12) lze tedy vidět, že pro výpočet rychlostní výšky v profilu C byl použit vzorec pro obsah kruhového profilu (profil propustku) a pro výpočet hydrostatické síly, kde figuruje průtočná plocha a těžiště této plochy, byly použity vzorce s hloubkou h_x . Hloubka h_x tedy byla dopočtena z věty o hybnosti proudu a následně dosazena do Bernoulliho rovnice. Rozdíl mezi výpočtem popsaným v podkapitole 8.1 a výpočtem z podkapitoly 8.2 je tedy v odlišné hloubce vody v profilu C na výtoku z propustku, kde v prvním případě bylo počítáno s naměřenou hodnotou hloubky y_C a v druhém případě bylo použito hodnoty h_x dopočtené pomocí věty o hybnosti. Rozdíl mezi těmito dvěma hodnotami lze pozorovat na Obr. 8.1.

Obr. 8.1 Znáznornění hloubky h_x v profilu C



Bylo tedy dosazeno do rovnice (8.10) a vznikly tak dvě nové rovnice v závislosti na tvaru výtokového profilu. Pro modely I a II, jež měly obdélníkový tvar výtokového profilu, byla odvozena rovnice (8.11), naopak pro model III, který měl výtokový profil lichoběžníkového tvaru, byla sestavena rovnice (8.12).

$$\frac{1}{2} h_x^2 b = \frac{1}{2} y_D^2 b + \frac{Q^2}{g} \left(\frac{1}{y_D b} - \frac{1}{\pi r^2} \right) \quad (8.11)$$

| | | |
|-------|-----|---|
| h_x | [m] | hloubka v profilu C dopočtená pomocí věty o hybnosti |
| b | [m] | šířka ve dně v profilech C a D za výtokem z propustku |
| π | [-] | Ludolfovo číslo |
| r | [m] | poloměr kruhového profilu propustku |

$$\left(h_x b + \frac{h_x^2}{4} \right) \left(\frac{h_x}{3} \cdot \frac{3b + h_x}{2b + 0.5h_x} \right) = \left(y_D b + \frac{y_D^2}{4} \right) \left(\frac{y_D}{3} \cdot \frac{3b + y_D}{2b + 0.5y_D} \right) + \frac{Q^2}{g} \left(\frac{1}{(y_D b + \frac{y_D^2}{4})} - \frac{1}{\pi r^2} \right) \quad (8.12)$$

Z rovnice (8.11) pro obdélníkový tvar koryta za propustkem tak byla vyjádřena hodnota hloubky h_x těsně za výtokem z propustku:

$$h_x = \sqrt{y_D^2 + \frac{2Q^2}{gb} \left(\frac{1}{y_D b} - \frac{1}{\pi r^2} \right)} \quad (8.13)$$

Z rovnice (8.12) pro lichoběžníkový tvar koryta za propustkem však hloubka h_x nemohla být exaktně vyjádřena. Proto byla její hodnota získána postupnou iterací.

Po získání hloubky h_x s ní bylo operováno jako s hloubkou y_C . Byla tedy dosazena do Bernoulliho rovnice (8.5) a z její hodnoty byla dopočtena i rychlost a rychlostní výška. Hodnoty vypočtené Bernoulliho rovnicí v kombinaci s větou o hybnosti se ukázaly jako více spolehlivé jak při vyhodnocování dat v této práci, tak již v provedeném experimentu, kterému se věnuje práce [11]. Proto budou nadále prezentovány výsledky vypočtené pouze tímto způsobem.

9 VÝSLEDKY EXPERIMENTU

Tato kapitola uvádí výsledky získané výpočtem z naměřených veličin a zároveň tyto výsledky porovnává s hodnotami, které jsou vypočteny pomocí teoretických výrazů uvedených v kapitole 4.

9.1 HODNOTY ZTRÁT

Nejprve byly dle vyhodnocovacích postupů z kapitoly 8 zjištěny hodnoty celkové ztráty v propustku pro všechny tři modely, konkrétně byla použita rovnice (8.3). Celková ztráta Z_{CELK} byla tedy vypočítána jako výškový rozdíl čáry energie v profilu A před vestavbou a v profilu D, kde se nacházela hladina y_D neovlivněná rozšířením proudu za výtokem. Úrovně čar energie v těchto profilech byly vypočítány přičtením rychlostních výšek stanovených na základě průřezových rychlostí k výškovým úrovním hladin v těchto profilech při zavedení Coriolisova čísla hodnotou 1.0. Vypočtené hodnoty celkové ztráty v mm jsou uvedeny v Tab. 9.1, kde je možno vidět, že se velikosti celkových ztrát pohybovaly v rozmezí od 5 mm pro nejmenší průtoky a stavy zatopení až po 248 mm pro největší průtoky a nejvyšší stavy zatopení.

Tab. 9.1 Hodnoty celkových ztrát v mm pro modely I, II a III

| Celková ztráta | | Model I | Celková ztráta | | Model II | Model III |
|-----------------------|-----|------------------------|-----------------------|-----|------------------------|------------------------|
| Průtoky [l/s] a stavy | | Reálná Z_{CELK} [mm] | Průtoky [l/s] a stavy | | Reálná Z_{CELK} [mm] | Reálná Z_{CELK} [mm] |
| 45 | I | 247.9 | 15 | I | 171.2 | 134.6 |
| | II | 249.4 | | II | 176.8 | 141.4 |
| | III | 260.7 | | III | 174.4 | 149.1 |
| 35 | I | 146.8 | | IV | 176.6 | 154.6 |
| | II | 148.0 | 12 | I | 102.6 | 80.2 |
| | III | 157.3 | | II | 102.5 | 85.8 |
| | IV | 162.2 | | III | 109.0 | 91.7 |
| 25 | I | 74.1 | | IV | 117.4 | 95.4 |
| | II | 75.1 | | V | 118.4 | 104.6 |
| | III | 76.3 | 9 | I | 59.5 | 44.7 |
| | IV | 86.6 | | II | 61.9 | 48.2 |
| 15 | I | 24.9 | | III | 62.5 | 50.1 |
| | II | 25.0 | | IV | 66.6 | 54.0 |
| | III | 28.3 | | V | 69.0 | 58.2 |
| | IV | 27.7 | 6 | I | 25.3 | 19.1 |
| 7 | I | 5.2 | | II | 26.9 | 20.9 |
| | II | 5.4 | | III | 28.4 | 21.7 |
| | III | 8.2 | | IV | 29.4 | 24.3 |
| | IV | 7.0 | | V | 30.2 | 26.9 |
| | | | 3 | I | 5.7 | 4.5 |
| | | | | II | 6.4 | 4.9 |

Dále byly vyhodnoceny hodnoty velikosti ztráty na výtoku pro jednotlivé stavy a průtoky, jak lze vidět v Tab. 9.2 a v Tab. 9.3. Vyhodnocení bylo provedeno pomocí Bernoulliho rovnice v kombinaci s větou o hybnosti, jak je popsáno v podkapitole 8.2. Ztráta rozšířením proudu za výtokem z propustku $Z_{V\dot{Y}T}$ byla tedy vypočtena jako výškový rozdíl čáry energie ve výtokovém profilu C a v profilu D, kde se nacházela hladina y_D neovlivněná rozšířením proudu za výtokem. Energetická výška v profilu D byla spočtena standardně jako součet úrovně hladiny a rychlostní výšky v profilu D, kdežto v profilu C byla vypočtena jako součet hloubky h_x v profilu C těsně za výtokem a rychlostní výšky spočtené z průřezové rychlosti v profilu propustku.

Kromě těchto reálných hodnot byly do tabulky rovněž vloženy hodnoty vypočtené třemi způsoby známými z literatury, jež byly popsány v kapitole 4. Jedná se o výpočet v režimu s volnou hladinou se součiniteli $\xi_{V\dot{Y}T} = 0.75$ a $\xi_{V\dot{Y}T} = 1.0$ a o výpočet v režimu tlakovém, při kterém bylo použito výrazu Borda-Carnot.

Tab. 9.2 Hodnoty ztrát na výtoku v mm pro model I

| Ztráta na výtoku | | Model I | | | |
|------------------|-----|--------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| | | Reálná $Z_{V\dot{Y}T}$ [mm] | $\xi = 0.75$ $Z_{V\dot{Y}T}$ [mm] | $\xi = 1.0$ $Z_{V\dot{Y}T}$ [mm] | Borda $Z_{V\dot{Y}T}$ [mm] |
| 45 | I | 119.5 | 143.2 | 191.0 | 130.5 |
| | II | 128.6 | 144.2 | 192.3 | 136.4 |
| | III | 142.1 | 145.6 | 194.1 | 146.5 |
| 35 | I | 72.9 | 86.3 | 115.1 | 77.0 |
| | II | 73.7 | 86.4 | 115.2 | 77.5 |
| | III | 84.9 | 87.8 | 117.1 | 86.7 |
| | IV | 91.2 | 88.5 | 118.0 | 92.2 |
| 25 | I | 35.2 | 43.5 | 58.0 | 36.5 |
| | II | 36.6 | 43.7 | 58.3 | 37.8 |
| | III | 41.6 | 44.5 | 59.4 | 42.2 |
| | IV | 47.9 | 45.3 | 60.3 | 48.1 |
| 15 | I | 12.4 | 15.2 | 20.3 | 12.5 |
| | II | 12.5 | 15.3 | 20.4 | 12.7 |
| | III | 15.3 | 15.8 | 21.0 | 15.4 |
| | IV | 16.9 | 15.9 | 21.2 | 17.0 |
| 7 | I | 2.7 | 3.4 | 4.5 | 2.7 |
| | II | 2.9 | 3.4 | 4.6 | 2.9 |
| | III | 3.3 | 3.5 | 4.7 | 3.3 |
| | IV | 3.8 | 3.5 | 4.7 | 3.8 |

