

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra hydrauliky a hydrologie



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Analýza proudění mostním objektem se zatopeným vtokem

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Aleš Havlík, CSc.

Listopad 2019

Bc. Adéla Dostálová

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Dostálová Jméno: Adéla Osobní číslo: 438937

Zadávací katedra: 11141 - Katedra hydrauliky a hydrologie

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Analýza proudění mostním objektem se zatopeným vtokem

Název diplomové práce anglicky: Flow analysis of a bridge object with an inlet submerged

Pokyny pro vypracování:

Výzkum proudění mostním objektem se zatopeným vtokem a volným výtokem. Realizace fyzikálního výzkumu na modelu mostního objektu ve stávajícím skleněném žlabu v hydraulické hale Fakulty stavební pro proudění mostním objektem s volnou hladinou a zatopeným čelem. Pro vybrané scénáře zpracování 3D matematického modelu se zvláštním detailem na rozdělení rychlostí za vtokem do mostního objektu.

Seznam doporučené literatury:

HEC-RAS version 5.0, 2D Modeling User's Manual. US Army Corps of Engineers. USA, Davis, 2010
Hamill, L.: Bridge Hydraulics, New York, 1999.

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Aleš Havlík, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 12. 9. 2019

Termín odevzdání diplomové práce: 5. 1. 2020

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

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

24. 9. 2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

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

V Praze dne 5.11.2019

.....

Bc. Adéla Dostálová

Chtěla bych tímto poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Aleši Havlíkovi, CSc. za odborné vedení práce, ochotu a jeho drahocenný čas. Dále mé poděkování patří Ing. Tomáši Pickovi PhD. za přípravu fyzikálního modelu mostních objektů a Ing. Tomáši Kašparovi za technickou podporu a odborné konzultace při matematickém modelování. V neposlední řadě patří velký dík mé rodině za vřelou podporu.

Práce byla vytvořena v rámci projektu SGS17/171/OHK1/3T/11 „Hydraulické funkce propustků a mostů – nové výpočetní postupy“.

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá fyzikálním modelováním proudění v mostních objektech v případě zatopeného čela a volné hladiny pod mostovkou. Součástí práce je stanovení odporových koeficientů C_d jako výsledek vyhodnocení fyzikálního modelu a porovnání uvažovaných bočních kontrakcí po stranách mostu při vyhodnocení se 3D modelem.

ANOTATION

The main aim of this master thesis is physical modelling of flow through bridge structures in case of submerged front and free water level under the bridge platform. The thesis includes the assessment of drag coefficients C_d as a result of the physical modelling and comparison of considered lateral contraction along the bridge during evaluation with 3D model.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hydraulika otevřených koryt, mostní objekty, fyzikální model, 3D modelování, odporový koeficient, zákon zachování energie, průběh hladiny, ANSYS

KEY WORDS

Open-channel hydraulics, bridges, physical model, 3D model, coefficient, energy equation, course of water level, ANSYS

OBSAH

1. Úvod a cíle práce	3
2. Mostní objekty	4
3. Faktory ovlivňující proudění v mostních objektech	5
3.1 Froudovo číslo	5
3.2 Geometrie mostního otvoru	6
3.2.1 Poměr délky a šířky mostního otvoru	6
3.2.2 Tvar mostního otvoru.....	7
3.3 Zaoblení vstupní hrany	8
3.4 Šikmost nátoku a excentricita	9
4. Hydraulika mostních objektů.....	11
4.1 Bernoulliho rovnice	12
4.2 Aplikace rovnice hybnosti	13
4.3 Výtok pod stavidlem.....	14
4.5 Model HEC-RAS.....	15
4.4 Další metody	16
5. Teorie fyzikálního modelování v hydraulice	18
5.1 Froudovo a Reynoldsovo kritérium podobnosti	19
6. Popis fyzikálního modelu	21
6.1 Fyzikální model	21
6.1.1 Hydraulický okruh	21
6.1.2 Hydraulický žlab.....	23
6.1.3 Vestavby mostních objektů.....	24
6.2 Měřicí zařízení	24
6.2.1 Měření úrovně hladiny.....	24
6.2.2 Měření průtoku	26
7. Průběh měření	28

7.1 Měřené stavy.....	28
7.2 Body měření.....	29
7.3 Nejistoty a možné chyby měření	30
8. Analýza a vyhodnocení naměřených dat	32
8.1 Střední hodnota úrovně hladiny	32
8.2 Vyloučení některých měření	34
8.3 Zavedení boční kontrakce	34
8.4 Postupné rozšíření proudu pod mostním objektem.....	35
8.5 Průtočná plocha a rychlost proudění.....	37
8.6 Energetická výška	37
8.7 Volný výtok a výpočet průtokového koeficientu C_D	39
8.8 Součinitel kontrakce C_C a rychlostní součinitel φ	39
8.9 Vyhodnocení průtokového koeficientu C_D	40
8.10 Porovnání hodnot C_D z fyzikálního výzkumu s různými autory	45
8.11 Rovnice pro výpočet průtoků v programu HEC-RAS	49
9. 3D modelování.....	52
10. Závěr	58
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ INFORMACÍ.....	59
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	61
SEZNAM TABULEK	63
SEZNAM ROVNIC.....	64

1. Úvod a cíle práce

Cílem práce je podrobný popis proudění v mostních objektech v případě zatopeného čela mostu a volného výtoku a stanovení a vyhodnocení koeficientu průtoku C_D .

V úvodní části práce budou popsány typy mostních objektů a hydraulika mostních objektů. Rozebrány budou faktory, které mají vliv na proudění vody v mostních objektech a jejich následky.

Hlavní náplní práce je prezentace měření na fyzikálním modelu ve vodohospodářské laboratoři za cílem určení průtokového koeficientu C_D . V průběhu představení fyzikálního výzkumu budou popsány základní teoretické náležitosti fyzikálního modelování, bude popsán fyzikální model, na kterém měření probíhalo. Dále bude rozebrán průběh a systém provedení měření a jeho možné nejistoty.

Měření následně bude zanalyzováno, bude popsán postup jeho vyhodnocení a uvedena fakta, která z něj vyplývají. Zejména bude brán zřetel na hodnoty průtokového koeficientu C_D , jehož hodnoty budou na základě měření stanoveny a bude zhodnocena závislost hodnot tohoto koeficientu na dalších parametrech modelu a proudění.

Hodnoty koeficientů charakterizujících proudění získané fyzikálním výzkumem budou porovnány s hodnotami koeficientů dle uznávaných autorů či literatury.

V rámci této práce bude vytvořen trojrozměrný matematický model za účelem porovnání parametrů proudění vody s fyzikálním modelem. Pro vytvoření modelu bude použit software ANSYS. Porovnány budou zejména zavedené boční kontrakce proudu v rámci vyhodnocení měření na fyzikálním modelu.

2. Mostní objekty

Mostním objektem se rozumí nahrazení zemního tělesa komunikace v místě, kde je zapotřebí překonat překážku. Mostní objekty je možno rozdělit na propustky, lávky a mosty[10]. V rámci této práce bude brán zřetel na proudění v mostech, popř. lávkách. V případě mostů a lávek jsou převažujícími rozměry výška a šířka mostního otvoru, nikoli délka mostní konstrukce ve směru proudění.

V případě mostu, který překonává překážku ve formě říčního koryta, tvoří jeho konstrukce překážku v proudění vody v tomto korytě. Boční mostní pilíře způsobují boční kontrakci proudu, další zúžení může být způsobeno pilíři středovými v závislosti na jejich počtu a tvaru zhlaví. V případě vyšších stavů v říčním korytě může dojít ke zvýšení hladiny nad úroveň mostovky, mostní otvor shora bude zcela zatopen a konstrukce mostovky bude také překážkou v proudění.

Most vzhledem k proudění vody v říčním korytě tvoří překážku a způsobuje ztráty energie. Celkové ztráty jsou součtem ztrát místních a ztrát třením. V případě mostů jsou podstatnější místní ztráty způsobené již výše zmíněnými kontrakcemi. Vzhledem k většinou malé podélné délce mostu je hodnota ztrát třením menší než ztrát místních[11].

Při návrhu mostního objektu by měly být brány na zřetel zejména tyto cíle:

- Minimální náklady výstavby a provozu mostní konstrukce
- Požadovaný vývoj hydrauliky v mostním objektu – kapacita, proudění, atd.
- Zmírnění dopadu na životní prostředí
- Bezpečnost pohybu požadovaného typu dopravy

3. Faktory ovlivňující proudění v mostních objektech

Hydraulika proudění vody v mostních objektech je ovlivněna několika faktory, které mají vliv na jednotlivé veličiny a charakteristiky proudění. Chováním a vlivem faktorů, které hydrauliku v mostních objektech ovlivňují, je potřeba se zabývat v prevenci kolapsů mostních konstrukcí a eliminace povodňových stavů způsobených selháním mostní konstrukce.

V případě selhání či kolapsu mostní konstrukce se jedná nejčastěji o následující tři případy. Prvním případem je nevhodný návrh mostního objektu zejména kvůli nedostatečné velikosti mostního otvoru, který je zahlcován a dojde ke vzdouvání hladiny před mostním objektem a následnému vybřežení vody z koryta či přelití mostovky. Dalším případem je tvorba výmolů v okolí mostních pilířů nebo eroze bočních svahů, což vede ke ztrátě stability celé mostní konstrukce. Třetím případem je usazování a zanášení konstrukce sedimenty. Usazováním splavenin dochází ke zvýšení dna koryta v mostním objektu a tím zmenšení jeho průtočné kapacity. U menších mostních konstrukcí může dojít k zablokování mostního otvoru předměty a plaveninami na vodní hladině.

V rámci této kapitoly budou vyjmenovány a popsány nejvýznamnější faktory, které hydrauliku mostních objektů ovlivňují.

3.1 Froudovo číslo

Froudovo číslo je ukazatelem zejména režimu proudění v mostním objektu. Hodnotu Froudova čísla je možno spočítat dle rovnice 3.1.1.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gy}} \quad (3.1.1)$$

Fr [-]	Froudovo číslo
v [m/s]	střední průřezová rychlost proudění
g [m/s ²]	gravitační zrychlení (g=9.81 m/s ²)
y [m]	průměrná hloubka v daném profilu

Průměrná hloubka v daném profilu se vypočítá jako poměr průtočné plochy v daném profilu a šířky koryta v úrovni hladiny. Jmenovatel pro výpočet Froudova čísla vyjadřuje postupivost vln na hladině.

V případě, že Froudovo číslo nabývá nižších hodnot než 1, jedná se o říční režim proudění. Z rovnice 3.1.1. vyplývá, že průřezová rychlost je menší než postupivost vln na hladině. Dochází k šíření vzruchů od dolního profilu k hornímu, tedy proti směru proudění. Výpočet bude v tomto případě probíhat směrem proti proudění vody z výchozí úrovně dolní vody pod mostním objektem[12].

V případě, že Froudovo číslo nabývá vyšších hodnot než 1, jedná se o bystřinný režim proudění. Z rovnice 3.1.1. vyplývá, že průřezová rychlost je vyšší než postupivost vln na hladině. Dochází k šíření vzruchů od horního profilu k dolnímu, tedy po směru proudění. Výpočet bude v tomto případě probíhat po směru proudění vody z výchozí úrovně hladiny před vtokem do mostního objektu[12].

3.2 Geometrie mostního otvoru

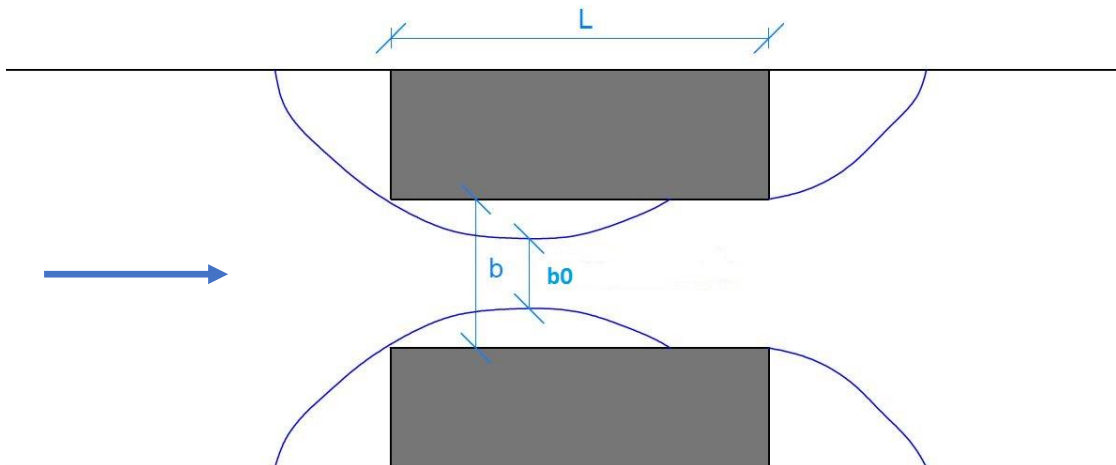
3.2.1 Poměr délky a šířky mostního otvoru

Faktorem, který ovlivňuje hydrauliku mostního objektu, je geometrie jeho otvoru, resp. poměr délky L a šířky mostního otvoru b . Se zvyšující se délkou mostního objektu se zvyšuje poměr L/b a proudění v mostním objektu je efektivnější. V případě kratšího otvoru je daný poměr menší a kapacita mostního otvoru, tedy průtok, který je schopen most provést, je nižší[12].

V případě delších mostů se stihne vodní proud po úvodních bočních kontrakcích opět rozšířit a místní ztráta na výtoku z mostního objektu je tak nižší než v případě kratších mostních konstrukcí, kdy se zúžený proud v následku vtokové ztráty nedokáže plně rozšířit před výtokem z mostu a ztráta na výtoku z mostu je významně vyšší.

Z pohledu energetických ztrát je proudění v delších mostních konstrukcích efektivnější než v případě kratších konstrukcí.

Schéma zúžení proudu mostním objektem je znázornění v obr. 3.2.1.1.



Obr. 3.2.1.1 Schéma zúžení proudu při proudění mostním objektem

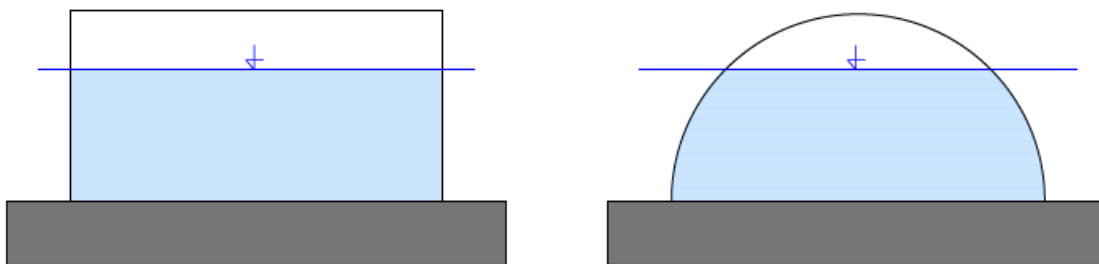
3.2.2 Tvar mostního otvoru

Tvar mostního otvoru významně ovlivňuje kapacitu mostní konstrukce. V případě stejné hladiny před mostním objektem je převeden vyšší průtok v případě, že mostní otvor je v této úrovni širší.

Toto splňuje například obdélníkový tvar mostního otvoru, kdy jeho šířka je s úrovní hladiny neměnná. U obloukového tvaru mostního otvoru dochází ke zmenšení šířky otvoru s úrovní hladiny, což vede k nižší kapacitě takového otvoru a tvorbě bočních kontrakcí. Mostní objekt s obdélníkovým tvarem mostního otvoru za stejného vodního stavu převede vyšší průtok než obloukový most a tím způsobuje i nižší vzduť hladiny před mostní konstrukcí[12].

Z hydraulického, technického a ekonomického hlediska je výhodnější výstavba mostních konstrukcí s obdélníkovými mostními otvory.