Tab. 9.3 Hodnoty ztrát na výtoku v mm pro modely II a III

| Ztráta na výtoku | | Model II | | | | Model III | | | |
|-----------------------|-----|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Průtoky [l/s] a stavy | | Reálná | $\xi = 0.75$ | $\xi = 1.0$ | Borda | Reálná | $\xi = 0.75$ | $\xi = 1.0$ | Borda |
| | | $Z_{V\dot{Y}T}$ [mm] | $Z_{V\dot{Y}T}$ [mm] | $Z_{V\dot{Y}T}$ [mm] | $Z_{V\dot{Y}T}$ [mm] | $Z_{V\dot{Y}T}$ [mm] | $Z_{V\dot{Y}T}$ [mm] | $Z_{V\dot{Y}T}$ [mm] | $Z_{V\dot{Y}T}$ [mm] |
| 15 | I | 77.4 | 97.2 | 129.5 | 85.1 | 64.2 | 89.8 | 119.7 | 59.0 |
| | II | 82.3 | 97.8 | 130.4 | 88.4 | 73.8 | 92.3 | 123.1 | 66.1 |
| | III | 86.2 | 98.2 | 131.0 | 91.1 | 80.1 | 93.8 | 125.1 | 71.2 |
| | IV | 92.0 | 98.9 | 131.9 | 95.5 | 84.5 | 94.8 | 126.4 | 74.8 |
| 12 | I | 42.8 | 60.7 | 80.9 | 47.9 | 32.2 | 52.9 | 70.5 | 28.0 |
| | II | 54.7 | 62.6 | 83.5 | 56.8 | 37.3 | 55.0 | 73.3 | 32.0 |
| | III | 55.3 | 62.7 | 83.6 | 57.3 | 45.2 | 57.8 | 77.0 | 38.5 |
| | IV | 59.7 | 63.3 | 84.4 | 61.1 | 50.5 | 59.4 | 79.1 | 43.2 |
| | V | 64.2 | 63.8 | 85.1 | 65.0 | 59.4 | 61.6 | 82.1 | 51.7 |
| 9 | I | 24.5 | 33.9 | 45.2 | 26.1 | 13.2 | 25.6 | 34.2 | 10.0 |
| | II | 27.8 | 34.6 | 46.1 | 28.9 | 18.7 | 29.1 | 38.8 | 14.7 |
| | III | 30.5 | 35.1 | 46.8 | 31.2 | 22.5 | 30.9 | 41.2 | 18.0 |
| | IV | 33.4 | 35.5 | 47.4 | 33.8 | 27.6 | 32.9 | 43.8 | 22.7 |
| | V | 35.7 | 35.8 | 47.8 | 36.0 | 33.3 | 34.5 | 46.0 | 28.5 |
| 6 | I | 10.4 | 14.8 | 19.8 | 10.8 | 4.4 | 9.5 | 12.7 | 2.8 |
| | II | 11.8 | 15.2 | 20.3 | 12.0 | 6.9 | 11.7 | 15.6 | 4.8 |
| | III | 13.0 | 15.5 | 20.6 | 13.2 | 9.0 | 13.1 | 17.4 | 6.7 |
| | IV | 14.6 | 15.7 | 21.0 | 14.7 | 12.2 | 14.5 | 19.3 | 9.8 |
| | V | 15.8 | 15.9 | 21.2 | 15.9 | 14.9 | 15.3 | 20.4 | 12.6 |
| 3 | I | 2.5 | 3.7 | 4.9 | 2.6 | 0.9 | 2.1 | 2.8 | 0.5 |
| | II | 2.8 | 3.7 | 5.0 | 2.8 | 1.8 | 2.9 | 3.9 | 1.2 |

V uvedených tabulkách lze sledovat, že reálné ztráty nejvíce odpovídá hodnota spočtená pomocí Bordova výrazu. Druhý nejpřesnější způsob výpočtu je pomocí rovnice (4.1) se součinitelem $\xi_{V\dot{Y}T} = 0.75$ a nejvíce nepřesné hodnoty udává stejná rovnice avšak s použitím hodnoty součinitele $\xi_{V\dot{Y}T} = 1.0$. Pro obdélníkový tvar výtokového profilu (pro modely I a II) hodnota ztráty spočtená pomocí Bordova výrazu nadhodnocuje skutečnou hodnotu ztráty v průměru o 3 %, zatímco ztráta spočtená pomocí rovnice (4.1) se součinitelem $\xi_{V\dot{Y}T} = 0.75$ ji v průměru nadhodnocuje o 16 % a použití rovnice se součinitelem $\xi_{V\dot{Y}T} = 1.0$ skutečnou hodnotu v průměru nadhodnocuje až o 53 %. Pro lichoběžníkový tvar výtokového profilu (pro model III) hodnota ztráty spočtená pomocí Bordova výrazu podhodnocuje skutečnou hodnotu ztráty v průměru o 21 %, zatímco ztráta spočtená pomocí rovnice (4.1) a součinitele $\xi_{V\dot{Y}T} = 0.75$ ji v průměru nadhodnocuje o 46 % a použití rovnice se součinitelem $\xi_{V\dot{Y}T} = 1.0$ skutečnou hodnotu v průměru nadhodnocuje až o 95 %.

9.2 HODNOTY SOUČiniteLE ZTRÁTY NA VÝTOKU

V Tab. 9.4 jsou uvedeny hodnoty součinitelů ztráty na výtoku pro jednotlivé průtoky a stavy pro veškeré popsané modely. Lze si všimnout, že pro každý z modelů jsou v tabulce dva sloupce hodnot součinitelů. Levý z nich nesoucí název volná hladina byl spočten jako podíl reálné ztráty na výtoku a rozdílu kvadrátů rychlostních výšek, jak lze vidět v rovnici (8.7). Pravý z nich nesoucí název tlakové proudění byl vypočten pomocí rovnice (8.8), a to jako podíl reálné ztráty na výtoku a rychlostní výšky v profilu propustku.

Tab. 9.4 Hodnoty součinitele ztráty na výtoku pro modely I, II a III

| Součinitel ztráty na výtoku | Model I | | Součinitel ztráty na výtoku | Model II | | Model III | | | |
|-----------------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| | Průtoky [l/s] a stavy | Volná hladina $\xi_{VYT} [-]$ | | Tlakové proudění $\xi_{VYT} [-]$ | Průtoky [l/s] a stavy | Volná hladina $\xi_{VYT} [-]$ | Tlakové proudění $\xi_{VYT} [-]$ | Volná hladina $\xi_{VYT} [-]$ | Tlakové proudění $\xi_{VYT} [-]$ |
| 45 | I | 0.63 | 0.60 | 15 | I | 0.60 | 0.57 | 0.54 | 0.47 |
| | II | 0.67 | 0.65 | | II | 0.63 | 0.61 | 0.60 | 0.55 |
| | III | 0.73 | 0.72 | | III | 0.66 | 0.64 | 0.64 | 0.59 |
| 35 | I | 0.63 | 0.61 | | IV | 0.70 | 0.68 | 0.67 | 0.62 |
| | II | 0.64 | 0.61 | 12 | I | 0.53 | 0.49 | 0.46 | 0.37 |
| | III | 0.73 | 0.71 | | II | 0.65 | 0.63 | 0.51 | 0.43 |
| | IV | 0.77 | 0.76 | | III | 0.66 | 0.64 | 0.59 | 0.52 |
| 25 | I | 0.61 | 0.58 | | IV | 0.71 | 0.69 | 0.64 | 0.58 |
| | II | 0.63 | 0.60 | | V | 0.75 | 0.74 | 0.72 | 0.69 |
| | III | 0.70 | 0.68 | 9 | I | 0.54 | 0.50 | 0.39 | 0.27 |
| | IV | 0.79 | 0.78 | | II | 0.60 | 0.57 | 0.48 | 0.38 |
| 15 | I | 0.61 | 0.57 | | III | 0.65 | 0.63 | 0.54 | 0.46 |
| | II | 0.61 | 0.58 | | IV | 0.71 | 0.69 | 0.63 | 0.57 |
| | III | 0.73 | 0.71 | | V | 0.75 | 0.73 | 0.72 | 0.68 |
| | IV | 0.80 | 0.79 | 6 | I | 0.53 | 0.48 | 0.35 | 0.20 |
| 7 | I | 0.59 | 0.56 | | II | 0.58 | 0.54 | 0.44 | 0.32 |
| | II | 0.64 | 0.61 | | III | 0.63 | 0.60 | 0.52 | 0.42 |
| | III | 0.71 | 0.69 | | IV | 0.70 | 0.67 | 0.63 | 0.56 |
| | IV | 0.79 | 0.78 | | V | 0.75 | 0.73 | 0.73 | 0.69 |
| | | | | 3 | I | 0.52 | 0.47 | 0.33 | 0.17 |
| | | | | | II | 0.56 | 0.52 | 0.46 | 0.33 |

V Tab. 9.4 je vidět, že hodnoty součinitele ztráty na výtoku se pohybují v rozmezí od 0.17 až po 0.80. Je tedy jasné, že teoretické hodnoty 0.75 a 1.0 nejsou úplně správné.

Podrobnější analýzu hodnot součinitelů poskytnou následující tabulky a grafy, kde jsou experimentálně získané hodnoty součinitele ξ_{EXP} porovnávány s teoretickými hodnotami součinitele ξ_{TEOR} . Byl vypočten podíl těchto hodnot ξ_{EXP}/ξ_{TEOR} a čím víc se tento podíl blíží jedné, tím byl teoretický výraz přesnější a blíží se tak hodnotě získané ze skutečně naměřených dat. Z Tab. 9.5 je patrné, že podíl se nejvíce blíží hodnotě jedna pro většinu případů především v pravém sloupci, který obsahuje data získaná pomocí Bordova výrazu.

Tab. 9.5 Hodnoty podílu ξ_{EXP}/ξ_{TEOR} pro model I

| Srovnání | | Model I | | |
|-----------------------|-----|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | $\xi = 0.75$ | $\xi = 1.0$ | Borda |
| Průtoky [l/s] a stavy | | ξ_{exp}/ξ_{teor} | ξ_{exp}/ξ_{teor} | ξ_{exp}/ξ_{teor} |
| 45 | I | 0.83 | 0.63 | 0.92 |
| | II | 0.89 | 0.67 | 0.94 |
| | III | 0.98 | 0.73 | 0.97 |
| 35 | I | 0.85 | 0.63 | 0.95 |
| | II | 0.85 | 0.64 | 0.95 |
| | III | 0.97 | 0.73 | 0.98 |
| | IV | 1.03 | 0.77 | 0.99 |
| 25 | I | 0.81 | 0.61 | 0.96 |
| | II | 0.84 | 0.63 | 0.97 |
| | III | 0.94 | 0.70 | 0.99 |
| | IV | 1.06 | 0.79 | 1.00 |
| 15 | I | 0.81 | 0.61 | 0.99 |
| | II | 0.82 | 0.61 | 0.99 |
| | III | 0.97 | 0.73 | 1.00 |
| | IV | 1.06 | 0.80 | 1.00 |
| 7 | I | 0.79 | 0.59 | 1.00 |
| | II | 0.86 | 0.64 | 1.00 |
| | III | 0.94 | 0.71 | 1.00 |
| | IV | 1.06 | 0.79 | 1.00 |

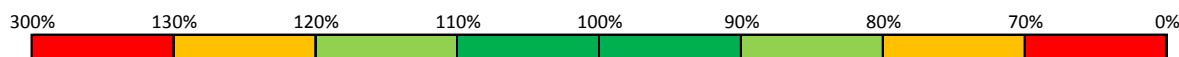
V Tab. 9.6 lze pozorovat velmi vysoké hodnoty poměru součinitelů u nízkých průtoků a nízkých stavů zatopení při vyjádření pomocí Bordova výrazu. Tento fakt je způsoben velmi nízkou hodnotou teoretického součinitele, který se v těchto případech pohybuje kolem hodnoty 0.17. Součinitel je spočten pomocí rovnice (4.7) a jeho nízká hodnota je zapříčiněna malou plochou v dolním profilu, která je v tomto výrazu ve jmenovateli. Závěr je takový, že pro tyto případy, kdy je nízký průtok a rovněž nízký stav zatopení, není vhodné používat Bordův výraz pro náhlé rozšíření, jelikož se téměř o žádné rozšíření nejedná. Tutu skutečnost je rovněž možno pozorovat v Tab. 9.8, kdy část tabulky pro model III, v níž se vyskytují velmi nízké hodnoty průtoků je zbarvena červeně, což svědčí o nepřesnosti použití Bordova výrazu.

Tab. 9.6 Hodnoty podílu ξ_{EXP}/ξ_{TEOR} pro modely II a III

| Srovnání | | Model II | | | Model III | | |
|-----------------------|-----|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Průtoky [l/s] a stavy | | $\xi = 0.75$ | $\xi = 1.0$ | Borda | $\xi = 0.75$ | $\xi = 1.0$ | Borda |
| | | ξ_{exp}/ξ_{teor} | ξ_{exp}/ξ_{teor} | ξ_{exp}/ξ_{teor} | ξ_{exp}/ξ_{teor} | ξ_{exp}/ξ_{teor} | ξ_{exp}/ξ_{teor} |
| 15 | I | 0.80 | 0.60 | 0.91 | 0.71 | 0.54 | 1.09 |
| | II | 0.84 | 0.63 | 0.93 | 0.80 | 0.60 | 1.12 |
| | III | 0.88 | 0.66 | 0.95 | 0.85 | 0.64 | 1.13 |
| | IV | 0.93 | 0.70 | 0.96 | 0.89 | 0.67 | 1.13 |
| 12 | I | 0.70 | 0.53 | 0.89 | 0.61 | 0.46 | 1.15 |
| | II | 0.87 | 0.65 | 0.96 | 0.68 | 0.51 | 1.17 |
| | III | 0.88 | 0.66 | 0.96 | 0.78 | 0.59 | 1.17 |
| | IV | 0.94 | 0.71 | 0.98 | 0.85 | 0.64 | 1.17 |
| | V | 1.01 | 0.75 | 0.99 | 0.96 | 0.72 | 1.15 |
| 9 | I | 0.72 | 0.54 | 0.94 | 0.52 | 0.39 | 1.32 |
| | II | 0.80 | 0.60 | 0.96 | 0.64 | 0.48 | 1.27 |
| | III | 0.87 | 0.65 | 0.98 | 0.73 | 0.54 | 1.25 |
| | IV | 0.94 | 0.71 | 0.99 | 0.84 | 0.63 | 1.21 |
| | V | 1.00 | 0.75 | 0.99 | 0.96 | 0.72 | 1.17 |
| 6 | I | 0.70 | 0.53 | 0.97 | 0.46 | 0.35 | 1.60 |
| | II | 0.78 | 0.58 | 0.98 | 0.59 | 0.44 | 1.42 |
| | III | 0.84 | 0.63 | 0.99 | 0.69 | 0.52 | 1.33 |
| | IV | 0.93 | 0.70 | 0.99 | 0.84 | 0.63 | 1.24 |
| | V | 0.99 | 0.75 | 1.00 | 0.97 | 0.73 | 1.18 |
| 3 | I | 0.69 | 0.52 | 0.99 | 0.44 | 0.33 | 1.78 |
| | II | 0.75 | 0.56 | 0.99 | 0.61 | 0.46 | 1.46 |

Následně bylo provedeno srovnání všech tří výtokových profilů. Byla použita barevná škála k vyznačení odchylky mezi součinitelem teoretickým a získaným pomocí experimentu. Jak lze vidět na Obr. 9.1 tmavě zelená barva je použita pro odchylku $\pm 10\%$, světle zelená pro odchylku $\pm 20\%$ a oranžová pro odchylku $\pm 30\%$. Odchylky větší než 30% byly označeny červenou barvou.

Obr. 9.1 Barevná škála k vyznačení odchylek



V Tab. 9.7 a Tab. 9.8 lze pozorovat hned několik zásadních faktů. Hlavním faktem je, že u všech tří modelů, ať už se jednalo o tvar obdélníkový či lichoběžníkový, je nejbližší realitě ztráta vyjádřená pomocí Bordova výrazu, druhou nejlepší shodu vykazuje použití rovnice (4.1) se součinitelem $\xi_{VYT} = 0.75$ a nejbližší skutečnosti je tatáž rovnice avšak se součinitelem $\xi_{VYT} = 1.0$.

Tab. 9.7 Vyznačení vhodnosti součinitelů pomocí barevné škály pro model I

| Srovnání | | Model I | | |
|-----------------------|-----|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | | $\xi = 0.75$ | $\xi = 1.0$ | Borda |
| Průtoky [l/s] a stavy | | $\xi_{\text{exp}}/\xi_{\text{teor}}$ | $\xi_{\text{exp}}/\xi_{\text{teor}}$ | $\xi_{\text{exp}}/\xi_{\text{teor}}$ |
| 45 | I | 0.83 | 0.63 | 0.92 |
| | II | 0.89 | 0.67 | 0.94 |
| | III | 0.98 | 0.73 | 0.97 |
| 35 | I | 0.85 | 0.63 | 0.95 |
| | II | 0.85 | 0.64 | 0.95 |
| | III | 0.97 | 0.73 | 0.98 |
| | IV | 1.03 | 0.77 | 0.99 |
| 25 | I | 0.81 | 0.61 | 0.96 |
| | II | 0.84 | 0.63 | 0.97 |
| | III | 0.94 | 0.70 | 0.99 |
| | IV | 1.06 | 0.79 | 1.00 |
| 15 | I | 0.81 | 0.61 | 0.99 |
| | II | 0.82 | 0.61 | 0.99 |
| | III | 0.97 | 0.73 | 1.00 |
| | IV | 1.06 | 0.80 | 1.00 |
| 7 | I | 0.79 | 0.59 | 1.00 |
| | II | 0.86 | 0.64 | 1.00 |
| | III | 0.94 | 0.71 | 1.00 |
| | IV | 1.06 | 0.79 | 1.00 |

Další zásadní věcí je to, že používání teoretických součinitelů rozhodně více odpovídá realitě u obdélníkového výtokového profilu (modely I a II) než u lichoběžníkového (model III), jak lze vidět v Tab. 9.8, kde se u modelu III vyskytuje více červených polí než u modelů I a II. Tento fakt je způsoben především tím, že hodnoty součinitele na výtoku získané pomocí experimentu se pro lichoběžníkový tvar výtokového profilu pohybovaly v rozmezí od 0.17 do 0.73, to znamená že byly mnohem menší než hodnoty teoretické. Čím je tedy změna profilu na výtoku více náhlá, tím je součinitel ztráty na výtoku větší, čím je naopak přechod plynulejší, tím je ztrátový součinitel menší. Z toho plyne, že nepřesnost teoretických výrazů vzniká především při menším rozšíření proudu. Tímto byly potvrzeny předpoklady, které byly stanoveny v práci [11].

Vysoké hodnoty ztrátových součinitelů se tedy dle předchozího odstavce vyskytují u náhlého rozšíření proudu. Pro případ provedeného experimentu je to tedy u stavů s větším zatopením, jež jsou označeny vyššími ciframi římských číslic. Jelikož hodnoty teoretických součinitelů jsou rovněž poměrně vysoké, je možno si všimnout, že u všech zkoumaných průtoků jsou hodnoty teoretických součinitelů bližší reálným hodnotám při vyšších stavech zatopení.

Tab. 9.8 Vyznačení vhodnosti součinitelů pomocí barevné škály pro modely II a III

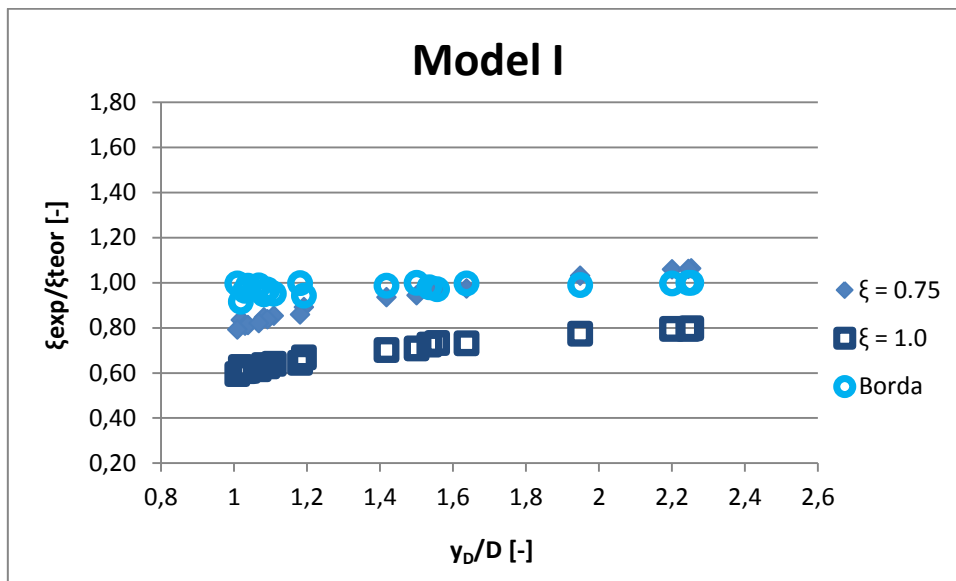
| Srovnání | | Model II | | | Model III | | |
|-----------------------|-----|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Průtoky [l/s] a stavy | | $\xi = 0.75$ | $\xi = 1.0$ | Borda | $\xi = 0.75$ | $\xi = 1.0$ | Borda |
| | | ξ_{exp}/ξ_{teor} | ξ_{exp}/ξ_{teor} | ξ_{exp}/ξ_{teor} | ξ_{exp}/ξ_{teor} | ξ_{exp}/ξ_{teor} | ξ_{exp}/ξ_{teor} |
| 15 | I | 0.80 | 0.60 | 0.91 | 0.71 | 0.54 | 1.09 |
| | II | 0.84 | 0.63 | 0.93 | 0.80 | 0.60 | 1.12 |
| | III | 0.88 | 0.66 | 0.95 | 0.85 | 0.64 | 1.13 |
| | IV | 0.93 | 0.70 | 0.96 | 0.89 | 0.67 | 1.13 |
| 12 | I | 0.70 | 0.53 | 0.89 | 0.61 | 0.46 | 1.15 |
| | II | 0.87 | 0.65 | 0.96 | 0.68 | 0.51 | 1.17 |
| | III | 0.88 | 0.66 | 0.96 | 0.78 | 0.59 | 1.17 |
| | IV | 0.94 | 0.71 | 0.98 | 0.85 | 0.64 | 1.17 |
| | V | 1.01 | 0.75 | 0.99 | 0.96 | 0.72 | 1.15 |
| 9 | I | 0.72 | 0.54 | 0.94 | 0.52 | 0.39 | 1.32 |
| | II | 0.80 | 0.60 | 0.96 | 0.64 | 0.48 | 1.27 |
| | III | 0.87 | 0.65 | 0.98 | 0.73 | 0.54 | 1.25 |
| | IV | 0.94 | 0.71 | 0.99 | 0.84 | 0.63 | 1.21 |
| | V | 1.00 | 0.75 | 0.99 | 0.96 | 0.72 | 1.17 |
| 6 | I | 0.70 | 0.53 | 0.97 | 0.46 | 0.35 | 1.60 |
| | II | 0.78 | 0.58 | 0.98 | 0.59 | 0.44 | 1.42 |
| | III | 0.84 | 0.63 | 0.99 | 0.69 | 0.52 | 1.33 |
| | IV | 0.93 | 0.70 | 0.99 | 0.84 | 0.63 | 1.24 |
| | V | 0.99 | 0.75 | 1.00 | 0.97 | 0.73 | 1.18 |
| 3 | I | 0.69 | 0.52 | 0.99 | 0.44 | 0.33 | 1.78 |
| | II | 0.75 | 0.56 | 0.99 | 0.61 | 0.46 | 1.46 |