Schématické porovnání obdélníkového a obloukového mostního otvoru je uvedeno v obr. 3.2.2.1.



Obr. 3.2.2.1 Srovnání obdélníkového a obloukového mostu

3.3 Zaoblení vstupní hrany

Vstup vody do mostního profilu významně ovlivňuje energetické ztráty při proudění a tím i kapacitu mostního objektu. V tomto případě platí obecný fakt, čím plynuleji voda natéká do mostního objektu, tím nižší je energetická ztráta způsobena nátokem do mostního objektu.

Nejefektivnějším řešením je proudnicový tvar vstupní hrany, kdy jsou ztráty na vtoku minimální, nedochází k tak velkému zúžení proudu a hodnota průtokového součinitele C_D nabývá vyšších hodnot.

Geometrie vstupní hrany je významná zejména u úzkých mostů (nízká hodnota M faktoru), jelikož případnými kontrakcemi je ovlivněna podstatná část šířky proudu. Vhodně zvolené řešení vstupní hrany může zvýšit kapacitu mostního otvoru až o 20%. V případě běžných mostních konstrukcí lze vhodnou úpravou vstupní hrany zvýšit kapacitu mostního otvoru přibližně o 5-10% [12].

Z technického hlediska je vcelku obtížné dosáhnout vhodného řešení vstupní hrany. Jednak je přesné zhotovení vhodné tvaru stavebně a technologicky náročné, a navíc tato náročnost vede i k finanční otázce úpravy vstupní hrany, kdy náklady na výstavbu jsou vyšší. Kompromisem v řešení vstupní hrany mezi pravoúhlou a proudnicovou je realizace zkoseného tvaru, který nepředstavuje takové náklady a náročnost výstavby jako proudnicový tvar a zároveň z hydraulického hlediska je výhodnější než pravoúhlá varianta vstupní hrany [11].

Náčrtky jednotlivých typů tvarů vstupních hran jsou zobrazeny v obr. 3.3.1.



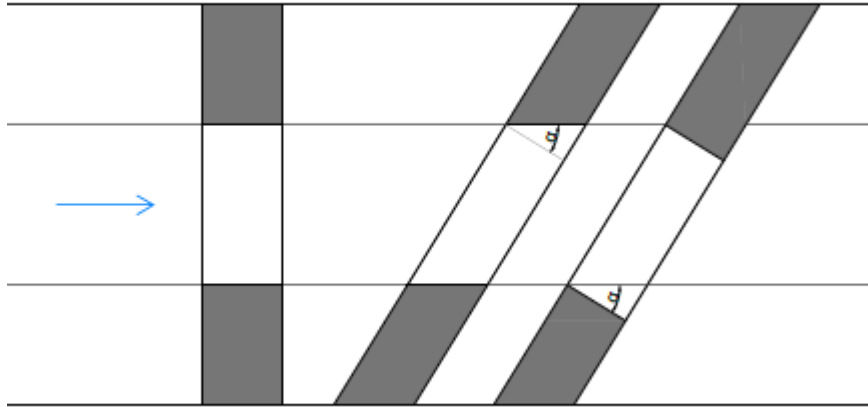
Obr. 3.3.1 Typy vstupních hran

3.4 Šikmost nátoku a excentricita

Umístění otvoru v mostním objektu vůči korytu vodního toku má významný vliv na hydrauliku a tedy na kapacitu mostního otvoru. Nejvýhodnější je umístění mostního objektu souběžně s osou proudění vody kvůli redukci ztrát a kontrakcí.

V případě, že mostní konstrukce je kolmá na vodní tok, nejvýhodnějším řešením je rovný mostní otvor, který respektuje směr proudění vody. V případě, že mostní konstrukce vede šikmo přes koryto vodního toku, je možno mostní otvor vybudovat dvěma způsoby. Prvním je zachování směru proudění, což znamená, že mostní otvor vůči samotné mostní konstrukci bude vybudován šikmo. Druhým způsobem je zachování kolmosti v rámci mostní konstrukci, což ale znamená, že vůči vodnímu proudu bude mostní otvor působit jako nesymetrická, resp. šikmá překážka. Výše zmíněné typy šikmosti mostních objektů ovlivňují proudění vody v závislosti na úhlu α , pod kterým je toto vychýlení provedeno[12].

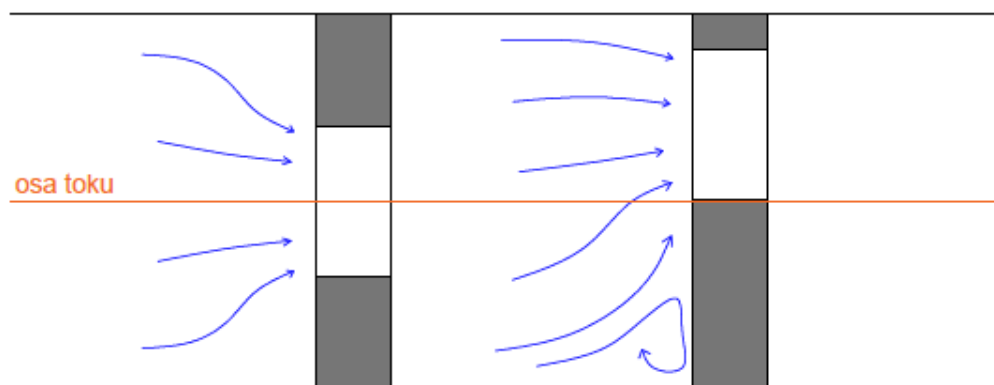
Jednotlivé typy šikmosti mostní konstrukce a mostního otvoru jsou zobrazeny v obr. 3.4.1.



Obr. 3.4.1 Typy šikmostí mostní konstrukce vůči vodnímu proudu

Umístění mostního otvoru v rámci příčného profilu, resp. po šířce vodního koryta, je taktéž významným parametrem ovlivňujícím hydrauliku mostních objektů. V případě umístění mostního objektu v ose vodního proudu, nedochází k tak významným ztrátám jako v případě umístění např. u jednoho z břehů říčního koryta. Při významnější excentricitě dochází ke vzniku úplavů a v říčních korytech i k zanášení a sedimentaci[12].

V obrázku 3.4.2 jsou znázorněny dva příklady umístění mostního otvoru v rámci příčného profilu s náčrtem proudnic a osy koryta.



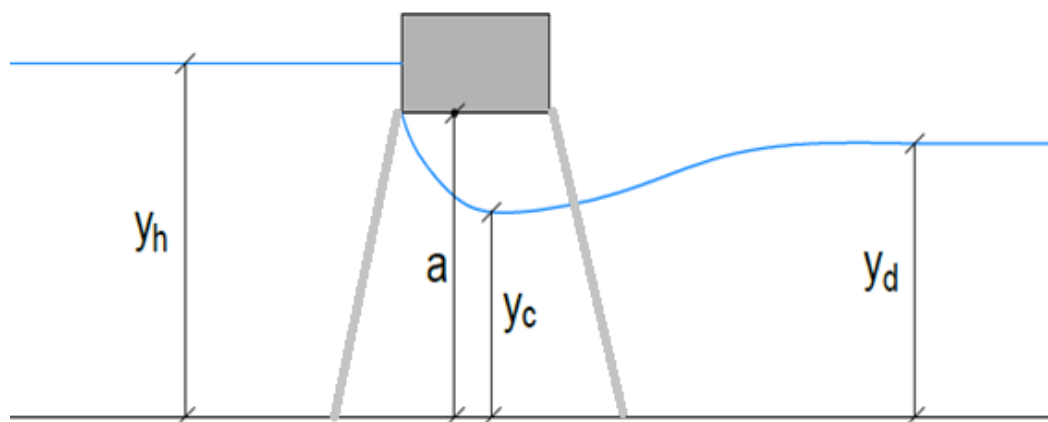
Obr. 3.4.2 Příklady umístění mostního otvoru v rámci příčného profilu

4. Hydraulika mostních objektů

V rámci diplomové práce byl výzkum zaměřen na případ, kdy čelo mostovky je shora zatopeno a výtok z mostního otvoru je volný, tudíž tato kapitola je věnována hydraulice mostního objektu s prouděním tohoto typu.

Při daném typu proudění je vtok do mostního otvoru zahlcen, nicméně vodní paprsek je strháván od vstupní hrany. Výtok z mostního otvoru a celá oblast uvnitř otvoru v mostní konstrukci je v režimu proudění s volnou hladinou. Tento stav nastává zejména v kombinaci vyššího průtoku v říčním korytě a vyšší hodnoty Froudova čísla (řádově $Fr > 0.25$). Průtokové množství je ovlivněno zejména geometrií mostního objektu, která má významnější vliv na výslednou hodnotu v porovnání s charakteristikami koryta.

Níže je v obr. 4.1 uvedeno schéma proudění mostním objektem v případě zatopeného čela mostovky a volného výtoku.



Obr. 4.1 Schéma proudění mostním objektem při zatopeném čele mostovky a volném výtoku

Proudění v mostních objektech může probíhat ve dvou režimech proudění. K určení režimu proudění je používáno Froudovo číslo (viz kapitola 3.1). V případě, že Froudovo číslo nabývá hodnot vyšších než 1, jedná se o proudění bystrinné. V opačném případě je režim proudění říční.

V případě zatopeného čela mostovky je většinou v horním profilu říční proudění, proud má malou rychlost a velkou průtočnou plochu. Těsně za čelem mostovky, v místě

stržení proudu, dochází k nárůstu rychlosti proudění a zpravidla změně režimu na bystřinný.

V případě průtoků, které způsobí zatopení čela mostovky, a zároveň malé vzduťi dolní vodou (např. při velkém sklonu říčního koryta), může docházet k pokračování bystřinného proudění dále po toku, zpravidla při malé hloubce proudění. K přechodu z bystřinného proudění v mostním objektu do říčního, které je dále v korytě pod objektem, dochází při větším vzduťi dolní vody a menším sklonu říčního koryta (nižší rychlosti proudění). V místě přechodu z bystřinného proudění do říčního (mezi hloubkami y_c a y_d) se utváří vodní skok.

Pro tento typ proudění v mostním objektu, tedy zatopené čely mostovky a volný výtok, je možné při výpočtech uvažovat stejné zákonitosti jako při výtoku pod stavidlem.

4.1 Bernoulliho rovnice

Pro výpočet průběhu hladiny či průtočného množství je používána Bernoulliho rovnice, která vychází ze zákona zachování mechanické energie. Konkrétní využití Bernoulliho rovnice v rámci této práce je popsáno v kapitole 8.6.

Příklad využití Bernoulliho rovnice mezi profily před mostním objektem a v profilu snížené hloubky y_c je uveden v rovnici 4.1.1[11].

$$y_h + \frac{\alpha v_h^2}{2g} = y_c + \frac{\alpha v_c^2}{2g} + Z \quad (4.1.1)$$

y_h [m]	hloubka proudění v profilu před mostním objektem
y_c [m]	snížená hloubka proudění
v_h [m/s]	rychlost proudění v profilu před mostním objektem
v_c [m/s]	rychlost proudění v profilu v místě snížené hloubky proudění
g [m/s ²]	gravitační zrychlení
Z [m]	ztrátová výška
A [-]	Coriolisovo číslo

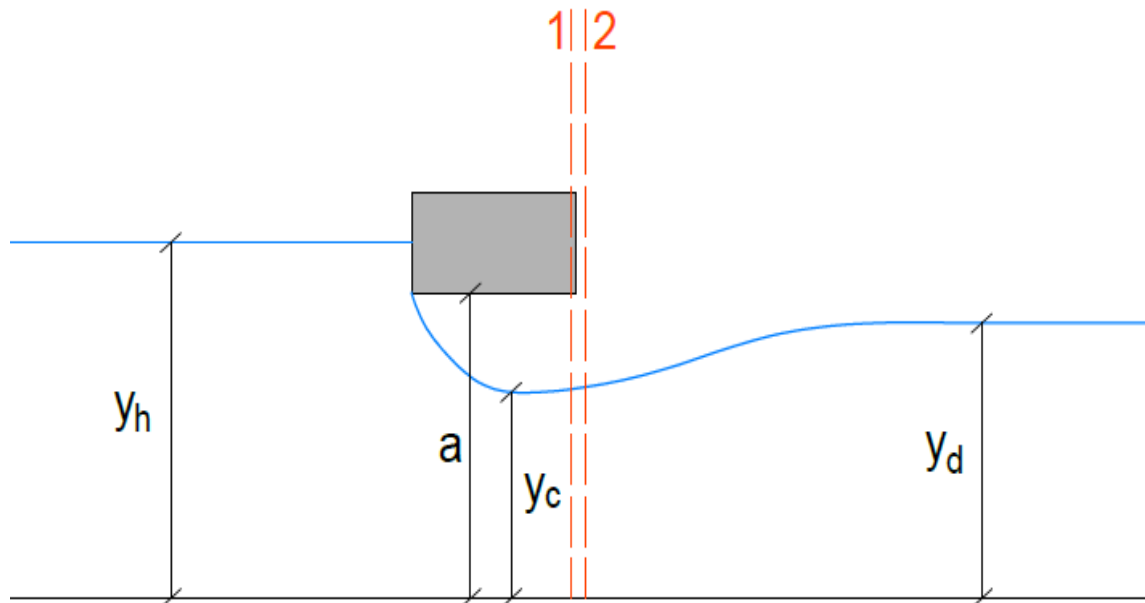
4.2 Aplikace rovnice hybnosti

Průběh hladiny či průtokové množství lze spočítat také aplikací rovnice zachování hybnosti.

Pro daný úsek je sestavena bilanční rovnice sil. Níže je uveden příklad sestavení takové rovnice (4.2.1) pro profily těsně před koncem mostního objektu a za objektem, které jsou znázorněny v obr. 4.2.1[11].

$$F_{tlak1} + F_{průtok1} + F_{pilíř} + W_{1-2} = F_{tlak2} + F_{průtok2} + F_t \quad (4.2.1)$$

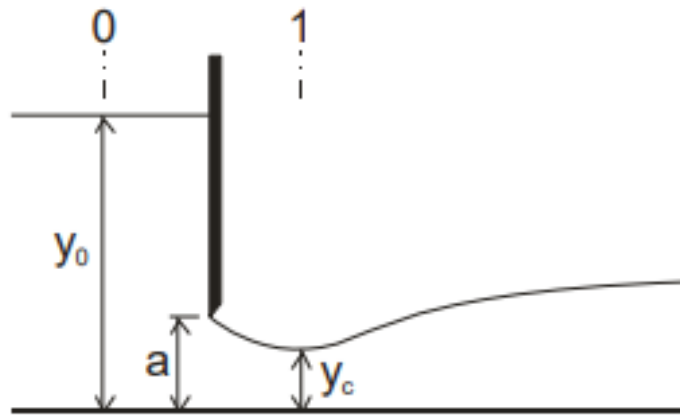
F_{tlak} [N]	tlaková síla v příslušném profilu
$F_{průtok}$ [N]	průtoková síla v příslušném profilu
W_{1-2} [N]	složka tíhy vody v příslušném úseku ve směru proudění
$F_{pilíř}$ [N]	tlaková síla od pilířů
F_t [N]	vnější třecí síla v příslušném úseku



Obr. 4.2.1 Schéma pro aplikaci zachování hybnosti

4.3 Výtok pod stavidlem

V případě zatopeného čela mostovky a volného výtoku z mostního otvoru lze použít analogii k výpočtu výtoku pod stavidlem. V obr. 4.3.1 je uvedeno zjednodušené schéma pro výpočet výtoku pod stavidlem[8][14].



Obr. 4.3.1 Schéma pro výpočet výtoku pod stavidlem [14]

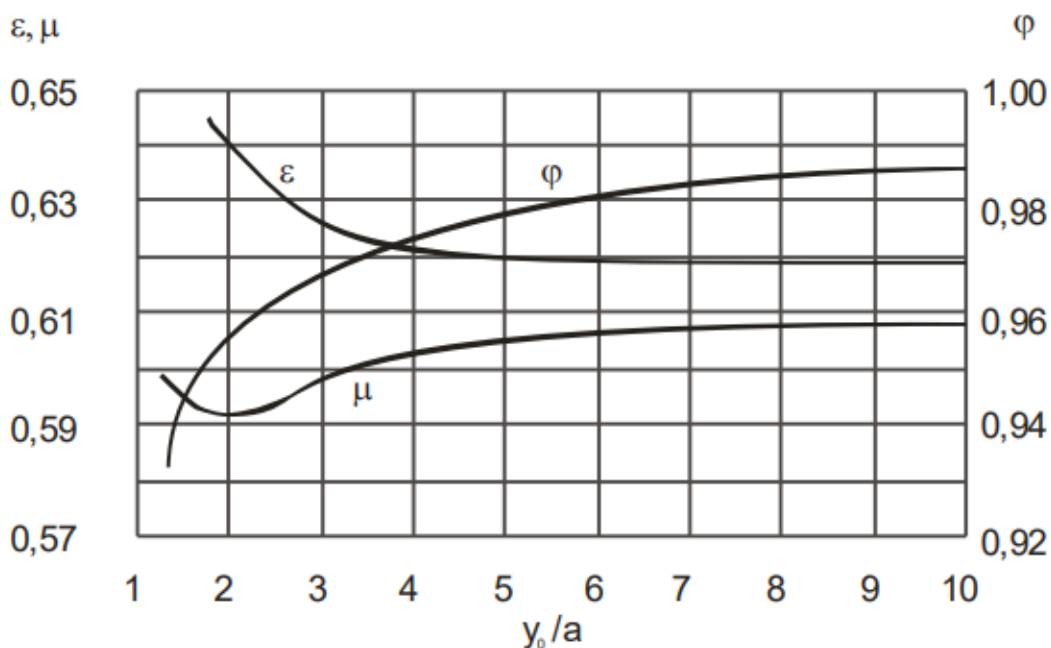
Pro výpočet průtoku lze využít rovnici uvedenou ve vztahu 4.3.1[14].

$$Q = \mu ab \sqrt{2g(y_0 - y_c)} \quad (4.3.1)$$

Po úpravě rovnice, kdy je symbol průtokového koeficientu μ nahrazen označením C_D a v horním profilu (profil 0) je předpokládána zanedbatelná hodnota rychlosti proudění, tudíž lze aplikovat předpoklad rovnosti mezi úrovní hladiny a úrovní energetické výšky, lze rovnici zapsat ve tvaru 4.3.2, která bude v této práci dále využívána.

$$Q = C_D ab \sqrt{2g(E_h - y_c)} \quad (4.3.2)$$

Průtokový koeficient μ je ve vzájemném vztahu se součinitelem kontrakce ε a rychlostním součinitelem φ . Níže v obr. 4.3.2 je uveden graf jejich vzájemné závislosti[14].



Obr. 4.3.2 Graf vzájemné závislosti koeficientů při výpočtu výtoku pod stavidlem [14]

Křivka určující hodnoty průtokového součinitele se pohybuje přibližně v rozmezí 0.590-0.610. Hodnoty koeficientu kontrakce se pohybují v rozmezí přibližně 0.625-0.645. Rychlostní součinitel nabývá v grafu hodnot přibližně v rozmezí 0.93-0.99.

4.5 Model HEC-RAS

Ve výpočetních programech (např. HEC-RAS) je v rámci hydraulických výpočtů hodnota snížené hloubky proudění y_c stanovena lineární nebo konstantní závislostí, většinou redukováním světlé výšky otvoru o 50 % (tedy $y_c = 0.5a$).

Vztah pro výpočet průtoků mostním otvorem v případě zatopeného čela mostovky a volného výtoku, který je v programu HEC-RAS používán, je uveden v rovnici 4.5.1. V rovnici 4.5.2 je uveden její upravený tvar, kdy byl součet hloubky proudění a rychlostní výšky v profilu před mostem vyjádřen pomocí energetické výšky[13].

$$Q = C_D ab \sqrt{2g \left(y_h - \frac{a}{2} + \frac{v_h^2}{2g} \right)} \quad (4.5.1)$$

$$Q = C_D ab \sqrt{2g \left(E_h - \frac{a}{2} \right)} \quad (4.5.2)$$

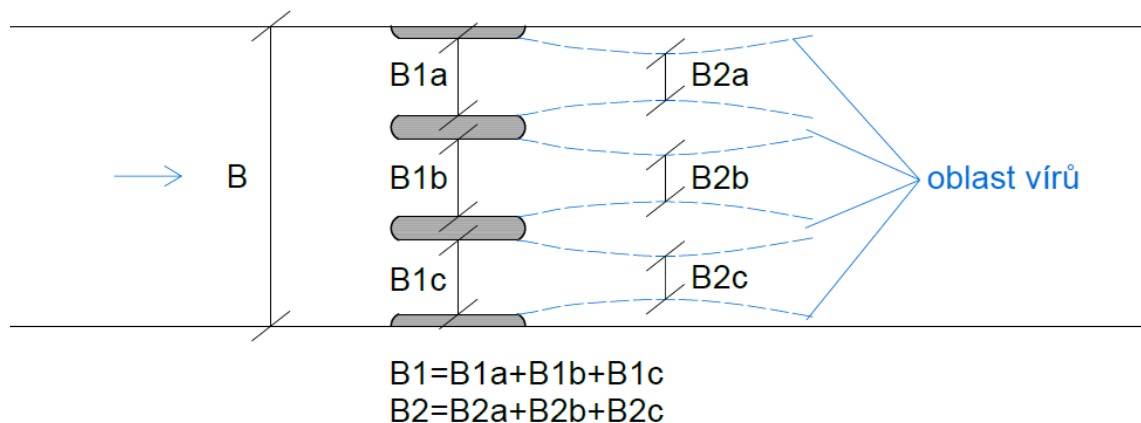
Z porovnání rovnic 4.3.2 a 4.5.2 vyplývá, že hodnota snížené hloubky proudění je rovna polovině světlé výšky otvoru a měl by platit vztah uvedený v rovnici 4.5.3.

$$y_c = \frac{a}{2} \quad (4.5.3)$$

4.4 Další metody

V případě významného ovlivnění vodního proudu mostními pilíři zejména vzhledem k jejich geometrii, je vhodné použít Escandovu metodu pro převládající vliv středových pilířů. Escandova metoda jakýmsi způsobem redukuje průtočnou šířku těsně za středovými pilíři, kde dochází k tzv. proudovému stínu a vzniku vírů. Účinná šířka je pak rozdílem šířky koryta a šířek oblastí, kde dochází k tvorbě vírů, resp. součtem šířek mezi oblastmi vírů. Tato metoda pro výpočet průběhů hladin mezi profily využívá hybnost.

Níže je zobrazen náčrt mostního objektu s pilíři s vyznačením šířek a oblastí vírů dle Escandovy metody.



Obr. 4.4.1 Náčrt Escandovy metody[11]

V případě štíhlých pilířů jsou šířky v profilech 1 a 2 téměř rovny, tedy lze uvažovat $B_1 = B_2$. Vzájemný rozdíl vzrůstá se šířkou pilířů.

Zejména v případě významného ovlivnění proudění v objektu úrovní dolní vody je vhodné použití analogie k výpočtu přepadu před širokou korunu. K výpočtu průtočného množství je pak využita rovnice pro zatopený přepad. V případě úplného přelítí mostovky je pak průtok součtem průtoku pod mostovkou, který lze vypočítat jako výtok zatopeným otvorem, a průtoku nad mostovkou, na jehož výpočet lze aplikovat rovnici přepadu[11].

V rámci této práce Escandova metoda ani analogie k přelivu přes širokou korunu nebyly vzhledem k charakteru proudění a geometrii mostního objektu použity.

5. Teorie fyzikálního modelování v hydraulice

Tato kapitola je věnována fyzikálnímu modelování, kde jsou shrnuty hlavní výhody fyzikálního modelování, uvedeny rovnice pro výpočet modelových měřítek a definovány zákony modelové podobnosti. Tato kapitola je do práce zařazena zejména z důvodu objasnění problematiky fyzikálního modelování, jelikož měření a výzkum, který je předmětem této práce, byl prováděn na fyzikálním modelu.

Základní myšlenkou a podstatou fyzikálního modelování je existence dvou jevů se stejnými fyzikálními charakteristikami. V tomto případě je možné průběh jevu ve skutečnosti, tzv. prototypu, simulovat na zmenšeném modelu.

Pokud ve skutečnosti, tedy na prototypu, a na zmenšeném modelu dochází k proudění stejného média (např. vody), je podkladem pro fyzikální modelování teorie podobnosti hydrodynamických jevů. Vzájemné vztahy mezi prototypem a modelem je možné matematicky formulovat pomocí zákonů mechanické podobnosti, mezi které patří např. Frouduv, Reynoldsův, Newtonův, Weberův, apod. [2].

Cílem fyzikálního modelování je dosažení maximální mechanické podobnosti. V praxi nelze dosáhnout úplné mechanické podobnosti, kdy je proudění na modelu věrným obrazem proudění na prototypu. Je tedy nutné si vybrat měřítko pro dominantní působící síly a ostatní zanedbat. Mechanická podobnost proudění je výsledkem podobnosti geometrické, kinematické a dynamické mezi prototypem a modelem.

Geometrická podobnost je zajištěna v případě, kdy jsou všechny rozměry a úhly prototypu zmenšeny do modelu dle stejného měřítka. Řídícím měřítkem je měřítko délky M_L .

Kinematická podobnost respektuje vzájemnou podobnost mezi dráhami, které opisují sobě odpovídající částice proudu v úměrně dlouhých dobách. Řídícími měřítky jsou měřítko délky M_L a měřítko času M_t .

Dynamickou podobností je zajištěna vzájemná podobnost sobě odpovídajících sil na prototypu a modelu. Podobnost je řízena měřítkem síly M_F [2].

Pro vyjádření podobnosti existuje několik zákonů podobnosti, které již byly zmíněny výše. Nejzákladnějšími zákony jsou Frouduv zákon podobnosti a Reynoldsův zákon podobnosti. Tyto zákony jsou dostačující pro fyzikální jevy s jednou dominantní

sílu. V případě proudění, které je ovlivňováno více významnými silami, není použití těchto zákonů dostačující a je nutno použít složitější zákon podobnosti. V praxi však Frouduv i Reynoldsův zákon patří mezi nejpoužívanější[3].

5.1 Froudovo a Reynoldsovo kritérium podobnosti

Froudovo číslo vyjadřuje dynamickou podobnost jevů na prototypu a modelu. Uplatní se při jevech, kde jsou dominantní setrvačné a gravitační síly jako například u proudění s volnou hladinou. Pro měřítko Froudova čísla platí následující rovnice.

$$Fr = \frac{v^2}{gL} \rightarrow M_{Fr} = \frac{M_v^2}{M_g \cdot M_L} = 1 \quad (5.1.1)$$

M_{Fr} [-]	měřítka Froudova čísla
M_v [-]	měřítka rychlostí proudění
M_g [-]	měřítka gravitačního zrychlení
M_L [-]	délkové měřítko

Ve většině případů se prototyp a model vyskytují v oblasti stejného gravitačního zrychlení, je tedy možné měřítko gravitačního zrychlení považovat rovno jedné. Tímto předpokladem dojde ke zjednodušení předchozí rovnice na následující tvar.

$$M_v = \sqrt{M_L} \quad (5.1.2)$$

Při výpočtu je často nutné znát měřítko průtoků, které je získáno z následující rovnice.

$$M_Q = M_L^{\frac{5}{2}} \quad (5.1.3)$$

Reynoldsovo číslo vyjadřuje přibližnou dynamickou podobnost jevů na prototypu a modelu. Uplatní se při jevech, kde jsou dominantní setrvačné a vazké(třecí) síly jako například u proudění s napjatou hladinou. Pro měřítko Reynoldsova čísla platí následující rovnice.

$$Re = \frac{vD}{\nu} \rightarrow M_{Re} = \frac{M_v \cdot M_L}{M_\nu} = 1 \quad (5.1.4)$$

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

Vzhledem k výskytu stejného média (vody) na prototypu a modelu je možné uvažovat měřítko kinematické viskozity rovno jedné. Pro vyjádření měřítka rychlosti a průtoku platí následující rovnice.

$$M_v = \frac{1}{M_L} \quad (5.1.5)$$

$$M_Q = M_L \quad (5.1.6)$$

Fyzikální modelování se zohledněním Froudova měřítka je technicky jednodušší než při zohlednění Reynoldsova měřítka. Pro zajištění Reynoldsova čísla je při modelování nutno zajistit vyšší průtoky, což může být v některých případech v laboratoři až nemožné, což vyplývá z rovnice 5.1.6. Zároveň je z rovnic 5.1.3 a 5.1.6. zřejmé, že současné dodržení obou kritérií je na modelu fyzikálně nemožné. Rovnosti měřítek je dosaženo při hodnotě délkového měřítka rovné jedné, což znamená, že model by musel být stejně velký jako prototyp[2].

V rámci této práce jsou hodnoty měřeny na fyzikálním modelu. Data jsou vyhodnocována pouze v rámci fyzikálního modelu a nejsou přepočítávána či porovnávána se skutečnými daty na prototypu.

6. Popis fyzikálního modelu

Tato kapitola se věnuje popisu a charakteristice součástí a prvků fyzikálního modelu, který byl použit pro modelování hydraulického proudění v mostních objektech. Popsány jsou jak zařízení, v nichž bylo modelování prováděno, tak i přístroje sloužící k měření potřebných veličin. Veškeré zařízení je umístěno ve Vodohospodářské laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze, kde taktéž bylo prováděno veškeré měření.

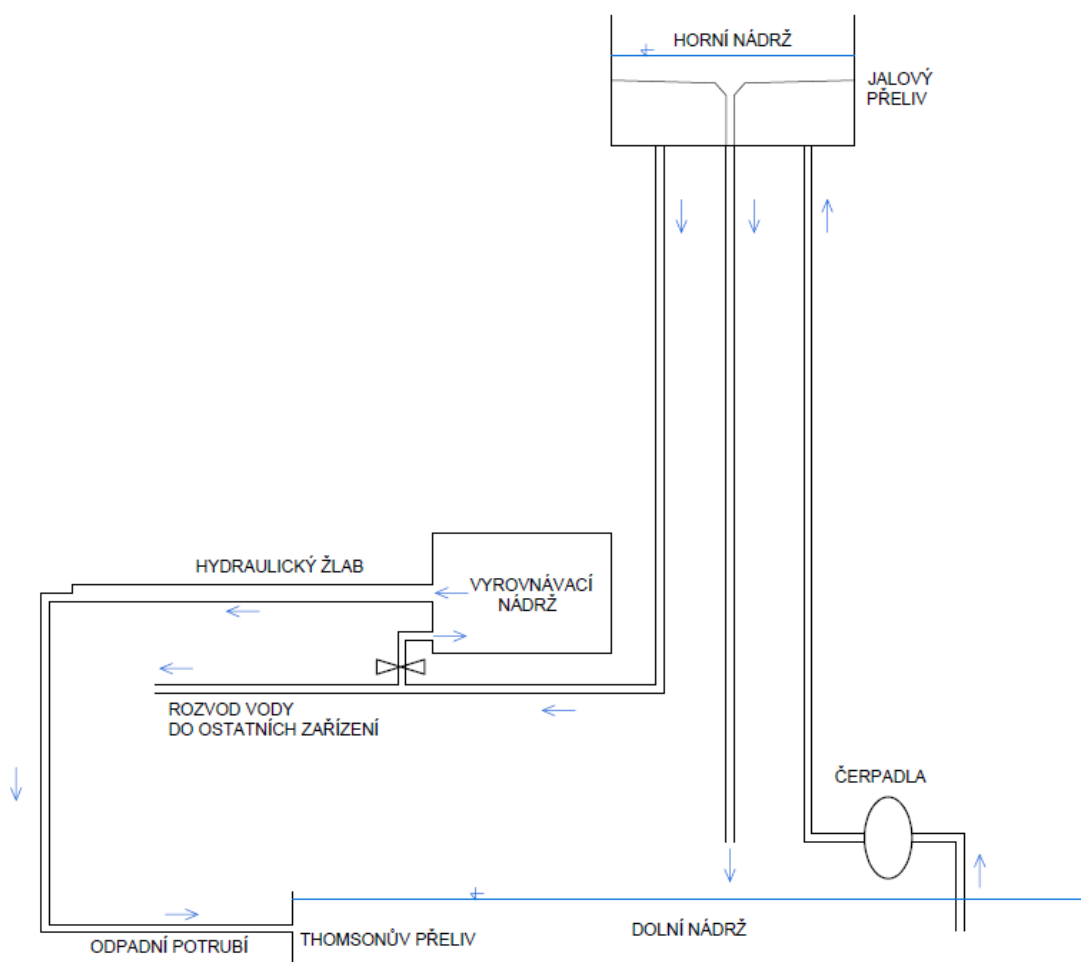
6.1 Fyzikální model

Fyzikální model je sestaven z hydraulického okruhu zajišťující dodávku vody do hydraulického žlabu disponujícím vestavbou mostního objektu.