Pro přehlednost byla data z tabulek vynesena do grafů. Na vodorovné ose je vynesena poměr hloubky dolní vody k světlému průměru propustku a na svislé ose je vynesena onen zmíněný podíl experimentálně získaného součinitele k součiniteli teoretickému. Tyto grafy jasně ukazují, že nejpřesněji je ztráta na výtoku stanovena pomocí Bordovy rovnice (4.3).

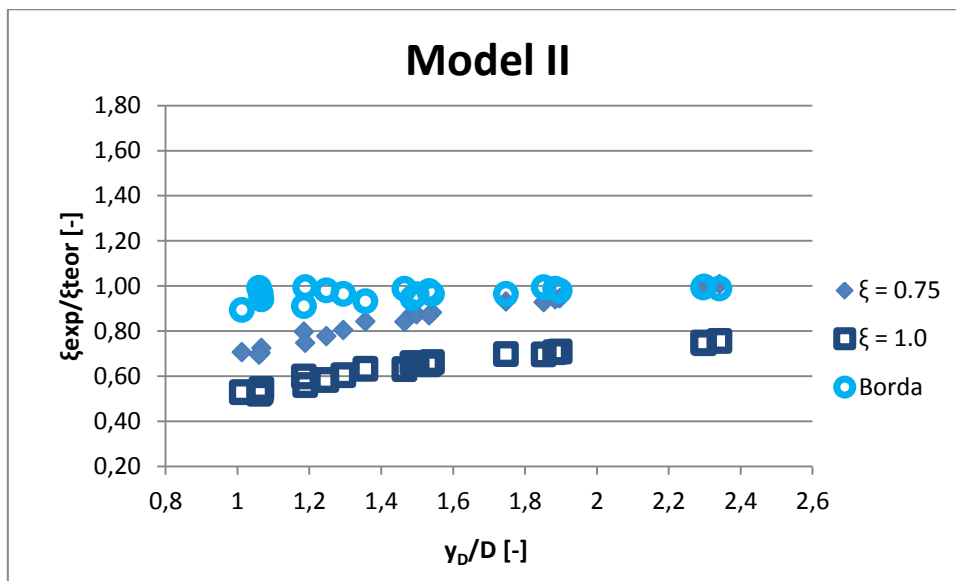
Nejprve budou okomentována data náležící modelům I a II, které měly obdélníkový tvar výtokového profilu, poté budou okomentována data náležící modelu III, jehož výtokový profil měl lichoběžníkový tvar.

Lze pozorovat, že na grafech náležících modelu I a II se vynesená data pro Bordovu ztrátu pohybují v okolí hodnoty 1.0, což znamená, že teoretický i experimentálně zjištěný součinitel jsou prakticky shodné. Jak lze vidět na grafu na Obr. 9.2 a Obr. 9.3, nejvíce si odpovídají součinitel získaní Bordovou rovnicí, a to v celém rozsahu zatopení dolní vodou. Nejméně vhodné je naopak použití rovnice se součinitelem rovným 1.0, který ztrátu značně nadhodnocuje. Rovněž lze pozorovat rostoucí trend u součinitelů vypočtených v režimu rozšíření o volné hladině, což se dá interpretovat jako fakt, že čím více je výtok z propustku zatopený dolní vodou, tím více je použití součinitelů $\xi_{V\dot{Y}T} = 0.75$ a $\xi_{V\dot{Y}T} = 1.0$ přesnější.

Obr. 9.2 Závislost poměru ξ_{EXP}/ξ_{TEOR} na míře zatopení pro model I

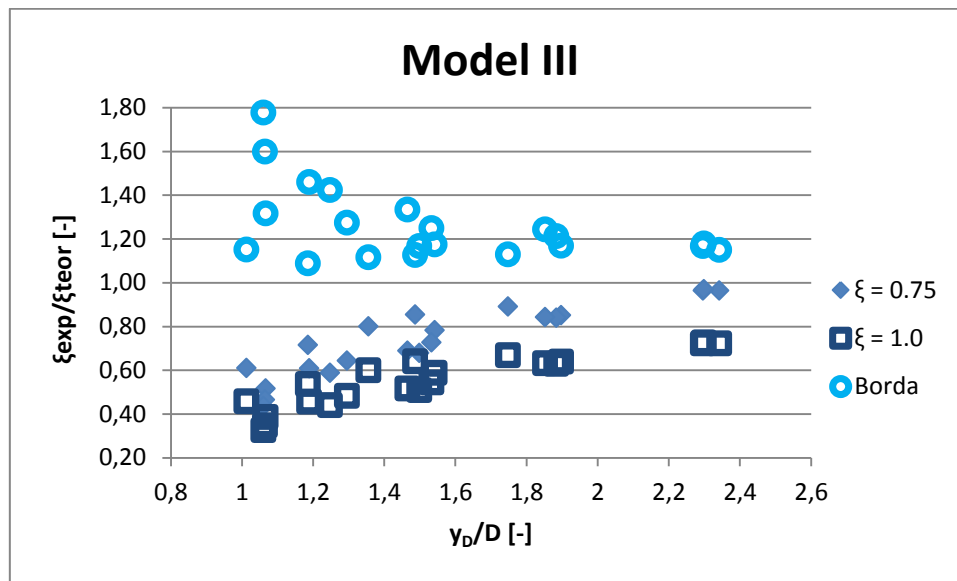


Obr. 9.3 Závislost poměru ξ_{EXP}/ξ_{TEOR} na míře zatopení pro model II



Na grafu na Obr. 9.4 zobrazujícím data modelu III jsou hodnoty poněkud více roztroušené, avšak nejvíce se správnému řešení opět blíží výraz Borda-Carnot. Ve všech třech případech je patrné, že čím větší je zatopení dolní vodou, tím více jsou hodnoty součinitelů stabilnější a pohybují se po téměř vodorovné přímce. Naopak při malých poměrech zatopení hodnoty ve vertikálním směru poněkud kolísají. Tento fakt však může být způsoben i nepřesností měření při nízkých stavech zatopení, kdy se hladina po délce téměř neměnila a rozdíly v hloubkách mezi prvním a posledním profilem tak byly zanedbatelné.

Obr. 9.4 Závislost poměru ξ_{EXP}/ξ_{TEOR} na míře zatopení pro model III



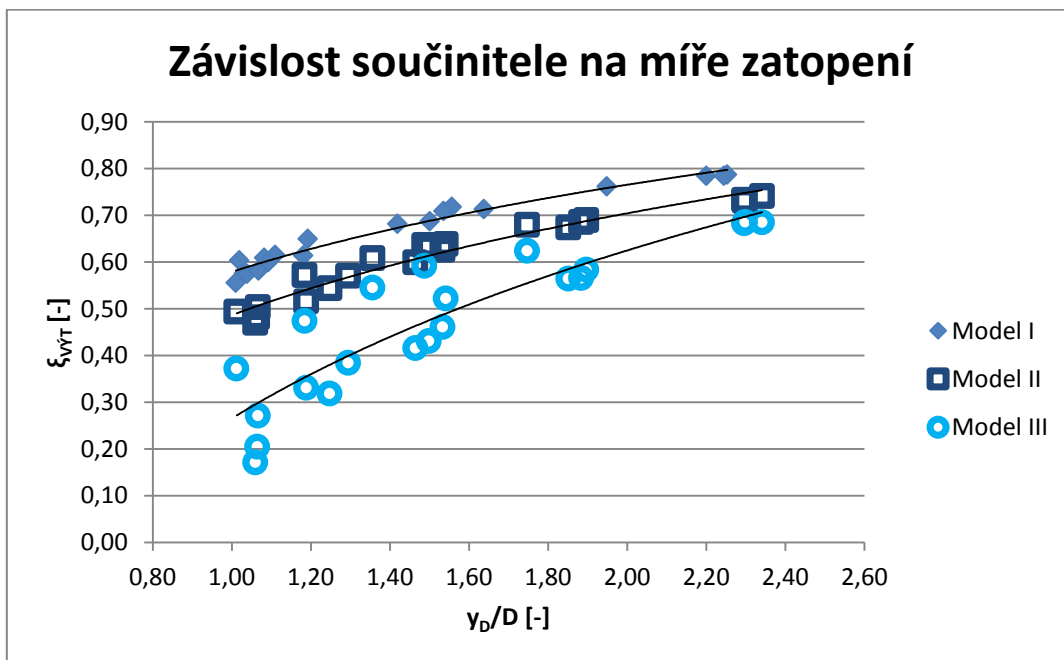
Bylo tedy zjištěno, které dosud používané teoretické výrazy jsou vhodné a které méně vhodné. To by však nemělo být cílem této práce, jejíž snahou je především určit konkrétní hodnotu součinitele, která bude dále používána v praxi. Projektant pak hodnotu součinitele ztráty na výtoku může použít jednak pro ruční výpočet a především ji také může zadat do výpočetních programů, které tuto hodnotu vyžadují jako jeden ze vstupních parametrů. Proto byly napsány podkapitoly 9.2.1 a 9.2.2, které obsahují grafy, na nichž lze odečíst hodnotu součinitele ztráty na výtoku v závislosti buď na míře zatopení, nebo na poměru průtočných ploch propustku a výtokového profilu za výtokem z propustku.

9.2.1 ZÁVISLOST SOUČINITELE NA MÍŘE ZATOPENÍ

Do grafu na Obr. 9.5 byly vyneseny hodnoty součinitele ztráty na výtoku v závislosti na míře zatopení. Míra zatopení je zde definována jako poměr hloubky dolní vody v profilu D k průměru propustku. Data byla vynesena pro každý ze tří modelů zvlášť a je zde patrné, že součinitel není závislý pouze na míře zatopení, ale také na geometrickém uspořádání výtokového profilu. Proto nebylo možné proložit křivku všemi daty společně, ale muselo tak být učiněno pro každý model samostatně.