6.1.1 Hydraulický okruh

Pro zajištění proudění vody ve žlabu byl použit uzavřený hydraulický okruh. Z dolní nádrže je voda pomocí čerpadel vytlačena do horní nádrže na střeše budovy fakulty. Horní nádrž je pro zvýšení bezpečnosti osazena jalovým přelivem, voda z této nádrže je pomocí potrubí samospádem rozváděna do jednotlivých hydraulických žlabů ve Vodohospodářské laboratoři. Před samotným vtokem do žlabů je voda přivedena do vyrovnávací nádrže, která je umístěna s dostatečným převýšením nad hydraulickými žlaby. Z vyrovnávací nádrže voda proudí do jednotlivých hydraulických žlabů, kdy na jejich vtocích jsou umístěna zařízení pro rozdělování průtoku tak, aby bylo možné střídavé využití jednotlivých žlabů, nicméně v rámci této práce byl využíván žlab pouze jeden, v němž byl usazen model mostního objektu. Na konci žlabu voda přepadá přes Thomsonův měrný přeliv do dolní nádrže, čímž je uzavřen celý hydraulický okruh.

Schéma hydraulického okruhu je načrtnuto na obr. 6.1.1.1.



Obr. 6.1.1.1 Schéma hydraulického okruhu

6.1.2 Hydraulický žlab

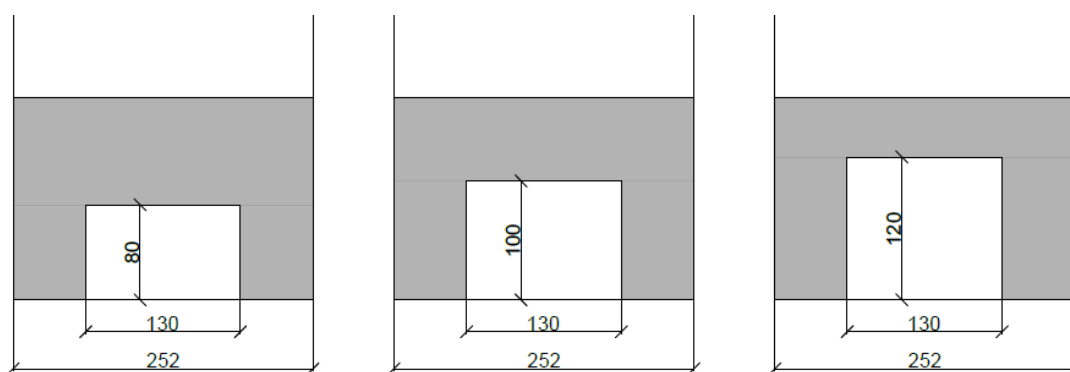
Celý výzkum byl prováděn na jednom hydraulickém žlabu, do něhož byly vkládány vestavby mostních objektů popsané v kapitole 6.1.3. Jedná se o pevný hydraulický žlab ve vodorovné poloze, tedy nulovým podélným sklonem. Žlab disponuje šířkou 252 mm a délkou 7300 mm. Nosná ocelová konstrukce žlabu je doplněna o skleněné výplně bočních stěn. Horní okraje bočnic jsou osazeny ocelovými kolejnicemi umožňujícími pohyb hrotového měřítka hladiny popsaného v kapitole 6.2.2. Výška stěn je v první části žlabu 1000 mm, v druhé části 500 mm. Začátek žlabu je osazen voštinovým usměrňovačem proudu pro rovnoměrné rozdělení přítoku vody. Na konci hydraulického žlabu je umístěn žaluziový uzávěr sloužící k regulaci hloubky dolní vody. Žlab jako celek je umístěn na vyvýšené podestě. Hydraulický žlab je zachycen na fotografii na obr. 6.1.2.1.



Obr. 6.1.2.1 Pohled na hydraulický žlab

6.1.3 Vestavby mostních objektů

Pro výzkum proudění vody v mostních objektech bylo nutné hydraulický žlab osadit modelem mostního objektu. Mostní objekt byl vyroben z plastu, osazen do žlabu a utěsněn pomocí modelovací hmoty. Délka mostního objektu byla 100 mm a jeho celková šířka shodná se šířkou hydraulického žlabu, tedy 252 mm. Mostní otvor byl široký 130 mm. Celkem byly použity 3 verze mostního objektu lišící se světlou výškou mostního otvoru. Byly použity modely se světlou výškou mostního otvoru 80, 100 a 120 mm. Rozměry (uvedeny v mm) použitých mostních objektů jsou znázorněny v obr. 6.1.3.



Obr. 6.1.3 Náčrtek mostních objektů

6.2 Měřicí zařízení

V rámci provedeného výzkumu byly měřeny pouze dvě veličiny, a to výška úrovně hladiny a průtok hydraulickým modelem. Všechna provedená měření byla provedena manuálně ve Vodohospodářské laboratoři autorkou práce.

6.2.1 Měření úrovně hladiny

Úroveň hladiny byla měřena pomocí posuvného hrotového měřítka. Měřítkem bylo možné pohybovat po i proti směru proudu díky posuvným jezdcům, na nichž bylo umístěno, a které se pohybovaly po kolejnicích osazených na horní hraně bočních stěn hydraulického žlabu. Pohybovat měřítkem bylo možné také v příčném směru. Přesnou polohu měřítka v příčném i podélném směru bylo možné určit také pomocí délkových měřítok.

Svislá poloha hladiny byla měřena pomocí hrotu měřítka, který byl shora spouštěn na vodní hladinu, a následně byla odečtena hodnota na děleném měřítku s přesností 0,1 mm.

Hrotové měřítko pro měření úrovně hladiny ve žlabu je zachyceno na fotografii na obr. 6.2.1.1.



Obr. 6.2.1.1 Hrotové měřítko

6.2.2 Měření průtoku

Pro měření množství vody protékajícího fyzikálním modelem sloužila dvě zařízení – elektrický indukční průtokoměr a měrný Thomsonův přeliv.

Indukční průtokoměr byl vyroben společností Badger Meter Czech Republic s. r. o. typu Magnetoflow Primo. Chyba, která se může vyskytnout při měření tímto zařízením se pohybuje v rozmezí od 0,25 % až 0,50 % pro větší, respektive menší průtoky [1]. Průtokoměr je zachycen na fotografii Obr. 6.2.2.1.



Obr. 6.2.2.1 Elektrický indukční průtokoměr

Druhým zařízením, které bylo používáno pro měření průtoku, byl Thomsonův měrný přeliv. Úroveň hladiny nad měrným přelivem byla měřena pomocí hrotového měřítka, které bylo umístěno v tlumícím skleněném válci. Válec byl spojen s měrnou nádrží a byl tak utvořen systém spojených nádob. Odečtená výška hladiny byla pak pomocí tabulky přepočtena na hodnotu průtoku. Thomsonův měrný přeliv je zachycen na fotografii Obr. 6.2.2.2, hrotové měřítko v tlumícím válci na fotografii Obr. 6.2.2.3.



Obr. 6.2.2.2 Thomsonův měrný přeliv, Obr. 6.2.2.3 Hrotové měřítko v tlumícím válci

Hodnoty průtoků, které byly získány z obou měrných zařízení, byly vzájemně porovnány a kontrolovány. V rámci měření nebyla zjištěna žádná zásadní vzájemná odchylka mezi hodnotami získanými indukčním průtokoměrem a měrným přelivem, která by ovlivňovala následné vyhodnocení naměřených dat.

7. Průběh měření

Tato kapitola je věnována průběhu měření. V rámci této kapitoly jsou popsány měřené scénáře průběhů hladin, rozložení bodů, v nichž byla úroveň hladiny měřena a popis vzniku možných nejistot měření a odchylek.

7.1 Měřené stavy

V rámci fyzikálního modelování bylo změřeno celkem 57 průběhů hladin při různých světlyých výškách mostního objektu, hodnotách průtoku a mírách ovlivnění proudění dolní vodou.

Pro každou variantu mostního objektu byly změřeny průběhy hladin pro 4 hodnoty průtoku, kdy pro každý průtok byly uvažovány 4 varianty míry ovlivnění spodní vodou. Pro každý mostní objekt bylo tedy zprvu provedeno celkem 16 měření průběhu hladin. Na základě prvotního vyhodnocení bylo rozhodnuto o nutnosti doměření několika stavů zejména pro vyšší hodnoty průtoků na vtoku do modelu.

Následkem manipulace se žaluziovým uzávěrem docházelo ke zpětnému vzduť, čímž byla ovlivněna i výška hladiny na čele mostního objektu. Na základě úrovně hladiny na čele mostního objektu byly rozeznávány jednotlivé stavy, resp. míry ovlivnění spodní vodou. V následující tabulce je uvedena klasifikace stavů v závislosti na zatopení horního čela mostovky.

Tab. 7.1 Klasifikace stavů v závislosti na zatopení čela mostu

Označení stavu	Úroveň hladiny nad horním okrajem mostního otvoru – v centimetrech
1	0-1
2	1-2.5
3	2.5-4
4	4-5

Konstrukce modelu mostního objektu měla dostatečně vysoké horní čelo, které by umožňovalo ještě vyšší vystoupaní hladiny vody před mostním objektem. V takových případech však při některých hodnotách průtoků již docházelo k zatopení výtoku z mostního otvoru, což není předmětem této práce. Další aspekt, který byl zohledněn při neměření vyšších stavů, byl ten, že v reálu by k takovým stavům pravděpodobně nedošlo, jelikož reálné mostní konstrukce nedisponují tak vysokými čely a při zvýšení úrovně hladiny by došlo k přelítí celé mostovky.

7.2 Body měření

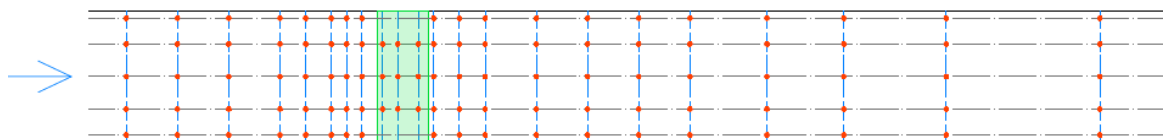
Měření výšky hladiny bylo prováděno v bodech, které byly rozmístěny rovnoměrně v podélném a příčném s uvážením významnosti měřených hodnot. V blízkosti mostního objektu byla síť měřených bodů zhuštěna pro zachycení co možná nejpřesnějšího průběhu hladin.

Ve většině příčných profilů byla měřena úroveň hladiny v celkem 5 bodech, kdy 1 bod byl umístěn v ose proudění, další 2 byly umístěny v jedné a třech čtvrtinách šířky od kraje žlabu a poslední 2 body byly umístěny u kraje žlabu tak, jak na maximum dovolilo hrotové měřítko.

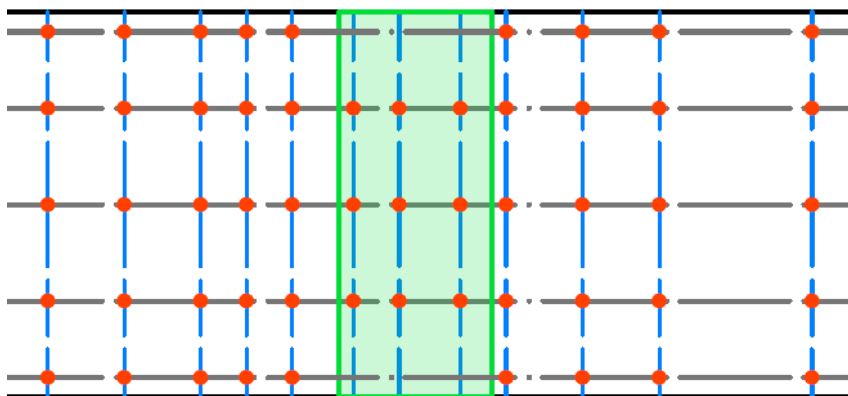
Příčné profily byly mimo mostní objekt od sebe vzdáleny zpravidla 10 cm. V oblasti pod mostním objektem, kdy se hladina přibližovala rovnoměrnému proudění, byla vzdálenost příčných profilů větší, a to 15 až 20 cm. Naopak v okolí mostního objektu, tzn. těsně před a těsně za objektem, byly příčné profily umístěny blíže u sebe. Vzdálenost sousedních příčných profilů se pohybovala v rozmezí 3 až 5 cm.

Vzhledem k charakteru a tvaru mostní konstrukce byly ve 3 příčných profilech, které se nacházely přímo v mostním objektu, měřeny výšky hladiny ve 3 bodech, a to v ose proudění a v jedné a třech čtvrtinách šířky od kraje žlabu. Krajní měřicí body byly vynechány, jelikož v jejich místech nedocházelo k proudění vody.

Rozmístění bodů v okolí mostního objektu, kde byla měřena výška hladiny, je zobrazen na obr. 7.2.1. Výsek rozmístění měřících bodů v okolí mostního objektu je zobrazen na obr. 7.2.2. Modrou barvou jsou znázorněny polohy příčných profilů, šedou barvou pozice hrotového měřítka v rámci příčných profilů, zelenou barvou je znázorněno umístění mostního objektu a červenou barvou jsou znázorněny měřicí body.



Obr. 7.2.1 Rozmístění měřících bodů v měrném žlabu



Obr. 7.2.2 Výsek rozmístění měřicích bodů v okolí mostního objektu

Kombinace hodnot naměřené hladiny a průtoku, který proudil modelem, byla vstupními daty k vyhodnocení, které je popsáno v kapitole 8.

7.3 Nejistoty a možné chyby měření

V rámci měření byl kladen důraz na přesnost a bezchybnost měření, nicméně i přesto je každé měření provedeno s určitou nejistotou a možností chyby.

Chyba je definována jako rozdíl mezi reálnou hodnotou a hodnotou měřenou. Nejistota je vyjádření pochybnosti o naměřené hodnotě. Hodnota nejistoty je důležitým parametrem například pro kalibraci měřicích přístrojů nebo pro ověřování předpokladů, resp. určování tolerance odchylky.

Při měření může být nejistota způsobena několika faktory. Prvním faktorem, který může způsobit, popř. zvýšit nejistotu měření, je měřicí přístroj. Přístroj sám o sobě může způsobovat odchylku od reálné hodnoty. Na vině může být například nečitelnost měřítka, stáří přístroje či nesprávná kalibrace přístroje apod. V této práci je možná nejistota měřicího přístroje způsobena průtokoměrem a hrotovým měřítkem hladiny.

V rámci uzavřeného hydraulického okruhu může docházet ke kolísání čerpaného množství vody následkem změny dopravní výšky čerpadla díky změnám úrovně hladiny v dolní nádrži. Průtok v tomto případě může lehce kolísat.