Z tohoto grafu lze tedy učinit závěr, že součinitel ztráty na výtoku je závislý na míře zatopení, a to tak, že čím větší je úroveň dolní vody za výtokem z propustku, tím je také vyšší hodnota součinitele. Daty byla proložena logaritmická křivka, která tomuto rozdělení hodnot nejvíce odpovídala. Je však také zřejmé, že při určování součinitele svou roli hraje nejen míra zatopení, ale rovněž geometrie výtokového profilu.

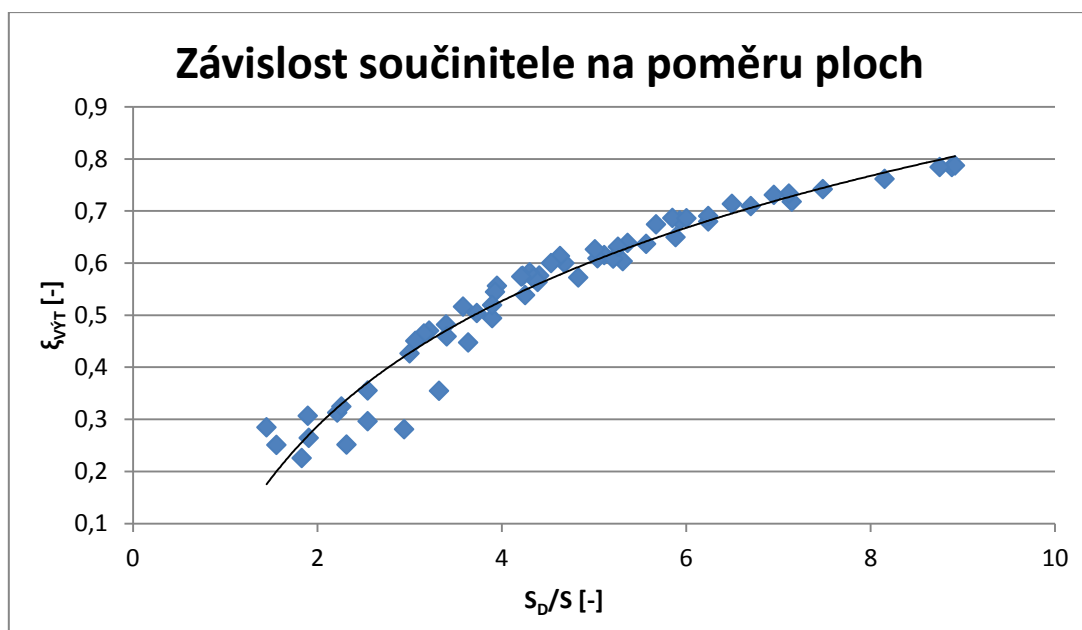
Obr. 9.5 Závislost součinitele ztráty na výtoku na míře zatopení



9.2.2 ZÁVISLOST SOUČINITELE NA POMĚRU PRŮTOČNÝCH PLOCH

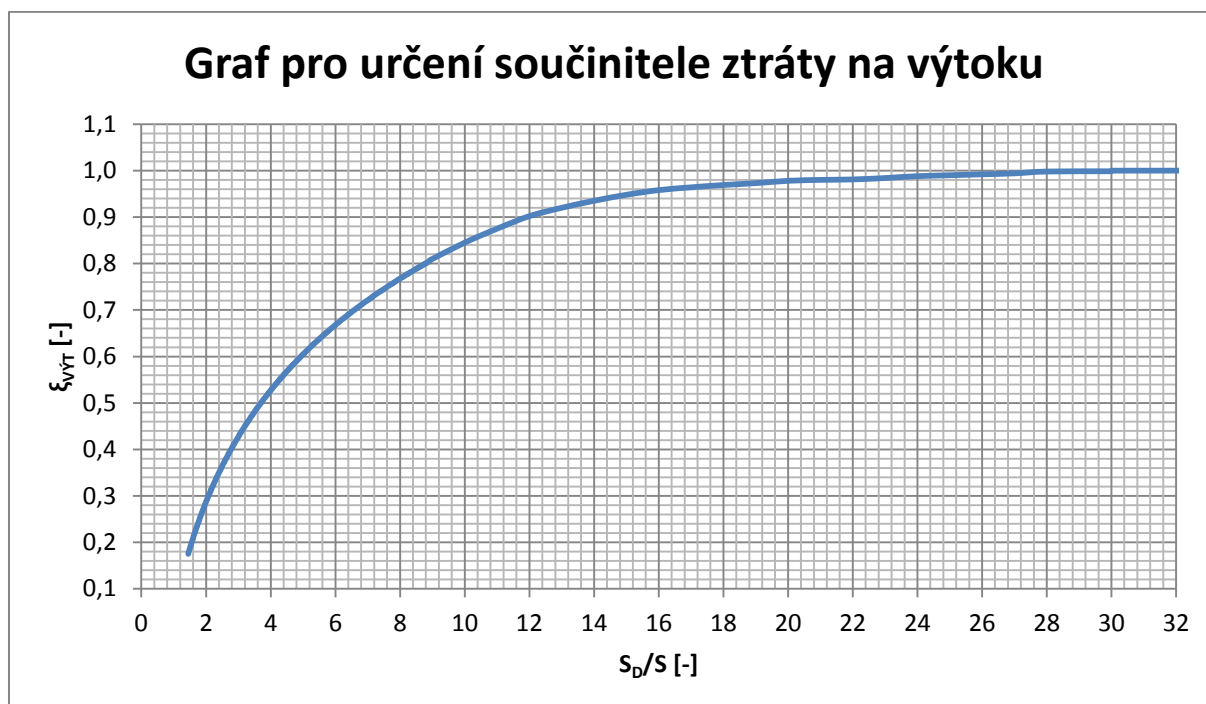
Do grafu na Obr. 9.6 byly vyneseny hodnoty součinitele ztráty na výtoku v závislosti na poměru průtočných ploch. Tento poměr byl spočten jako obsah průtočné plochy v profilu D za výtokem z propustku k obsahu průtočné plochy v profilu propustku. Lze si povšimnout, že v tomto případě byla do grafu vynesena všechna data současně. Je tedy patrné, že poměr zatopených ploch lépe postihuje geometrické uspořádání výtokového profilu a proto mohla být všechna data vynesena do grafu společně. Tato data byla opět proložena logaritmickou křivkou, která vneseným hodnotám odpovídá s koeficientem spolehlivosti 0,95, což je poměrně uspokojivý výsledek.

Obr. 9.6 Závislost součinitele ztráty na výtoku na poměru průtočných ploch



Tento graf byl ještě dále modifikován z důvodu snadného použití v praxi. Byly skryty vnesené hodnoty a v grafu byla ponechána pouze logaritmická křivka, pomocí níž bude možno snadno odečítat hodnoty součinitele ztráty na výtoku za známého poměru průtočných ploch. Tato křivka byla rovněž extrapolována. Byl zaveden předpoklad, že při hodnotě poměru průtočných ploch rovné 30, kdy průtočná plocha za výtokem z propustku bude mnohonásobně větší než plocha profilu propustku, už se bude jednat o výtok do velké nádrže a hodnota součinitele zde bude rovná 1,0. Pro hodnoty poměru průtočných ploch, které budou větší než 30, již bude tato křivka konstantní a rovna 1,0, jak lze vidět na Obr. 9.7.

Obr. 9.7 Extrapolovaný graf pro odečet součinitele ztráty na výtoku v závislosti na poměru průtočných ploch



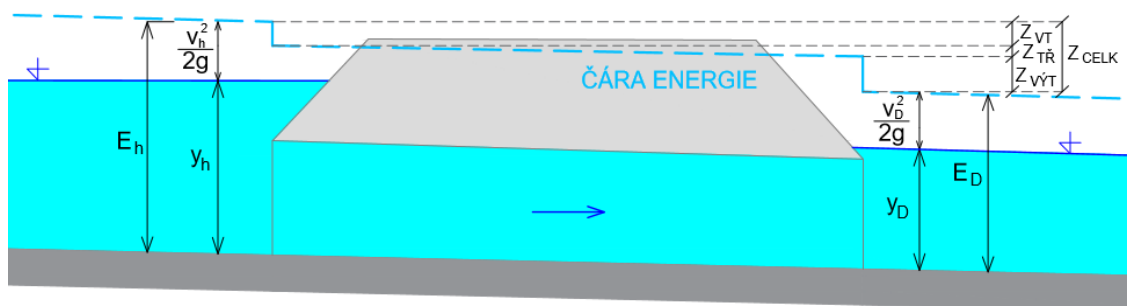
Z grafu je také zřejmé, že čím je poměr průtočných ploch menší, tím menší je také hodnota součinitele. Čím je naopak poměr větší, tím roste i velikost součinitele ztráty na výtoku. Ve vědeckém článku B. P. Tullise a S. C. Robinsona [28] je uveden fakt, že nadhodnocení ztráty na výtoku je tedy tím větší, čím je poměr průtočných ploch S_D/S menší, což přesně odpovídá výsledkům, jež byly získány provedeným výzkumem.

Závěrem je tedy navrženo nepoužívat stávající hodnoty součinitele ztráty na výtoku, nýbrž si příslušný součinitel odečíst z přiloženého grafu. Poměr průtočných ploch se spočte jako podíl obsahu plochy v profilu D s hloubkou y_D a obsahu příčného průřezu propustku. Dle tohoto poměru je pak snadné z grafu na Obr. 9.7 odečíst hodnotu ztrátového součinitele ξ_{VYT} a tu použít do rovnice (4.8), jež vyjadřuje součin tohoto součinitele s rychlostní výškou. Zde je nutno zdůraznit, že rychlostní výška je vztažena ke střední průřezové rychlosti v propustku, nikoli k rychlosti za výtokem z propustku.

9.3 PODÍL DÍLČÍCH ZTRÁT NA CELKOVÉ ZTRÁTĚ

Celková ztráta energie v propustku se skládá ze ztráty na vtoku, ztráty třením po celé délce konstrukce propustku a ze ztráty na výtoku, jak je popsáno v rovnici (3.22). Hydraulická ztráta je v praxi určena jako rozdíl úrovní čáry energie před vtokem do propustku v profilu A a za výtokem z propustku v profilu D, jak ukazuje Obr. 9.8.

Obr. 9.8 Znárodnění celkové ztráty jako rozdílu úrovní čáry energie



Podíl jednotlivých dílčích typů ztrát na celkové ztrátě objasní tato kapitola. Je důležité znát, jakou měrou se daná dílčí ztráta podílí na celkové ztrátě, z důvodu zaměření se na podstatné výpočty při návrhu propustku. Tato podkapitola se zabývá podílem ztráty na výtoku, podílem ztráty na vtoku a také podílem ztráty třením na celkové ztrátě v propustku.

9.3.1 PODÍL ZTRÁTY NA VTOKU NA CELKOVÉ ZTRÁTĚ

Jelikož se tato práce ztrátou na vtoku nezabývá a úvodní kapitoly neposkytují žádný teoretický základ k této problematice, není zde ztráta na vtoku počítána pomocí vzorců. Hodnota ztráty na vtoku byla získána odečtením ztráty na výtoku a ztráty třením od celkové ztráty. Takto získaná hodnota poté byla vydělena celkovou ztrátou a výsledkem je tedy procentuální zastoupení ztráty na vtoku na celkové ztrátě, které lze vidět v Tab.9.9. V průměru se ztráta na vtoku podílí na celkové ztrátě z 33 %, což znamená, že ztráta na vtoku je druhou nejvýznamnější složkou, jež se na celkové ztrátě podílí.

Tab.9.9 Procentuální podíl ztráty na vtoku na celkové ztrátě

| Podíl ztráty na vtoku | | Model I | Podíl ztráty na vtoku | | Model II | Model III |
|-----------------------|------|------------------------------|-----------------------|------|------------------------------|------------------------------|
| Průtoky [l/s] a stavy | | Podíl Z_{VT} na Z_{CELK} | Průtoky [l/s] a stavy | | Podíl Z_{VT} na Z_{CELK} | Podíl Z_{VT} na Z_{CELK} |
| 45 | I | 39 % | 15 | I | 38 % | 31 % |
| | II | 36 % | | II | 37 % | 28 % |
| | III | 33 % | | III | 34 % | 27 % |
| 35 | I | 36 % | | IV | 32 % | 27 % |
| | II | 36 % | 12 | I | 41 % | 37 % |
| | III | 33 % | | II | 29 % | 35 % |
| IV | 31 % | III | | 33 % | 31 % | |
| 25 | I | 38 % | | IV | 34 % | 28 % |
| | II | 37 % | | V | 30 % | 26 % |
| | III | 32 % | 9 | I | 40 % | 45 % |
| IV | 32 % | II | | 37 % | 38 % | |
| 15 | I | 33 % | | III | 33 % | 32 % |
| | II | 33 % | | IV | 33 % | 28 % |
| | III | 31 % | | V | 32 % | 23 % |
| | IV | 23 % | 6 | I | 37 % | 48 % |
| 7 | I | 24 % | | II | 35 % | 40 % |
| | II | 24 % | | III | 35 % | 33 % |
| | III | 45 % | | IV | 32 % | 27 % |
| | IV | 28 % | | V | 29 % | 24 % |
| | | | 3 | I | 29 % | 46 % |
| | | | | II | 32 % | 33 % |

9.3.2 PODÍL ZTRÁTY TŘENÍM NA CELKOVÉ ZTRÁTĚ

Ztráta třením v propustku byla vypočtena dle Darcy – Weisbachovy rovnice (3.28) uvedené v podkapitole 3.3.2 pro tlakový režim proudění. Drsnost stěn byla uvažována hodnotou $\Delta = 0.01 \text{ mm}$ a kinematická viskozita hodnotou $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Dle těchto parametrů byly z Moodyho diagramu (viz Obr. 3.17) odečteny hodnoty součinitele tření λ a poté už byla spočtena hodnota ztráty třením v mm. Opět byl vypočten podíl ztráty třením a celkové ztráty, jenž vyjadřuje procentuální zastoupení ztráty třením na celkové ztrátě. Konkrétní hodnoty lze sledovat v Tab. 9.10.

V podkapitole 3.3.2 bylo pojednáno o tom, že ztrátu třením u propustků nelze zanedbat jak by to bylo možné u mostních objektů. Toto tvrzení potvrzuje i Tab. 9.10, v níž je možné sledovat, že ztráta třením má sice na celkové ztrátě nejmenší podíl (v průměru asi 18 %), není to však dostatečně nízká hodnota na to, aby ji bylo možné zanedbat úplně.

Tab. 9.10 Procentuální podíl ztráty třením na celkové ztrátě

| Podíl ztráty třením | Model I | | Podíl ztráty třením | Model II | Model III | |
|-----------------------|------------------------------|------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|------|
| Průtoky [l/s] a stavy | Podíl Z_{TR} na Z_{CELK} | | Průtoky [l/s] a stavy | Podíl Z_{TR} na Z_{CELK} | Podíl Z_{TR} na Z_{CELK} | |
| 45 | I | 13 % | 15 | I | 17 % | 21 % |
| | II | 13 % | | II | 16 % | 20 % |
| | III | 12 % | | III | 16 % | 19 % |
| | | IV | | 16 % | 18 % | |
| 35 | I | 14 % | 12 | I | 18 % | 23 % |
| | II | 14 % | | II | 18 % | 21 % |
| | III | 13 % | | III | 17 % | 20 % |
| | IV | 13 % | | IV | 16 % | 19 % |
| | | V | | 15 % | 17 % | |
| 25 | I | 14 % | 9 | I | 19 % | 25 % |
| | II | 14 % | | II | 18 % | 24 % |
| | III | 14 % | | III | 18 % | 23 % |
| | IV | 12 % | | IV | 17 % | 21 % |
| | | V | | 16 % | 20 % | |
| 15 | I | 17 % | 6 | I | 22 % | 29 % |
| | II | 17 % | | II | 21 % | 27 % |
| | III | 15 % | | III | 20 % | 26 % |
| | IV | 16 % | | IV | 19 % | 23 % |
| | | V | | 18 % | 21 % | |
| 7 | I | 24 % | 3 | I | 27 % | 34 % |
| | II | 23 % | | II | 24 % | 31 % |
| | III | 15 % | | | | |
| | IV | 17 % | | | | |

9.3.3 PODÍL ZTRÁTY NA VÝTOKU NA CELKOVÉ ZTRÁTĚ

Dle Tullise a Robinsona [29] se u krátkých propustků místní ztráta na výtoku podílí na celkové ztrátě největší měrou. Přesné hodnoty procentuálního zastoupení ztráty na výtoku pro jednotlivé stavy je možno sledovat v Tab. 9.11. Průměrná hodnota podílu ztráty na výtoku je přibližně 50 % na celkové ztrátě, což svědčí o její důležitosti. Ztráta na výtoku se tedy na celkové ztrátě podílí nejvýznamněji.

Dle literatury [21] podíl ztráty rozšířením proudu na ztrátách celkových se při konstantním průměru propustku zvyšuje s narůstající hloubkou dolní vody. Tento fakt byl potvrzen i v provedeném experimentu a jeho pravdivost lze doložit v Tab. 9.11, v níž lze vidět nejvyšší procentuální hodnoty ztráty na výtoku právě u nejvyšších stavů zatopení.

Tab. 9.11 Procentuální podíl ztráty na výtoku na celkové ztrátě

| Podíl ztráty na výtoku | | Model I | Podíl ztráty na výtoku | | Model II | Model III |
|------------------------|-----|-------------------------------|------------------------|-----|-------------------------------|-------------------------------|
| Průtoky [l/s] a stavy | | Podíl $Z_{VÝT}$ na Z_{CELK} | Průtoky [l/s] a stavy | | Podíl $Z_{VÝT}$ na Z_{CELK} | Podíl $Z_{VÝT}$ na Z_{CELK} |
| 45 | I | 48 % | 15 | I | 45 % | 48 % |
| | II | 52 % | | II | 47 % | 52 % |
| | III | 55 % | | III | 49 % | 54 % |
| 35 | I | 50 % | 12 | IV | 52 % | 55 % |
| | II | 50 % | | I | 42 % | 40 % |
| | III | 54 % | | II | 53 % | 43 % |
| | IV | 56 % | | III | 51 % | 49 % |
| 25 | I | 48 % | 9 | IV | 51 % | 53 % |
| | II | 49 % | | V | 54 % | 57 % |
| | III | 55 % | | I | 41 % | 29 % |
| | IV | 55 % | | II | 45 % | 39 % |
| 15 | I | 50 % | 6 | III | 49 % | 45 % |
| | II | 50 % | | IV | 50 % | 51 % |
| | III | 54 % | | V | 52 % | 57 % |
| | IV | 61 % | | I | 41 % | 23 % |
| 7 | I | 52 % | 3 | II | 44 % | 33 % |
| | II | 54 % | | III | 46 % | 42 % |
| | III | 40 % | | IV | 50 % | 50 % |
| | IV | 54 % | | V | 52 % | 55 % |
| | | | 3 | I | 44 % | 20 % |
| | | | | II | 44 % | 36 % |

10 VÝPOČET ZTRÁT V TLAKOVÝCH PROPUSTCÍCH DLE RŮZNÝCH AUTORŮ

Následující kapitola je rozdělena do dvou podkapitol. První z nich se věnuje výpočtům tlakových propustků známým z literatury, druhá z nich se zabývá výpočty ztráty na výtoku z propustku, jež jsou uvedeny v manuálech k nejrůznějším výpočetním programům. Podkapitola 10.1 tedy popisuje pět různých metod výpočtu ztrát v tlakovém propustku, z nichž čtyři jsou uvedeny v literatuře, a poslední metoda popisuje výpočet tlakového propustku podle návrhu autorky této práce P. Jurečkové. Tato metoda používá Bernoulliho rovnici a především nový graf sestavený na základě provedeného výzkumu. V závěru podkapitoly 10.1 je také uvedena tabulka s odchylkami od skutečně naměřených hodnot pro každý z pěti popsanych způsobů. Druhá podkapitola 10.2 obsahuje čtyři metody výpočtu ztráty na výtoku v propustku, které jsou uvedeny v manuálech k softwarům.

10.1 VÝPOČET ZTRÁT V TLAKOVÝCH PROPUSTCÍCH DLE LITERATURY

Byla vyhledána literatura věnující se problematice tlakových propustků a byla provedena analýza rovnic potřebných k výpočtu celkové ztráty v propustku. Byly tedy vypočteny hodnoty celkové ztráty, a to dle nejrůznějších metod, jež jsou popsány v následujícím textu. Celková ztráta byla poté přičtena k hloubce dolní vody, čímž byla získána úroveň hladiny horní vody, jak ukazuje rovnice (10.1). Ta byla následně porovnána se skutečně naměřenou hodnotou úrovně hladiny horní vody.

$$y_h = y_D + Z_{CELK} \quad (10.1)$$

Rozdíl mezi vypočtenou a naměřenou hodnotou úrovně hladiny horní vody je dále vyjádřen vždy jako absolutní hodnota v milimetrech, ale i jako procento z reálně naměřené hodnoty.

U zdrojů, jež jsou napsány v anglickém jazyce, byly příslušné veličiny přejmenovány dle doposud používaných označení. Například pro veličinu značenou symbolem *HW* (headwater) bylo použito dosud používaného symbolu y_h (úroveň hladiny horní vody).

* Všechny dále uvedené hodnoty se vztahují k měření, které bylo provedeno na modelu III při průtoku 15 l/s.