Při měření úrovně hladiny může dojít k nepřesnému odhadu správného okamžiku, kdy se hrot měřítka dotkne vodní hladiny. Nejistota tohoto typu vzrůstá s rozkolísaností hladiny, kdy je obtížnější správný okamžik určit. S tímto úzce souvisí i

nejistota, popř. chyba, která vzniká v závislosti na dovednostech osoby, která měření provádí. V rámci této práce byla měření prováděna pouze autorkou, čímž by tato nejistota měla být značně redukována.

Odchytky mohou vznikat i v návaznosti na fyzikální podmínky okolí modelu jako je např. teplota, vlhkost a tlak vzduchu. Měření probíhalo v období, kdy nedocházelo k výkyvům počasí a tím i prostředí ve vodohospodářské hale a je tedy možné nejistotu způsobenou okolními podmínkami zanedbat.

8. Analýza a vyhodnocení naměřených dat

V rámci měření na fyzikálním modelu ve Vodohospodářské laboratoři byly naměřeny hodnoty výšky vodní hladiny v měřicích bodech při daném průtoku a míře ovlivnění dolní vodou.

Prvním krokem bylo přepočtení naměřených hodnot úrovní hladin na reálné hodnoty úrovní hladin odečtením úrovně dna žlabu, která byla naměřena v několika bodech a následně uvažována jako průměr těchto hodnot.

8.1 Střední hodnota úrovně hladiny

Hodnoty úrovní hladiny byly v rámci příčného profilu linearizovány a přepočteny na střední hodnotu úrovně hladiny pomocí váženého průměru.

V rámci měření v některých případech docházelo k vytváření příčných vln typických pro bystřinný režim proudění. Příčné vlny vznikaly při nízké úrovni hladiny proudící vody v úseku pod mostním objektem a vyšší rychlosti proudění. Konkrétní příklad vzniku příčných vln je zachycen na fotografii v obr 8.1.1.



Obr. 8.1.1 Vznik příčných vln

Vznik příčných vln byl jedním z důvodů zavedení střední hloubky úrovně hladiny.

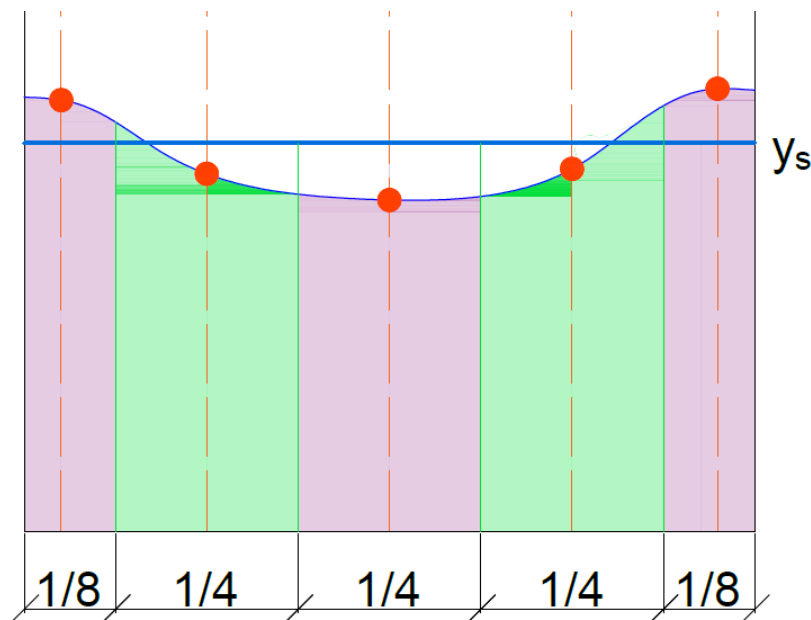
Uvážením váženého průměru naměřených hodnot byla přisouzena větší váha hladině v ose měrného žlabu a v jedné a třech čtvrtinách šířky žlabu. Krajiní hodnoty byly uvažovány s poloviční vahou než ostatní hodnoty kvůli faktu, že reprezentují

menší plochu, jež je omezena krajem měrného žlabu. Hodnota střední hloubky byla tedy získána pomocí následujícího vztahu.

$$y_s = \frac{y_{kraj1}}{8} + \frac{y_{1/4}}{4} + \frac{y_{osa}}{4} + \frac{y_{3/4}}{4} + \frac{y_{kraj2}}{8} \quad (8.1.1)$$

- $y_{kraj1,2}$ [m] úroveň hladiny u krajů měrného žlabu
 $y_{1/4,3/4}$ [m] úroveň hladiny v jedné, resp. třech čtvrtinách šířky měrného žlabu
 y_{osa} [m] úroveň hladiny v ose měrného žlabu
 y_s [m] střední hodnota úrovně hladiny

Náčrt průtočných ploch připadajících na dané naměřené hloubky pro profily mimo mostní objekt je uveden v obr. 8.1.2.

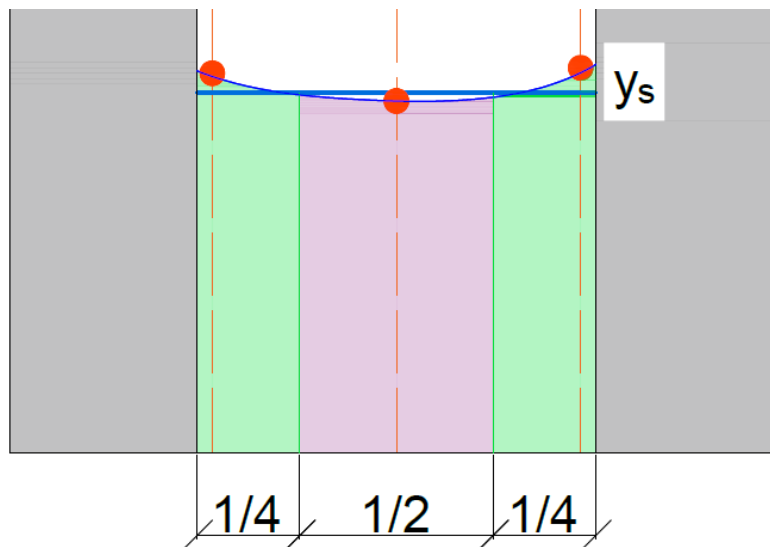


Obr. 8.1.2 Schéma pro výpočet střední hloubky mimo mostní objekt

Ve třech profilech, které se nacházely v mostním objektu, byla střední hloubka vypočítána ze tří hodnot naměřené úrovně hladiny opět dle váženého průměru. Výpočet střední úrovně hladiny v mostním profilu byl proveden dle následujícího vztahu.

$$y_s = \frac{y_{1/4}}{4} + \frac{y_{osa}}{2} + \frac{y_{3/4}}{4} \quad (8.1.2)$$

Náčrt průtočných ploch připadajících na dané naměřené hloubky pro profily v mostním objektu je uveden v obr. 8.1.3.



Obr. 8.1.3 Schéma pro výpočet střední hloubky v mostním objektu

8.2 Vyloučení některých měření

Dalším krokem bylo vyloučení sad měření při stavech, kdy došlo k zatopení výtoku z mostního objektu. V případě, že minimální hodnota střední úrovně hladiny byla vyšší než světlá výška otvoru v mostním objektu, bylo uvažováno zatopení výtoku z mostního objektu. Uvažovanou podmínku zatopeného výtoku je tedy možné definovat následovně.

$$y_{s,min} > a \rightarrow \text{ZATOPENÝ VÝTOK} \quad (8.2.1)$$

a [m] světlá výška mostního otvoru

Výzkum proudění vody mostním objektem se zatopeným výtokem není předmětem této práce. Stavby, při kterých k zatopení výtoku došlo, nebyly dále uvažovány.

8.3 Zavedení boční kontrakce

Pro co nejlepší zohlednění reálného charakteru proudění ve výpočtech a následných analýzách měření bylo zapotřebí započítat kontrakce vodního proudu způsobené mostní konstrukcí.

Boční kontrakce proudu jsou způsobené překážkou v proudění vody, v tomto případě samotnou mostní konstrukcí. Působením konstrukce proti proudu vody dochází k zúžení jejího proudu. Příčný rozměr mostního otvoru tedy musí být redukován, jelikož

není plně využit po celé své šířce. Míra redukce je dána zejména tvarem překážky, která na proud vody působí. Při plynulejším zakřivení mostního objektu či mostních pilířů dochází k menší redukci šířky, a tedy menším místním ztrátám než při ostřejších tvarech konstrukcí.

V rámci této práce byla uvažována největší místní ztráta v druhém profilu za čelem mostovky. V prvním profilu přímo za čelem mostovky byl uvažován fakt, že boční kontrakce ještě nebude plně rozvinuta. Ve třetím profilu za čelem mostního objektu byla uvažována redukce bočních kontrakcí. V profilu těsně pod mostním objektem byla uvažována účinná šířka shodná se šířkou mostního otvoru, tj. 130 mm.

Výchozí vztah pro stanovení účinné šířky proudu je zapsán v rovnici 8.3.1[4].

$$b_0 = b - 0.1 \sum \xi \cdot h_0 \quad (8.3.1)$$

b_0 [m]	účinná šířka proudu
b [m]	šířka mostního otvoru
h_0 [m]	úroveň hladiny
ξ [-]	součinitel zúžení

Pro stanovení účinné šířky proudění v profilech v mostním objektu byl vztah upraven na následující tvar.

$$b_0 = b - 0.1 \cdot 2 \cdot \xi \cdot y_s \quad (8.3.2)$$

y_s [m]	střední hloubka proudění
-----------	--------------------------

V případě prvního a třetího příčného profilu za čelem mostu byl součinitel zúžení uvažován roven 0.50, pro druhý příčný profil za čelem mostu 1.5. Pro výpočet účinné šířky byl použit dvojnásobek součinu koeficientu zúžení a střední hloubky proudění z důvodů vzniku bočních kontrakcí na obou krajích mostního otvoru.

Uvažovaná boční kontrakce byla v rámci této práce porovnána s výsledkem 3D modelu. Tímto tématem se zabývá kapitola 9.

8.4 Postupné rozšíření proudu pod mostním objektem

Vzhledem k faktu, že šířka mostního otvoru byla menší než šířka měrného žlabu, potenciálního říčního koryta, došlo ke kontrakci vodního proudu v profilech mostního otvoru. Při výtoku z mostního otvoru však voda nekopíruje přímo mostní konstrukci, ale

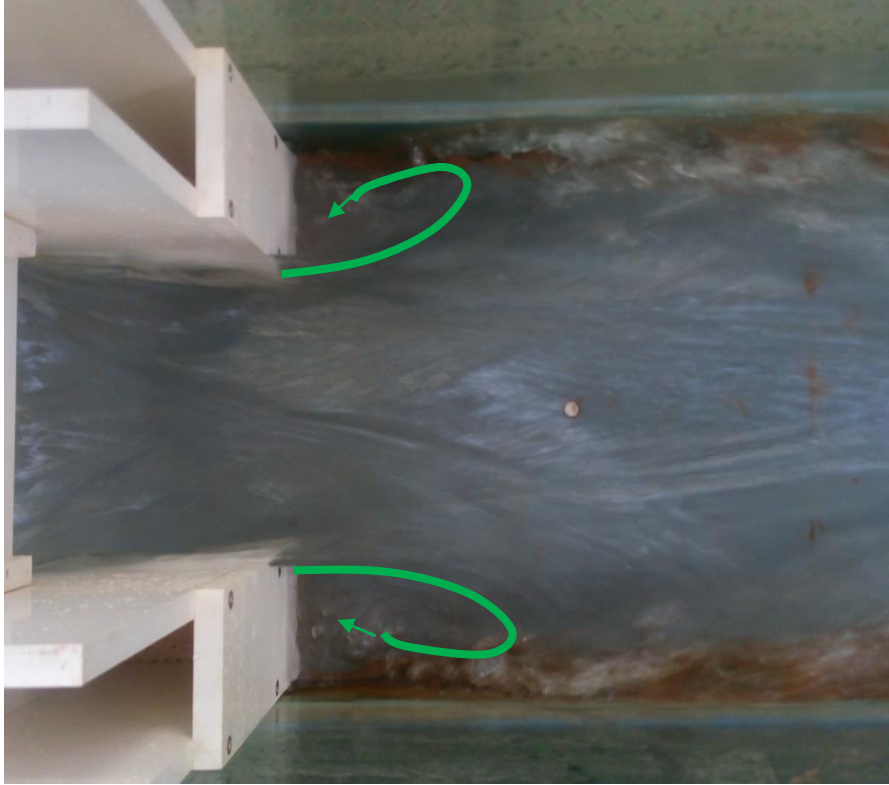
dochází k postupnému rozšiřování vodního proudu až ke stavu, kdy je vodní proud rovnoměrný v rámci celé šířky měrného žlabu.

V příčném profilu těsně pod mostním objektem byla uvažována šířka proudu rovna šířce mostního otvoru. Šířka proudu byla v dalších profilech postupně přibližována k hodnotě šířky měrného žlabu na základě inženýrského odhadu charakteru proudění.

Těsně pod mostním objektem docházelo ke vzniku bočních úplavů. Konkrétní příklad je zachycen na fotografii v obr. 8.4.1. Detail vznikajících úplavů za mostním objektem je zachycen v obr. 8.4.2.



Obr. 8.4.1 Postupné rozšiřování proudu za mostním objektem



Obr. 8.4.2 Detail vznikajících úplavů pod mostním objektem

8.5 Průtočná plocha a rychlost proudění

V rámci výpočtů byla průtočná plocha uvažována jako součin účinné šířky proudu a střední úrovně hladiny. Vzájemný vztah těchto veličin je zapsán v rovnici 8.5.1.

$$S = y_s \cdot b_0 \quad (8.5.1)$$

Rychlost proudění byla určena ze zjednodušeného tvaru rovnice kontinuity jako podíl průtoku a průtočné plochy. Tento vztah je zapsán v rovnici 8.5.2.

$$v = \frac{Q}{S} \quad (8.5.2)$$

8.6 Energetická výška

Energetická výška E (měrná energie průřezu) vyjadřuje množství mechanické energie příslušící jednotce tíhy průtoku daným průřezem. Hodnota je vztažena k úrovni nejnižšího bodu tohoto průřezu (dna koryta)[7].

Pomocí energetické výšky průřezu lze vyjádřit nejrůznější vzájemné kombinace rychlosti proudění a hloubky proudění v otevřeném korytě, v tomto případě v měrném žlabu[5].

Pro každý příčný profil byla určena hodnota energetické výšky dle vztahu uvedeného v rovnici 8.6.1[5].

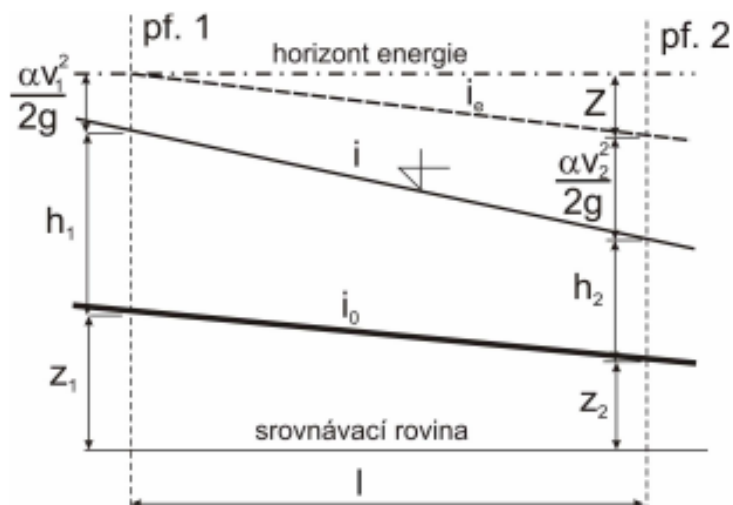
$$E = y_s + \frac{\alpha v^2}{2g} \quad (8.6.1)$$

y_s [m]	střední hloubka proudění
v [m/s]	rychlost proudění
g [m/s ²]	gravitační zrychlení
α [-]	Coriolisovo číslo

Uvedený vztah v rovnici 8.6.1 vychází ze základní hydraulické rovnice – Bernoulliho rovnice, která vyjadřuje zákon zachování energie. Mezi dvěma příčnými profily musí být tento zákon zachován[6].