Výpočet dle R. J Houghtalena [10]

V této knize bylo pro hydraulický výpočet propustku použito rovnice (10.2).

$$y_h = y_D + \xi_{VT} \frac{v^2}{2g} + \frac{n^2 v^2 L}{R^{4/3}} + \xi_{V\dot{Y}T} \frac{v^2}{2g} \quad (10.2)$$

| | | |
|-------------------|----------------------|---|
| y_h | [m] | úroveň hladiny horní vody v profilu A |
| y_D | [m] | úroveň hladiny dolní vody v profilu D |
| ξ_{VT} | [-] | součinitel místní ztráty na vtoku (zdroj doporučuje hodnotu 0.5) |
| v | [m·s ⁻¹] | rychlost proudění v propustku |
| n | [-] | Manningův drsnostní součinitel (zdroj doporučuje hodnotu 0.01) |
| L | [m] | délka propustku |
| R | [m] | hydraulický poloměr |
| $\xi_{V\dot{Y}T}$ | [-] | součinitel místní ztráty na výtoku (zdroj doporučuje hodnotu 1.0) |

Spočtená hodnota úrovně hladiny před propustkem činila 488 mm, kdežto naměřená hodnota byla 406 mm. Rozdíl mezi vypočtenou a naměřenou hodnotou je 82 mm, což představuje 20 % ze skutečně naměřené hodnoty.

Výpočet dle J. D. Shalla z FHWA [24]

Dle americké společnosti Federal Highway Administration je pro výpočet propustků vhodné použít rovnici (10.3)

$$y_h = y_D + \left(\xi_{V\dot{Y}T} + \xi_{VT} + \frac{K_U n^2 L}{R^{1.33}} \right) \frac{v^2}{2g} \quad (10.3)$$

| | | |
|-------------------|----------------------|---|
| $\xi_{V\dot{Y}T}$ | [-] | součinitel místní ztráty na výtoku (zdroj doporučuje hodnotu 1.0) |
| ξ_{VT} | [-] | součinitel místní ztráty na vtoku (zdroj doporučuje hodnotu 0.5) |
| K_U | [-] | rozměrový součinitel (zdroj doporučuje hodnotu 19.63) |
| n | [-] | Manningův drsnostní součinitel (zdroj doporučuje hodnotu 0.01) |
| v | [m·s ⁻¹] | rychlost proudění v propustku |

Spočtená hodnota úrovně hladiny před propustkem činila 487 mm, kdežto naměřená hodnota byla 406 mm. Rozdíl mezi vypočtenou a naměřenou hodnotou je 81 mm, což představuje 20 % ze skutečně naměřené hodnoty.

Výpočet dle přednášky A. Havlíka [8]

V materiálech k přednáškám A. Havlíka je pro výpočet hloubky horní vody před vtokem do propustku uvedena rovnice (10.4)

$$y_h = y_D + \frac{v_D^2}{2g} + Z_Z + \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + Z_{V\dot{Y}T} - \frac{v_h^2}{2g} - i_0 L \quad (10.4)$$

| | | |
|-----------------|----------------------|---|
| v_D | [m·s ⁻¹] | střední průřezová rychlost v profilu D za výtokem z propustku |
| Z_Z | [m] | ztrátová výška zúžením proudu - rovnice (3.23) se součinitelem 0.45 |
| λ | [-] | součinitel ztráty třením |
| L | [m] | délka propustku |
| D | [m] | průměr trouby propustku |
| v | [m·s ⁻¹] | rychlost proudění v propustku |
| $Z_{V\dot{Y}T}$ | [m] | ztrátová výška na výtoku z propustku - rovnice (3.16) dle Bordy |
| v_h | [m·s ⁻¹] | střední průřezová rychlost v profilu A před vtokem |
| i_0 | [-] | podélný sklon uložení propustku (0.5 %) |

Spočtená hodnota úrovně hladiny před propustkem činila 409 mm, kdežto naměřená hodnota byla 406 mm. Rozdíl mezi vypočtenou a naměřenou hodnotou je 3 mm, což představuje méně než 1 % ze skutečně naměřené hodnoty.

Ve všech třech popsanych výpočtech došlo k nadhodnocení ztráty, což znamená, že vypočtená úroveň hladiny je vyšší než ve skutečnosti. V praxi tak dojde k předimenzování objektu, avšak návrh zůstává na straně bezpečnosti.

Výpočet dle technických podmínek 232 [6]

V technických podmínkách je pro výpočet úrovně hladiny horní vody v propustku použito rovnice (10.5)

$$y_h = (i_e - i_0)L + (\xi_{V\dot{Y}T} + \xi_{VT}) \frac{v^2}{2g} + D + \Delta_{real} - \Delta_{min} \quad (10.5)$$

| | | |
|-------------------|----------------------|---|
| i_e | [-] | sklon čáry energie vypočtený dle rovnice (3.26) |
| i_0 | [-] | podélný sklon uložení propustku (0.5 %) |
| L | [m] | délka propustku |
| $\xi_{V\dot{Y}T}$ | [-] | součinitel místní ztráty na výtoku (zdroj doporučuje hodnotu 1.0) |
| ξ_{VT} | [-] | součinitel místní ztráty na vtokem (zdroj doporučuje hodnotu 0.4) |
| v | [m·s ⁻¹] | rychlost proudění v propustku |
| D | [m] | průměr trouby propustku |
| Δ_{real} | [m] | skutečné převýšení dolní vody nad stropem propustku - rovnice (3.21) |
| Δ_{min} | [m] | minimální převýšení dolní vody nad stropem propustku - rovnice (3.19) |

Spočtená hodnota úrovně hladiny před propustkem činila 360 mm, kdežto naměřená hodnota se pohybovala okolo 406 mm. Rozdíl mezi vypočtenou a naměřenou hodnotou je 46 mm, což představuje 11 % ze skutečně naměřené hodnoty.

Lze si povšimnout, že v tomto případě došlo při výpočtu k podhodnocení ztráty a skutečná hladina je ve skutečnosti výše než vypočtená, což může zapříčinit přelití komunikace a následně způsobit škody na majetku či zdraví.

Výpočet dle návrhu P. Jurečkové

V neposlední řadě byl výpočet ztrát proveden s použitím nových poznatků získaných z výše popsaného výzkumu. Pro výpočet byla použita Bernoulliho rovnice ve tvaru (10.4), avšak pro výpočet ztráty na výtoku nebylo použito výrazu Bordy, ale rovnice (10.6). Součinitel ztráty na výtoku $\xi_{v\dot{y}T}$ byl odečten z nově vytvořeného grafu na Obr. 9.7.

$$Z_{v\dot{y}T} = \xi_{v\dot{y}T} \frac{v^2}{2g} \quad (10.6)$$

Spočtená hodnota úrovně hladiny před propustkem činila 405 mm, kdežto naměřená hodnota byla 406 mm. Rozdíl mezi vypočtenou a naměřenou hodnotou je pouhý 1 mm, což představuje méně než 0.5 % ze skutečně naměřené hodnoty. Použití nového grafu a Bernoulliho rovnice se tak ukázalo jako nejvhodnější řešení pro výpočet ztrát v tlakovém propustku.

V závěru této podkapitoly je umístěna přehledná tabulka (Tab. 10.1) zobrazující metody výpočtu dle různých autorů společně s absolutními i procentuálními odchylkami od skutečně naměřených hodnot.

Tab. 10.1 Srovnání metod výpočtů ztrát dle různých autorů

| Metoda výpočtu | Odchylka [mm] | Odchylka [%] |
|---|---------------|--------------|
| Výpočet dle R. J Houghtalena | 82 | 20 |
| Výpočet dle J. D. Shalla z FHWA | 81 | 20 |
| Výpočet dle přednášky A. Havlíka | 3 | < 1 |
| Výpočet dle technických podmínek 232 | 46 | 11 |
| Výpočet dle Bernoulliho rovnice s použitím nového grafu | 1 | < 0.5 |

10.2 VÝPOČET ZTRÁTY NA VÝTOKU DLE MANUÁLŮ K SOFTWAREM

Jak již bylo popsáno, reálné ztrátě na výtoku nejvíce odpovídá rovnice (4.3), která představuje výpočet metodou Borda-Carnot. V praxi je však pro výpočty propustků využíváno nejrůznějších výpočetních software (např. HY-8, HEC-RAS, SWMM, TUFLOW, atd.), které k výpočtu používají nejčastěji rovnici (4.1) obsahující součinitel místní ztráty na výtoku. Jednotlivé programy doporučují pro výpočet ztráty na výtoku tyto postupy:

HY-8 [27] – software věnující se pouze výpočtům propustků, umožňuje uživateli vybrat si, zda bude chtít počítat ztrátu na výtoku pomocí běžné rovnice, nebo podle metody Borda-Carnot. V manuálu je rovněž uvedeno, že druhý způsob výpočtu udává přesnější výsledky.

V softwaru HY-8 je standardně zvolena metoda Exit Loss: Standard Method. Ta zahrnuje výpočet ztráty na výtoku jako součin ztrátového součinitele a rozdílu kvadrátů rychlostních výšek v propustku a v korytě za propustkem. Tento postup je shodný s dříve popsanou rovnicí (4.1) v podkapitole 4.1 a manuál softwaru doporučuje použití součinitele hodnotou 1.0.

$$Z_{v\dot{y}T} = \xi_{v\dot{y}T} \cdot \left(\frac{v^2 - v_D^2}{2g} \right) \quad \xi_{v\dot{y}T} = 1.0 \quad (10.7)$$

Je zde však i možnost přepnutí na metodu Exit Loss: USU Method. Tento způsob výpočtu místní ztráty zahrnuje výpočet dle metody Borda-Carnot. Používaná rovnice (4.3) je již dříve popsána v podkapitole 4.2. Manuál softwaru upozorňuje na to, použití této druhé metody je přesnější, což bylo potvrzeno i provedeným výzkumem.

$$Z_{Borda} = \frac{(v - v_D)^2}{2g} \quad (10.8)$$

HEC-RAS [1] – v manuálu k softwaru HEC-RAS je k výpočtu ztráty na výtoku popsána metoda výpočtu pro režim o volné hladině. V tomto dokumentu je dáno doporučení používat rovnici (4.1) se součinitelem 1.0, avšak je zde také poznamenáno, že součinitel může pro jiné stavy proudění nabývat hodnot od 0.3 do 1.0. Je zde napsáno, že uživatel softwaru by měl rozhodnout o velikosti hodnoty součinitele a snížit jeho hodnotu v případě, že je změna průřezu na výtoku méně náhlá, což bylo rovněž dokázáno v provedeném experimentu.

$$Z_{v\dot{y}T} = \xi_{v\dot{y}T} \cdot \left(\frac{v^2 - v_D^2}{2g} \right) \quad \xi_{v\dot{y}T} = 0.3 - 1.0 \quad (10.9)$$

SWMM [23] – výpočet ztráty na výtoku je zde popsán rovnicí (4.1) pro proudění v režimu o volné hladině. V manuálu k programu SWMM je doporučeno pro výpočet ztráty na výtoku z propustku, uvažovat hodnotu součinitele 1.0.

$$Z_{V\dot{Y}T} = \xi_{V\dot{Y}T} \cdot \left(\frac{v^2 - v_D^2}{2g} \right) \quad \xi_{V\dot{Y}T} = 1.0 \quad (10.10)$$

TUFLOW [26] - manuál k tomuto softwaru obsahuje tvrzení, že použití součinitele hodnotou 1.0 nadhodnocuje velikost ztráty na výtoku. Tato hodnota se doporučuje používat pouze v případě, že rychlost v rozšířeném profilu je rovna nule, což odpovídá výtoku do velké nádrže. Proto je navrženo používat poupravené hodnoty součinitele a brát v úvahu změnu rychlosti způsobenou konstrukčním uspořádáním výtokového profilu, jak je popsáno v rovnici (10.11).

$$\xi_{V\dot{Y}T,TUF} = \xi_{V\dot{Y}T} \left(1 - \frac{v_D}{v} \right)^2 \quad (10.11)$$

$\xi_{V\dot{Y}T,TUF}$ [-] modifikovaný součinitel ztráty na výtoku dle software TUFLOW

Výpočetní programy tedy ponejvíce používají pro výpočet ztráty na výtoku rovnicí (4.1) pro proudění o volné hladině. Software HY-8 jako jediný doporučuje přesnější metodu za použití výrazu Borda-Carnot, jak je znám z rovnice (4.3) a software TUFLOW uvádí vzorec pro výpočet modifikovaného součinitele ztráty na výtoku. Lze tedy předpokládat, že tyto dva softwary budou přinášet realitě se nejvíce blížící výsledky.

11 ZÁVĚR

První část této práce byla věnována teoretickému popisu propustků, jednotlivým typům propustků a způsobům jejich konstrukčního řešení. V této části byly rovněž popsány stavy a režimy proudění vyskytující se v propustcích a základní rovnice potřebné pro hydraulický výpočet proudění. Samostatná kapitola byla také věnována modelové podobnosti.

Ve druhé části této práce byl popsán experiment provedený na třech odlišných fyzikálních modelech propustků pro tlakový režim proudění se zatopeným vtokem i výtokem. Na modelech bylo celkem provedeno 61 sad měření a naměřená data byla zpracována pomocí Bernoulliho rovnice v kombinaci s větou o hybnosti. Vyhodnocení měření bylo soustředěno na výpočet ztrát v propustcích, především pak byla pozornost věnována ztrátě na výtoku.

Jak bylo uvedeno v úvodu, cílem této práce bylo zpřesnit výpočet ztráty na výtoku z propustku. Na základě provedeného výzkumu byly učiněny následující závěry. Bylo zjištěno, že nejpřesnější výsledky pro určení ztráty na výtoku podává výraz Borda – Carnot, druhý nejlepší výsledek přináší rovnice pro proudění o volné hladině se součinitelem 0.75 a nejvíce nepřesné výsledky dává stejná rovnice, avšak s použitím součinitele 1.0. Pro hydraulický výpočet propustků pomocí softwaru je však třeba znát hodnotu součinitele místní ztráty na výtoku. Bylo prokázáno, že literaturou doporučené hodnoty 0.75, 1.0 ani žádné jiné konstantní hodnoty nejsou vhodné, nýbrž že velikost součinitele místní ztráty na výtoku se mění v závislosti na podmínkách proudění. Nejprve byla testována závislost na míře zatopení, kde se ukázalo, že čím více je výtok z propustku zatopen, tím větší je hodnota součinitele. Ještě přesnější se však ukázala závislost na poměru zatopených ploch, která bere v úvahu i geometrii výtokového profilu. Byl tedy sestaven graf závislosti ztrátového součinitele na poměru průtočných ploch, do nějž byla vynesena data pro všechny tři modely a těmi byla proložena logaritmická křivka, jež byla ještě extrapolována. Zmíněný graf je hlavním výstupem této práce a je doporučeno jej používat v praxi při určování velikosti ztráty na výtoku z propustku.

Rovněž bylo zjištěno, že ztráta na výtoku má na celkové ztrátě největší podíl, což svědčí o její významnosti a je proto nutné její hodnotu určit co nejpřesněji. Při přesném určení ztráty na výtoku pak bude přesněji vypočtena i úroveň vzduché hladiny před propustkem. Při podhodnocení vzduché hladiny může dojít k přelití náspy komunikace či k zaplavení přilehlého území, což může způsobit materiální i lidské škody. Naopak při nadhodnocení této hladiny dochází k předimenzování propustku a tím k neekonomickému a neekologickému návrhu.

V této práci byla poměrně detailně prozkoumána ztráta na výtoku z propustku. Další výzkum by mohl být zaměřen na výpočet veškerých ztrát v propustku, především pak na výpočet ztráty na vtok do propustku, kde by mohla být ověřena správnost používaných výpočetních postupů a případně by mohly být nalezeny postupy nové, přesnější.

12 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BRUNNER, G. W. *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. US Army Corps of Engineers [online]. January 2010. Dostupné z: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC_RAS_4.1_Reference_Manual.pdf
- [2] CARTER, R., W. *Computation of Peak Discharge at Culverts*. Washington, D. C.: U. S. Geological Survey, 1957. 25 s.
- [3] ČÁBELKA, J., GABRIEL, P. *Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice[1]*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1987. 304 s.
- [4] ČSN 73 6200 *Mosty - Terminologie a třídění*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, červenec 2011.
- [5] ČSN 73 6201 *Projektování mostních objektů*. Praha: Český normalizační institut, říjen 2008.
- [6] DIVYP BRNO s.r.o. *Technické podmínky 232: Propustky a mosty malých rozpětí*. Praha: Ministerstvo dopravy, Odbor pozemních komunikací, květen 2012. 86 s.
- [7] FAIRLEY, T. J. *Hydraulics of culverts*. Durham: University of Durham, 1990. 46 s.
- [8] HAVLÍK, A. *Proudění mostními objekty a propustky*. Přednášky pro posluchače oboru Vodní hospodářství a vodní stavby na Fakultě stavební ČVUT v Praze [online]. Dostupné z: <http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/prednasky.htm>
- [9] HAVLÍK, A. *Proudění v potrubí*. Přednášky pro posluchače oboru Vodní hospodářství a vodní stavby na Fakultě stavební ČVUT v Praze [online]. Dostupné z: <http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/prednasky.htm>
- [10] HOUGHTALEN, R. J., AKAN, A. O., HWANG, H. C. *Hydraulic Engineering Systems*, Fourth Edition. Pearson Education, 2015. ISBN 978-93-325-0759-3. 492 s.
- [11] JUREČKOVÁ, Petra. *Modelový výzkum proudění na výtoku z propustku*. Praha, 2015. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební. Katedra hydrauliky a hydrologie.
- [12] KOLÁŘ, V., PATOČKA, C., BÉM, J. *Hydraulika*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1983. 474 s.
- [13] KOLÁŘ, V. *Hydraulika - Technický průvodce sv. 5*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1966. 716 s.
- [14] KROHNE. *Prospekt IFC 100, Převodník pro magneticko-indukční průtokoměry*. Duisburg: Krohne [online]. Dostupné z: <http://cz.krohne.com/cs/dlc/prospekty/>

- [15] KUNŠTÁTSKÝ, J. *Hydraulické výpočty propustků a mostů*. Vyd. 1. Praha: SNTL, listopad 1956. 48 s.
- [16] MAGNETOFLOW. *Installation and Operation Manual Wafer Meter with Model Primo®* Milwaukee: BadgerMeter Inc. [online]. Dostupné z: https://www.instrumart.com/assets/Badger-Magnetoflow-W_manual.pdf
- [17] MAVIS, F., T. *The Hydraulics of Culverts*. State College, PA: Pennsylvania State College, 1943. 34 s.
- [18] MATOUŠEK, V. *Modelová podobnost*. Přednášky pro posluchače oboru Vodní hospodářství a vodní stavby na Fakultě stavební ČVUT v Praze [online]. Dostupné z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Users/Matousek/downloads/web_HY3V_05_Modelova_podobnost.protected.pdf
- [19] MATOUŠEK, V. *Základy fyzikálního modelování*. Přednášky pro posluchače oboru Vodní hospodářství a vodní stavby na Fakultě stavební ČVUT v Praze [online]. Dostupné z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Users/Matousek/downloads/web_HY3V_04_Zaklady_fyzikalniho_modelovani.protected.pdf
- [20] NORMAN, J. M., HOUGHTALEN, R. J. and JOHNSTON, W. J. *Hydraulic Design of Highway Culverts*, Second Edition. Federal Highway Administration [online]. May 2005. Dostupné z: http://www.fhwa.dot.gov/resourcecenter/teams/geotech/geo_042006_3.cfm
- [21] PICEK, T. *Náhlé rozšíření proudu na výtoku z tlakového propustku*. Stavební obzor, ročník 19, číslo 6/2010. ISSN 1210-4027. 162-165 s.
- [22] PICEK, T. *Přechod mezi tlakovým prouděním a prouděním o volné hladině*. Otázky vodohospodářského výzkumu a praxe, sborník příspěvků. Listopad 2009. ISBN 978-80-01-04444-5. 39-43 s.
- [23] ROSSMAN, L. A. *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. U.S. Environmental Protection Agency [online]. Semtember 2015. Dostupné z: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P100N3J6.TXT>
- [24] SCHALL, J. D. et al. *Hydraulic Design of Highway Culverts*, Third Edition. Federal Highway Administration [online]. April 2012. Dostupné z: <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/12026/hif12026.pdf>
- [25] SIMSCALE. *Non-Newtonian Flow Through a Sudden Expansion*. [online] Dostupné z: https://www.simscale.com/projects/Ali_Arafat/non-newtonian_flow_through_a_sudden_expansion/
- [26] SYME, B. *TUFLOW User Manual*. BMT Group [online]. March 2016. Dostupné z: <http://www.tuflow.com/Download/TUFLOW/Releases/2016-03/AA/Doc/TUFLOW%20Manual.2016-03-AA.pdf>

[27] THOMPSON, P. L. *HY-8 User Manual (v7.5)*. Federal Highway Administration [online]. July 2016. Dostupné z: http://wmsdocs.aquaveo.com/HY-8_UserManual_v7.5.pdf

[28] TULLIS, B. P. *Hydraulic Loss Coefficients for Culverts*. National Cooperative Highway Research Program [online]. 2012. ISBN 978-0-309-25867-8. [vid. 12. 1. 2015]. Dostupné z: onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_734.pdf

[29] TULLIS, B. P., ROBINSON, S. C. *Quantifying Culvert Exit Loss*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering [online]. April 2008. Dostupné z doi: 10.1061/ASCE0733-94372008134:2263