Při proudění vody dochází ke ztrátě její energie, tedy poklesu energetické výšky směrem po proudu. Ztráty, ke kterým dochází, lze vyjádřit jako ztrátovou výšku. Ztrátová výška je součtem třecí ztrátové výšky a ztrátové výšky způsobené místními ztrátami. Nárůst místních ztrát je způsoben zejména změnou průřezu, v tomto případě mostní konstrukcí, kde dochází k náhlému zúžení průtočného profilu[6][15].

Schéma výpočtových veličin mezi dvěma profily je znázorněno v obr. 8.6.1[15].



Obr. 8.6.1 Schéma výpočtových veličin mezi sousedními příčnými profily[15]

Vzájemný vztah jednotlivých veličin lze zapsat pomocí rovnice 8.6.2[15].

$$z_1 + h_1 + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + h_2 + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + Z \quad (8.6.2)$$

8.7 Volný výtok a výpočet průtokového koeficientu C_D

Průtokové množství, které protéká mostní konstrukcí při volném výtoku, si lze představit jako případ proudění pod stavidlovým uzávěrem, který v tomto případě představuje čelo mostovky.

Výtokové množství lze vypočítat pomocí vztahu uvedeného v rovnici 8.7.1[8][11].

$$Q = C_D ab \sqrt{2g(E_h - y_c)} \quad (8.7.1)$$

y_c [m]	zúžená hloubka proudění
a [m]	světlá výška mostního otvoru
b [m]	šířka mostního objektu
E_h [m]	energetická výška v profilu před mostní konstrukcí
C_D [-]	průtokový koeficient

Z rovnice 8.7.1 byl vyjádřen vztah pro výpočet průtokového koeficientu, který je předmětem této práce. Hodnoty průtokového množství, které modelem protékalo během měření, byly známy. Vztah pro výpočet součinitele průtoku je uveden v rovnici 8.7.2.

$$C_D = \frac{Q}{ab \sqrt{2g(E_h - y_c)}} \quad (8.7.2)$$

8.8 Součinitel kontrakce C_C a rychlostní součinitel φ

Při proudění vody mostním otvorem, popř. pod stavidlem, dochází k vertikálnímu zúžení vodního proudu. Míru tohoto zúžení lze vyjádřit součinitelem kontrakce C_C . Zúžená hloubka proudění y_c je pak dána součinem koeficientu kontrakce a světlé výšky mostního otvoru[8].

Vzhledem k tomu, že hodnota zúžené hloubky proudění y_c byla získána měřením a světlá výška mostního otvoru a je také známá, je možné koeficient kontrakce vypočítat dle vztahu, který je uveden v rovnici 8.8.1. Obvykle nabývá hodnot od 0.6 do 1.0.

$$C_C = \frac{y_c}{a} \quad (8.8.1)$$

Rychlostní součinitel φ vyjadřuje poměr mezi průtokovým součinitelem C_D a součinitelem kontrakce C_C [8]. Výpočetní vztah je uveden v rovnici 8.8.2. Obvyklé hodnoty se pohybují v rozmezí 0.7-1.0.

$$\varphi = \frac{C_D}{C_C} \quad (8.8.2)$$

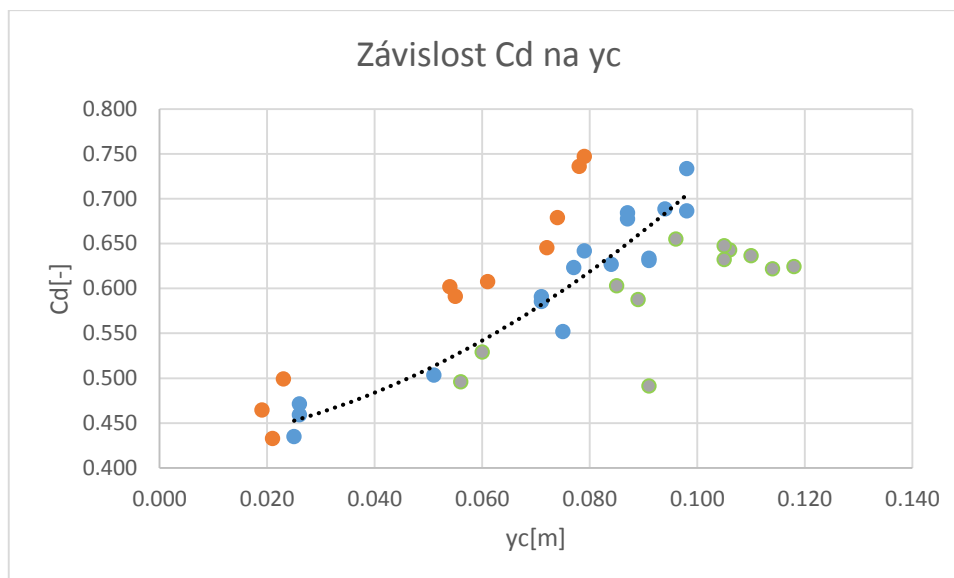
8.9 Vyhodnocení průtokového koeficientu C_D

Pro každou měřenou kombinaci průtoku, který vtékal do modelu, a míry ovlivnění dolní vodou, bylo provedeno vyhodnocení, které je popsáno ve výše uvedených odstavcích. Celkem bylo získáno 39 hodnot průtokového součinitele. Byla sledována závislost hodnoty průtokového součinitele na ostatních charakteristikách, jako například poměru hloubky proudění před mostním objektem k světlé výšce mostního otvoru apod.

Průměrná hodnota průtokového koeficientu, která vyšla z uvažovaných měření, je 0.600. Konkrétní hodnoty pro různé kombinace vstupních parametrů fluktuují kolem průměrné hodnoty. Výběrová směrodatná odchylka řady průtokových součinitelů nabývá hodnoty 0.08439. Rozptyl dosahuje hodnoty 0.00694.

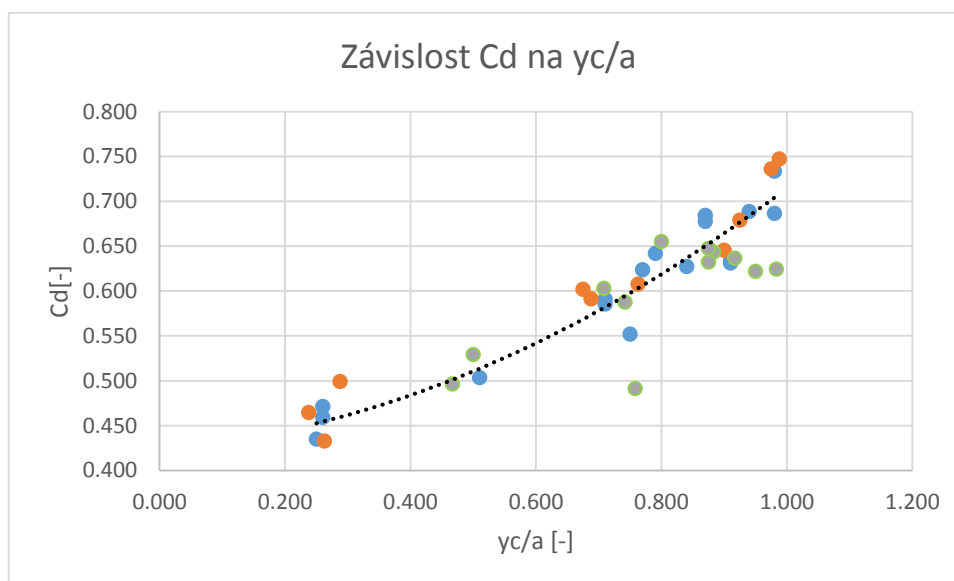
Po analýze závislosti hodnoty průtokového součinitele na dalších charakteristikách proudění vody v modelu byl zhodnocen vliv jednotlivých veličin a parametrů na hodnotu koeficientu průtoku. Nejvýznamnější vliv na výslednou hodnotu součinitele průtoku má hodnota zúžené hloubky proudění y_c . V kombinaci s dalšími měřeními či dopočtenými hodnotami, jako například energetickou výškou v profilu nad mostním objektem (E_h), na konci měrného žlabu (E_d) nebo světlu výškou mostního otvoru ovlivňují hodnotu průtokového koeficientu různým způsobem.

Graficky jsou závislosti zobrazeny v obr. 8.9.1-8.9.6. Barevně jsou odlišena měření na různých variantách mostní konstrukce, resp. světlé výšky mostního otvoru. Oranžovou barvou jsou znázorněna měření na konstrukci se světlu výškou otvoru 8 cm, modrou 10 cm a zelenou 12 cm. Přerušovanou čarou je v grafu znázorněn trend vzájemné závislosti hodnot.



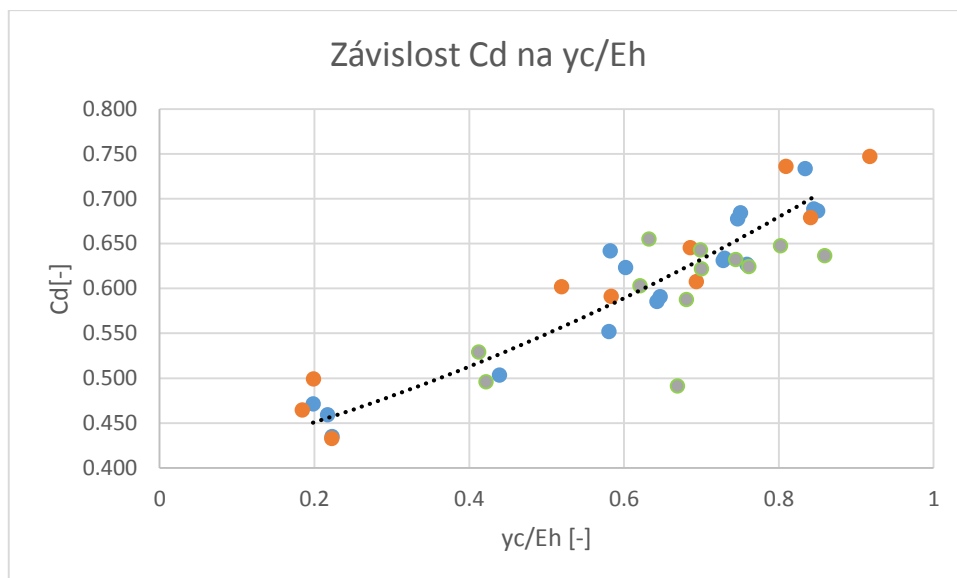
Obr.8.9.1 Závislost průtokového koeficientu na zúžené hloubce proudění

Zúžená hloubka proudění se mění v závislosti na světlé výšce mostního otvoru, kterou je limitována. V závislosti na zúžené hloubce dochází ke změně hodnoty průtokového koeficientu. S větší zúženou hloubkou proudění stoupá hodnota součinitele průtoku.



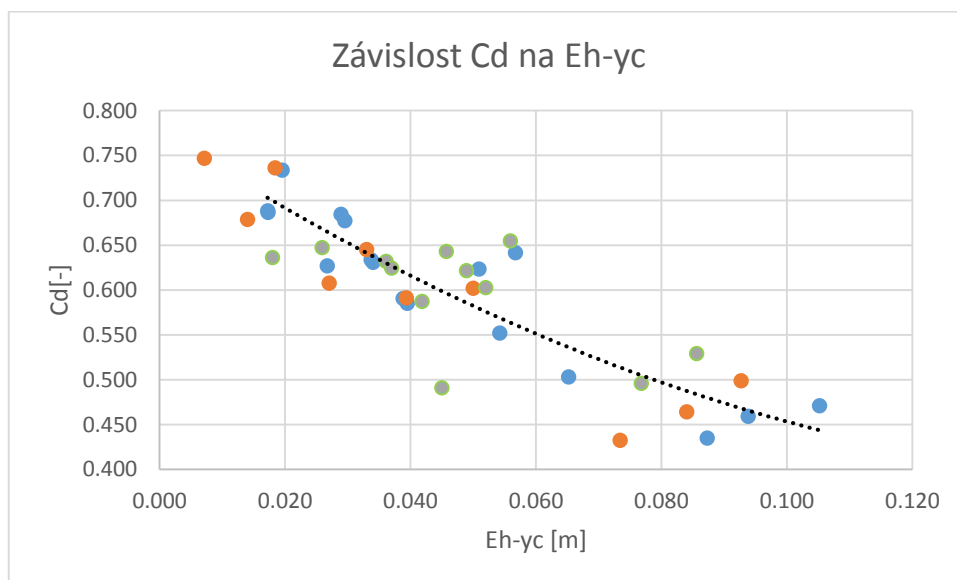
Obr.8.9.2 Závislost průtokového koeficientu na poměru zúžené hloubky proudění a světlé výšky mostního otvoru

V případě zavedení poměru zúžené hloubky proudění a světlé výšky mostního otvoru dojde k promísení dat, které byly naměřeny na jednotlivých mostních typech. Se zvýšením hodnoty podílu zúžené hloubky proudění a světlé výšky mostního otvoru dojde k nárůstu hodnot průtokového součinitele.



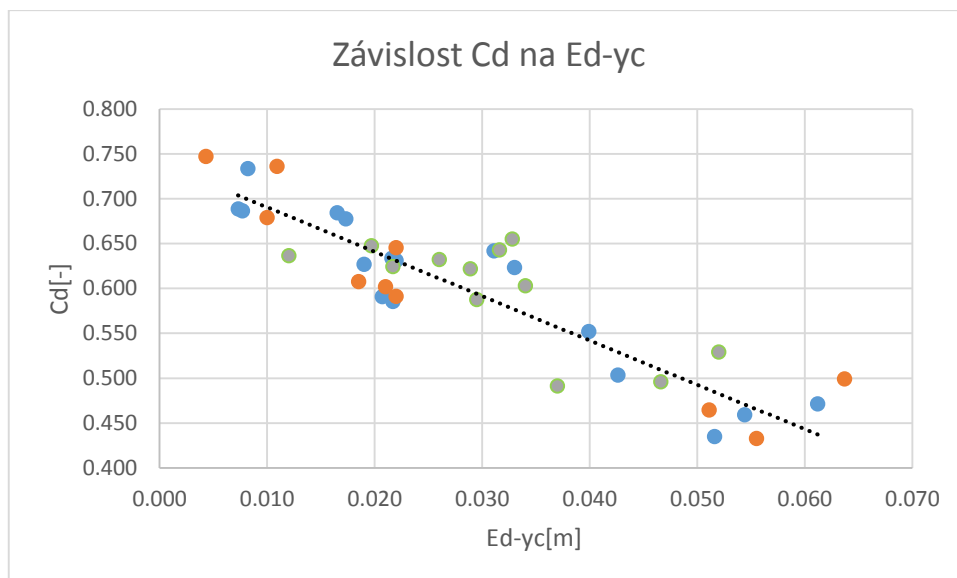
Obr.8.9.3 Závislost průtokového koeficientu na poměru zúžené hloubky proudění a energetické výšky před mostní konstrukcí

Při analýze závislosti průtokového součinitele na poměru zúžené hloubky proudění a energetické výšky v profilu nad mostním objektem je zřejmé, že v případě nárůstu hodnoty poměru zúžené hloubky a energetické výšky v horním profilu dojde ke zvýšení hodnoty průtokového koeficientu.



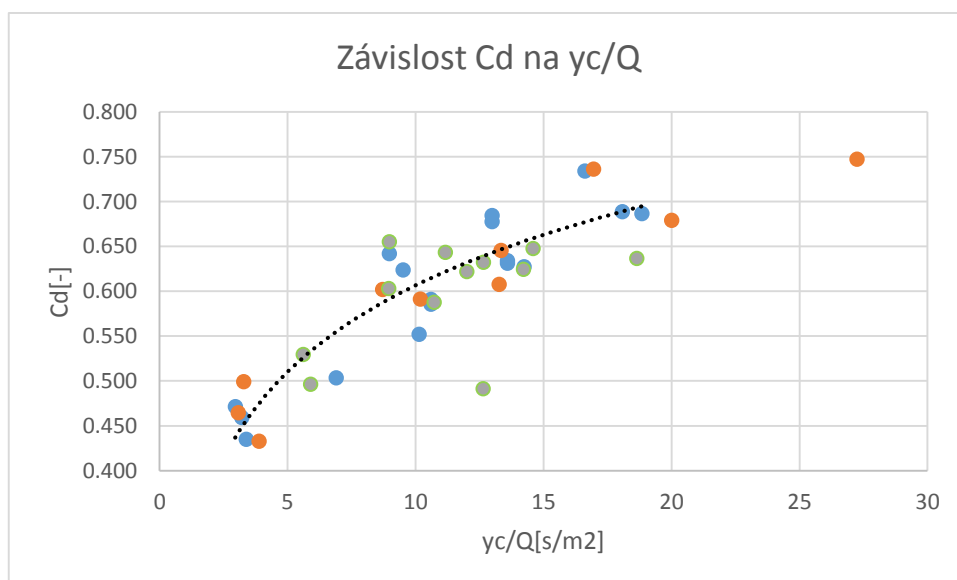
Obr.8.9.4 Závislost průtokového koeficientu na rozdílu energetické výšky před mostní konstrukcí a zúžené hloubky proudění

Z vynesení závislosti průtokového součinitele na rozdílu energetické výšky v profilu před mostní konstrukcí a zúžené hloubky proudění vyplývá, že se vzrůstající hodnotou daného rozdílu dochází ke snížení hodnoty koeficientu průtoku.



Obr.8.9.5 Závislost průtokového koeficientu na rozdílu energetické výšky na konci měrného žlabu a zúžené hloubky proudění

Po analýze závislosti hodnot průtokového součinitele na rozdílu energetické výšky pod mostní konstrukcí na konci měrného žlabu a zúžené hloubky proudění vody je zřejmá podobnost s předchozím vzájemným vztahem (obr. 8.9.4). S nárůstem rozdílu dané energetické výšky a zúžené hloubky proudění dochází k poklesu hodnot koeficientu průtoku.



Obr.8.9.6 Závislost průtokového koeficientu na poměru zúžené hloubky proudění a průtoku

Z analýzy závislosti hodnot průtokového součinitele na poměru zúžené hloubky proudění a množství vody, které protékalo modelem, vyplývá fakt, že průtokový koeficient narůstá s rostoucí hodnotou poměru zúžené hloubky proudění a průtoku.

Hodnoty průtokových množství, zúžených hloubek proudění, koeficientu průtoku, kontrakce a rychlosti jsou tabelárně uvedeny v tab. 8.9.1.

Tab. 8.9.1 Tabelární přehled výsledných hodnot koeficientů

a	Q	y_c	C_D	C_c	φ
[m]	[l/s]	[m]	[-]	[-]	[-]
0.10	7.4	0.025	0.435	0.250	0.713
0.10	7.4	0.051	0.503	0.510	0.825
0.10	7.4	0.075	0.552	0.750	0.736
0.10	5.2	0.094	0.689	0.940	0.733
0.10	5.2	0.098	0.687	0.980	0.701
0.10	5.9	0.084	0.627	0.840	0.746
0.10	5.9	0.098	0.734	0.980	0.749
0.10	6.7	0.071	0.591	0.710	0.832
0.10	6.7	0.087	0.684	0.870	0.787
0.10	6.7	0.091	0.634	0.910	0.697
0.10	8.1	0.026	0.459	0.260	0.753
0.10	8.1	0.077	0.623	0.770	0.810
0.10	8.8	0.026	0.471	0.260	0.772
0.10	8.8	0.079	0.642	0.790	0.812
0.10	6.7	0.071	0.585	0.710	0.825
0.10	6.7	0.087	0.677	0.870	0.779
0.10	6.7	0.091	0.631	0.910	0.693
0.12	9.5	0.056	0.496	0.467	0.813
0.12	9.5	0.085	0.603	0.708	0.851
0.12	9.5	0.106	0.643	0.883	0.728
0.12	9.5	0.114	0.622	0.950	0.654
0.12	5.9	0.110	0.636	0.917	0.694
0.12	7.2	0.105	0.647	0.875	0.740
0.12	7.2	0.091	0.491	0.758	0.648
0.12	8.3	0.089	0.588	0.742	0.792
0.12	8.3	0.105	0.632	0.875	0.723
0.12	8.3	0.118	0.624	0.983	0.635
0.12	10.7	0.060	0.529	0.500	0.868
0.12	10.7	0.096	0.655	0.800	0.819
0.08	5.4	0.021	0.433	0.263	0.709
0.08	5.4	0.055	0.591	0.688	0.860
0.08	5.4	0.072	0.645	0.900	0.717
0.08	2.9	0.079	0.747	0.988	0.757
0.08	3.7	0.074	0.679	0.925	0.734
0.08	4.6	0.061	0.608	0.763	0.797
0.08	4.6	0.078	0.736	0.975	0.755
0.08	6.2	0.019	0.464	0.238	0.761
0.08	6.2	0.054	0.602	0.675	0.892
0.08	7.0	0.023	0.499	0.288	0.818

8.10 Porovnání hodnot C_D z fyzikálního výzkumu s různými autory

Hodnoty průtokového koeficientu C_D , které byly získány v rámci fyzikálního výzkumu, který byl proveden v rámci této práce, byly porovnány s hodnotami součinitelů průtoku, které uvádějí uznávaní autoři a odborná literatura.

Výtok pod stavidlem

Prvním případem, s jehož hodnotami byly výsledky fyzikálního výzkumu porovnávány, byl výpočet volného výtoku pod stavidlem. V rámci výukových materiálů pro posluchače a studenty předmětu Hydraulika 3 v rámci magisterského studia byl používán graf pro odečtení hodnot průtokového koeficientu. Graf vzájemných závislostí koeficientů při výpočtu výtoku pod stavidlem je znázorněn v obr. 4.3.2[14].

Při porovnání hodnot vycházející z výše zmíněného grafu a z fyzikálního výzkumu, který byl proveden v rámci této práce, je zřejmé, že hodnoty rychlostního součinitele φ , které byly získány na základě vyhodnocení fyzikálního výzkumu v rámci této práce, jsou výrazně nižší než hodnoty uvedené v grafu, resp. křivka v grafu již není protažena do oblasti, kde byl prováděn výzkum, tj. poměr y_0/a přibližující se jedné.

V případě koeficientu kontrakce byly hodnoty porovnány s křivkou grafu, kde byla uvažována shoda v případě, že získaný koeficient nabývá vyšších hodnot než 0.62. Úspěšnost splnění tohoto kritéria je zřejmá z tab. 8.10.1. Uvažované kritérium splňuje 49 % hodnot, které byly získány z fyzikálního výzkumu.

Shoda koeficientu průtoku byla vyhodnocena obdobně jako koeficient kontrakce. Shoda byla uvažována v případě, že se hodnota z fyzikálního výzkumu pohybuje v intervalu od 0.57 do 0.65. Průměrná hodnota součinitele průtoku získaná z fyzikálního modelování nabývá hodnoty 0.60, což lze považovat za podobné výchozímu grafu. Úspěšnost splnění kritéria shody pro koeficient průtoku je zřejmá z tab. 8.10.1. Uvažované kritérium splňuje 77 % hodnot, které byly získány z fyzikálního výzkumu.

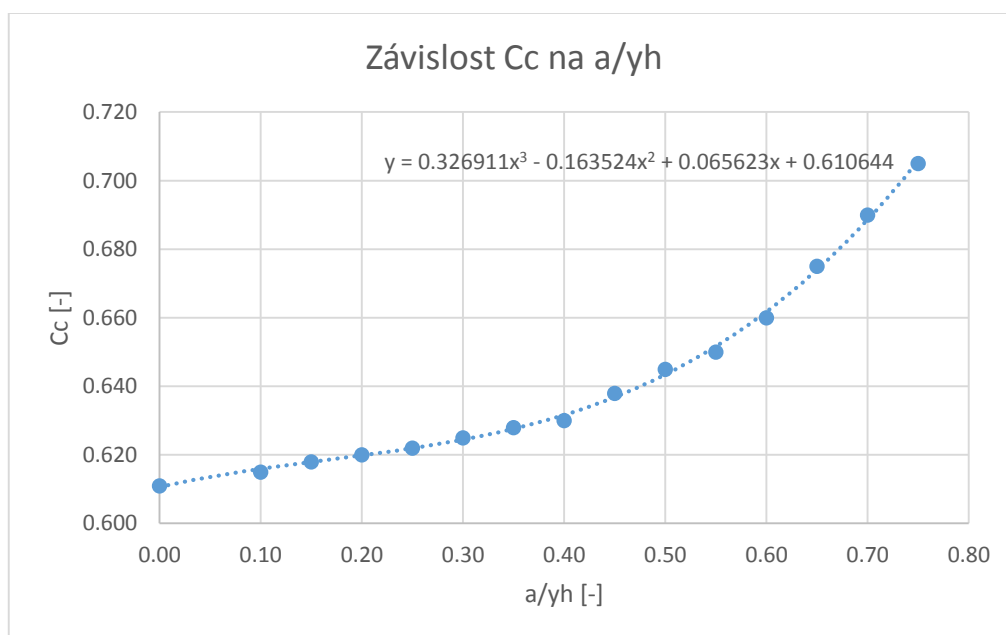
Tab. 8.10.1 Úspěšnost kritérií shody pro koeficienty průtoku a kontrakce

C_D	C_D	C_c	C_c
Fyzikální výzkum	Graf	Fyzikální výzkum	Graf
0.435	MIMO	0.250	MIMO
0.503	MIMO	0.510	MIMO
0.552	MIMO	0.750	OK
0.689	MIMO	0.940	OK
0.687	MIMO	0.980	OK
0.627	OK	0.840	OK
0.734	MIMO	0.980	OK
0.591	OK	0.710	OK
0.684	MIMO	0.870	OK
0.634	OK	0.910	OK
0.459	MIMO	0.260	MIMO
0.623	OK	0.770	OK
0.471	MIMO	0.260	MIMO
0.642	OK	0.790	OK
0.585	OK	0.710	OK
0.677	MIMO	0.870	OK
0.631	OK	0.910	OK
0.496	MIMO	0.467	MIMO
0.603	OK	0.708	OK
0.643	OK	0.883	OK
0.622	OK	0.950	OK
0.636	OK	0.917	OK
0.647	OK	0.875	OK
0.491	MIMO	0.758	OK
0.588	OK	0.742	OK
0.632	OK	0.875	OK
0.624	OK	0.983	OK
0.529	MIMO	0.500	MIMO
0.655	MIMO	0.800	OK
0.433	MIMO	0.263	MIMO
0.591	OK	0.688	OK
0.645	OK	0.900	OK
0.747	MIMO	0.988	OK
0.679	MIMO	0.925	OK
0.608	OK	0.763	OK
0.736	MIMO	0.975	OK
0.464	MIMO	0.238	MIMO
0.602	OK	0.675	OK
0.499	MIMO	0.288	MIMO

Mattas

Dalším autorem, s jehož hodnotami byly výsledky fyzikálního výzkumu porovnávány, byl Ing. Daniel Mattas, CSc. Autor ve své publikaci tabelárně uvádí hodnoty součinitele kontrakce v závislosti na poměru světlé výšky otvoru a hloubky proudění před mostním profilem[9].

Vzhledem k faktu, že při fyzikálním výzkumu byla geometrie žlabu použita taková, že hodnoty poměru světlé výšky mostního otvoru a hloubky proudění v profilu před mostem dosahovaly zpravidla vyšších hodnot, než uvádí Mattas ve své publikaci, byly tabelární hodnoty vyneseny do grafu a proloženy vhodnou křivkou, která nejvíce odpovídala dané závislosti. Grafické znázornění hodnot součinitele kontrakce v závislosti na poměru světlé výšky mostního otvoru a hloubky proudění před mostním objektem dle Mattase, které jsou proloženy vhodnou křivkou, je uvedeno v obr. 8.10.2.



Obr. 8.10.2 Závislost součinitele kontrakce na poměru světlé výšky mostního otvoru a hloubky proudění před mostním profilem

Z výše uvedeného grafu byla použita rovnice křivky, kterou byly body proloženy. Dle přepisu křivky byly stanoveny hodnoty součinitele kontrakce v závislosti na poměru světlé výšky mostního otvoru a hloubky proudění před mostním objektem, který byl naměřen na fyzikálním modelu. Tyto hodnoty byly porovnány s hodnotami, které byly získány vyhodnocením měření z fyzikálního modelu, jehož postup je uveden

v kapitole 8.8. Porovnání hodnot je tabelárně uvedeno spolu se vzájemnou procentuální odchylkou v tab. 8.10.2.

Tab. 8.10.2 Porovnání hodnot součinitele kontrakce dle fyzikálního výzkumu a Mattase

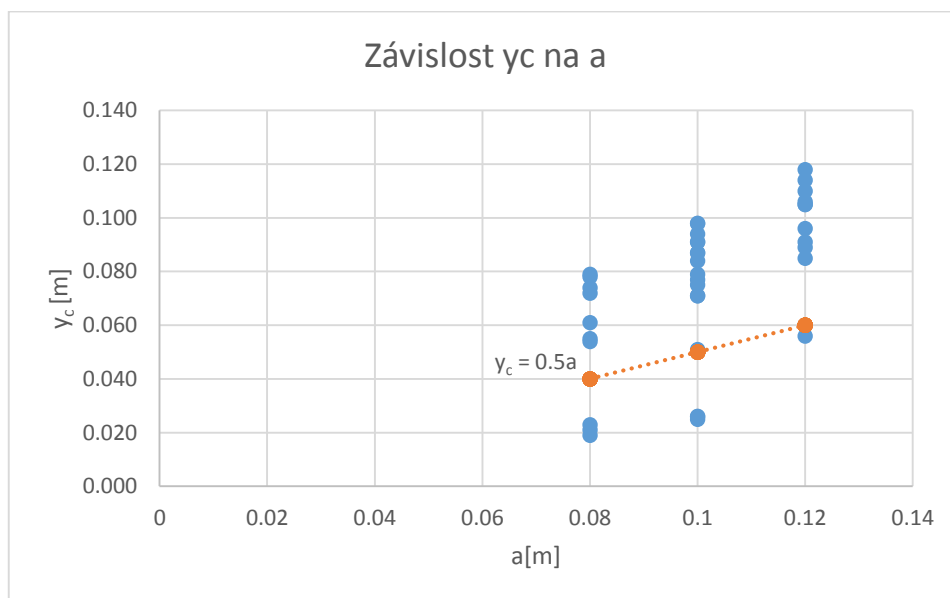
a/yh	C _c		% odchylka
	Fyzikální výzkum	Rovnice dle Mattase	
0.917	0.435	0.786	44.6
0.885	0.503	0.767	34.4
0.794	0.552	0.723	23.7
0.917	0.689	0.786	12.4
0.877	0.687	0.763	10.0
0.926	0.627	0.791	20.7
0.870	0.734	0.759	3.3
0.935	0.591	0.796	25.8
0.877	0.684	0.763	10.3
0.813	0.634	0.732	13.4
0.862	0.459	0.755	39.2
0.800	0.623	0.726	14.1
0.787	0.471	0.721	34.6
0.758	0.642	0.709	9.4
0.935	0.585	0.796	26.5
0.877	0.677	0.763	11.2
0.813	0.631	0.732	13.7
0.938	0.496	0.798	37.8
0.902	0.603	0.777	22.4
0.811	0.643	0.731	12.0
0.750	0.622	0.706	11.9
0.952	0.636	0.807	21.2
0.938	0.647	0.798	18.8
0.882	0.491	0.766	35.9
0.945	0.588	0.802	26.8
0.870	0.632	0.759	16.7
0.784	0.624	0.719	13.2
0.851	0.529	0.750	29.4
0.811	0.655	0.731	10.4
0.870	0.433	0.759	43.0
0.870	0.591	0.759	22.1
0.777	0.645	0.716	9.9
0.941	0.747	0.800	6.6
0.920	0.679	0.787	13.7
0.930	0.608	0.793	23.4
0.842	0.736	0.745	1.2
0.800	0.464	0.726	36.0
0.792	0.602	0.722	16.7
0.708	0.499	0.691	27.8

Po porovnání byla v případě 13% hodnot vzájemná odchylka menší než 10%, nadpoloviční většina hodnot (52 %) vykazovala odchylku hodnot menší než 20%. Vzájemná neshoda hodnot může být způsobena například proložením Mattasových hodnot křivkou, která při extrapolaci dat nemusí být zcela vhodná a přesně odpovídat vývoji hodnot kontrakčního koeficientu při vyšší hodnotě poměru světlé výšky mostního otvoru a hloubky proudění v profilu před mostním objektem.

8.11 Rovnice pro výpočet průtoků v programu HEC-RAS

V rámci vyhodnocení naměřených hodnot v rámci fyzikálního výzkumu byl vztah uvedený v kapitole 4.5 zkoumán a níže jsou popsány poznatky, ke kterým se v rámci vyhodnocení dospělo.

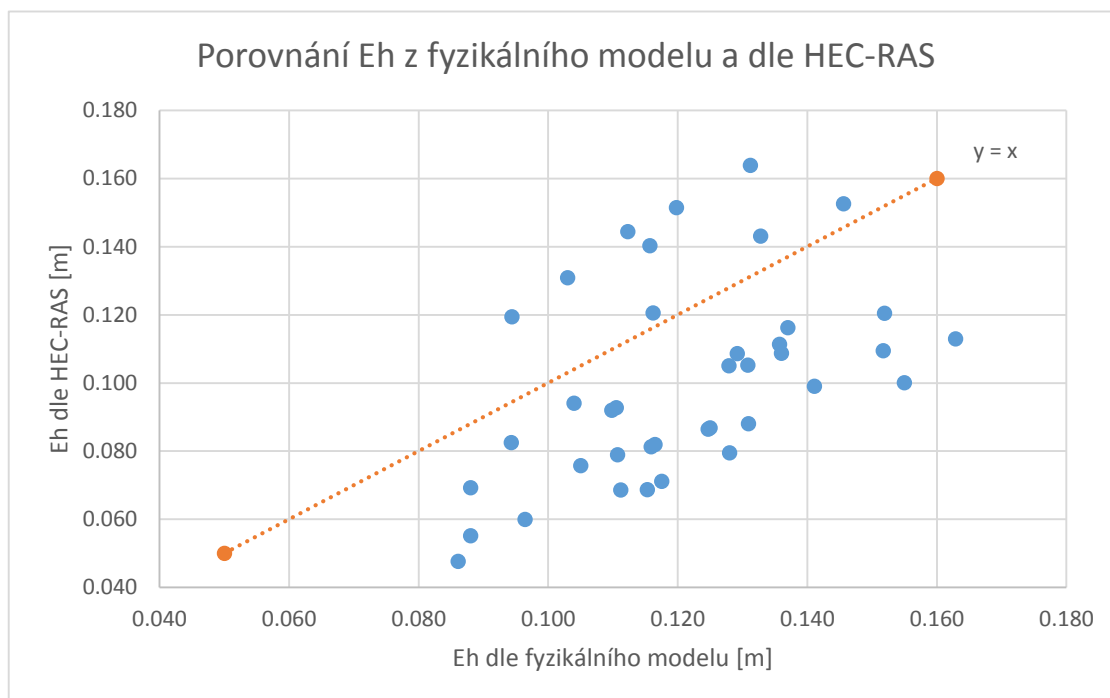
Ze zaměřených hodnot byla stanovena závislost hodnot snížené hloubky proudění y_c na světlé výšce otvoru a . Níže je zobrazen graf závislosti snížené hloubky proudění na světlé výšce otvoru, ze kterého je zřejmé, že vzájemnou závislost nelze přesně zobecnit lineárním vztahem s konstantní směrnici křivky. Pro ilustraci byl graf proložen přímkou vyjadřující konstantní závislost mezi těmito veličinami tak, jak je používána v programu HEC-RAS, a je patrné, že většina naměřených hodnot nenásleduje zobrazený trend.



Obr. 8.11.1 Graf závislosti snížené hloubky proudění na světlé výšce mostního otvoru

Následně bylo provedeno vzájemné porovnání hodnot energetických výšek v profilu před mostním objektem (E_h). Porovnávány byly hodnoty, které byly získány v rámci vyhodnocení fyzikálního výzkumu a hodnoty, které byly vypočteny dle rovnice 4.5.2, která je softwarem HEC-RAS používána. Obě sady hodnot jsou uvedeny tabelárně v tabulce 8.11.1, kde je vždy zvýrazněna vyšší z obou hodnot, a graficky znázorněny v obr. 8.11.2.

V případě shody obou sad hodnot (korelační koeficient by byl roven 1) by jejich vzájemná závislost v grafu odpovídala přímce, která je v grafu znázorněna oranžovou barvou ($y=x$). Je tedy zřejmé, že se hodnoty od sebe vzájemně liší a tento trend nenásledují. Většina znázorněných závislostí je zobrazena pod danou přímkou, což představuje případ, kdy hodnota energetické výšky dle fyzikálního výzkumu je vyšší než hodnota dle rovnice programu HEC-RAS. Lze konstatovat, že použití výpočetní rovnice 4.5.2 vede ve většině případů k výpočtu nižší vzduté hloubky před mostním objektem než tomu je ve skutečnosti.



Obr. 8.11.2 Porovnání E_h z fyzikálního modelu a dle HEC-RAS

Tab. 8.11.1 Tabulka hodnot Eh z fyzikálního výzkumu a dle HEC-RAS

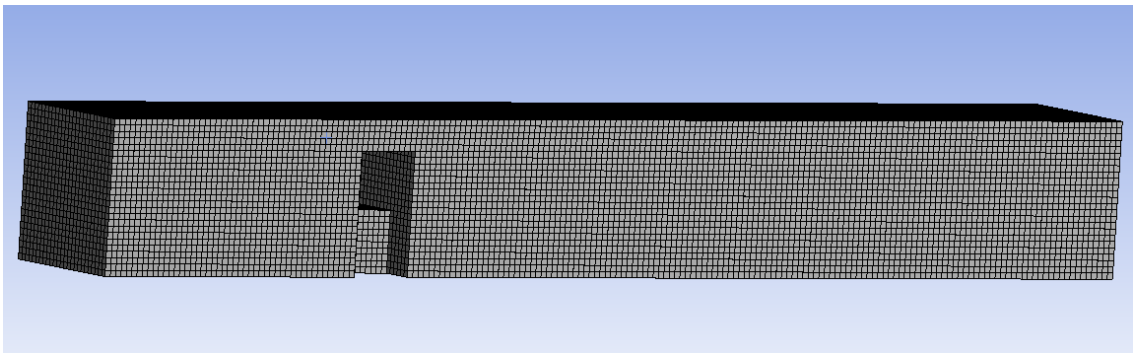
Eh [m]	Eh [m]
Fyzikální výzkum	HEC-RAS
0.112	0.144
0.116	0.121
0.129	0.109
0.111	0.069
0.115	0.069
0.111	0.079
0.118	0.071
0.110	0.092
0.116	0.081
0.125	0.086
0.120	0.151
0.128	0.105
0.131	0.164
0.136	0.111
0.111	0.093
0.117	0.082
0.125	0.087
0.133	0.143
0.137	0.116
0.152	0.109
0.163	0.113
0.128	0.079
0.131	0.088
0.136	0.109
0.131	0.105
0.141	0.099
0.155	0.100
0.146	0.153
0.152	0.120
0.094	0.119
0.094	0.083
0.105	0.076
0.086	0.048
0.088	0.055
0.088	0.069
0.096	0.060
0.103	0.131
0.104	0.094
0.116	0.140

9. 3D modelování

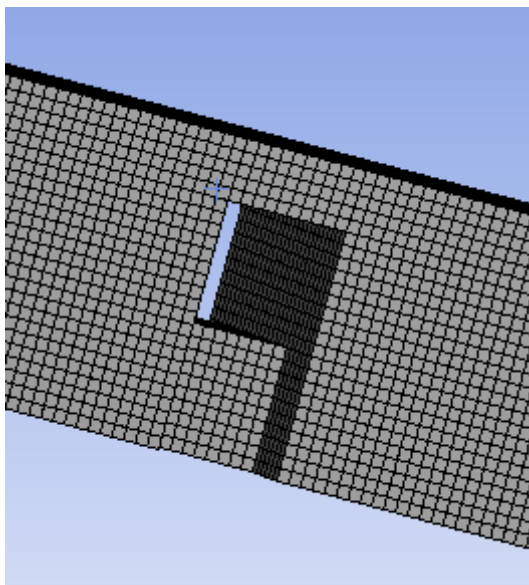
Po vyhodnocení fyzikálního modelování, které je popsáno v předchozích kapitolách, bylo přistoupeno k vytvoření 3D matematického modelu v prostředí ANSYS (Fluent). Cílem bylo ověření předpokladu a míry bočních kontrakcí, viz kapitola 8.3.

V první řadě byla vytvořena geometrie modelu v prostředí AutoCAD s rozměry hydraulického žlabu fyzikálního modelu a mostního objektu o světlé výšce otvoru 10 cm. Následně byla vytvořena strukturovaná výpočetní síť, kdy jsou jednotlivé elementy pravidelně uspořádané v prostoru. Výpočetní síť je vlastně inverzním zobrazením mostního objektu.

Použitá výpočetní síť je zobrazena v obr. 9.1, okolí mostního objektu je ve větším detailu zobrazeno v obr. 9.2.



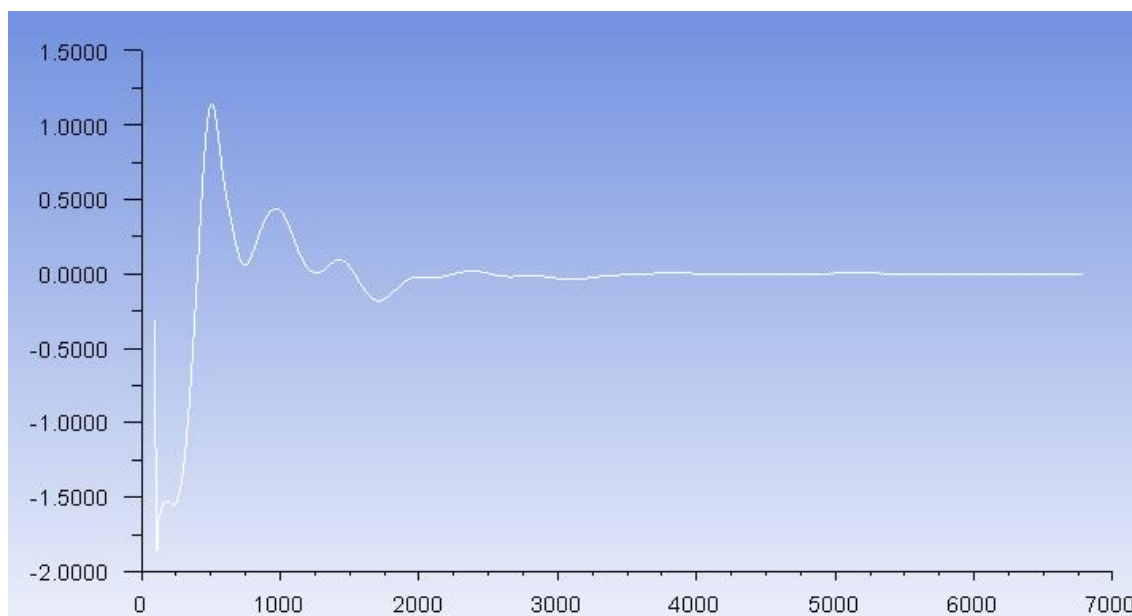
Obr. 9.1 Výpočetní síť



Obr. 9.2 Detail výpočetní sítě u mostního objektu

Pro výpočet bylo nutné nastavit okrajové podmínky. Horní okrajovou podmínkou byla úroveň vzduté hladiny před mostním objektem y_h , resp. na začátku žlabu. Dolní okrajovou podmínkou byla úroveň hladiny dolní vody y_a , tzn. na konci hydraulického žlabu. Bilancovanou hodnotou byla hodnota průtoku Q ve žlabu.

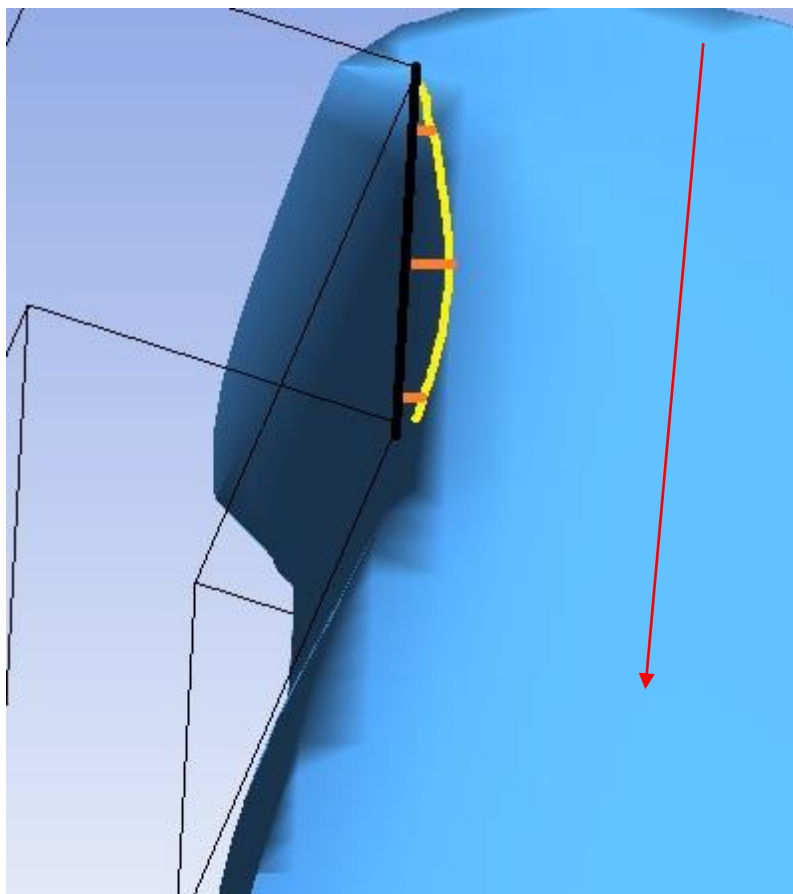
Výpočet byl považován za dokončený buď po provedení 10 000 iterací, nebo v případě poklesu hodnot tzv. reziduí, která sloužila jako konvergenční kritéria (např. hodnoty rovnice kontinuity, rychlosti v daných směrech apod.), pod hodnotu 0.00001. Níže je v obr. 9.3 uveden graf vývoje rozdílu průtoků na vstupu a výstupu do modelu. Na svislé ose je uvedena hodnota tohoto rozdílu v l/s, na vodorovné ose počet provedených iterací.



Obr. 9.3 Graf rozdílu průtoků na vstupu a výstupu z modelu

Celkem bylo modelováno 5 scénářů, tedy 5 sad okrajových podmínek. Ve výsledcích byly analyzovány průběhy rychlostí v oblasti mostního objektu, resp. ve 3 příčných řezech, kde byly zavedeny boční kontrakce. Kritérium pro uvažování bočních kontrakcí byla nulová, případně záporná hodnota rychlosti proudění.

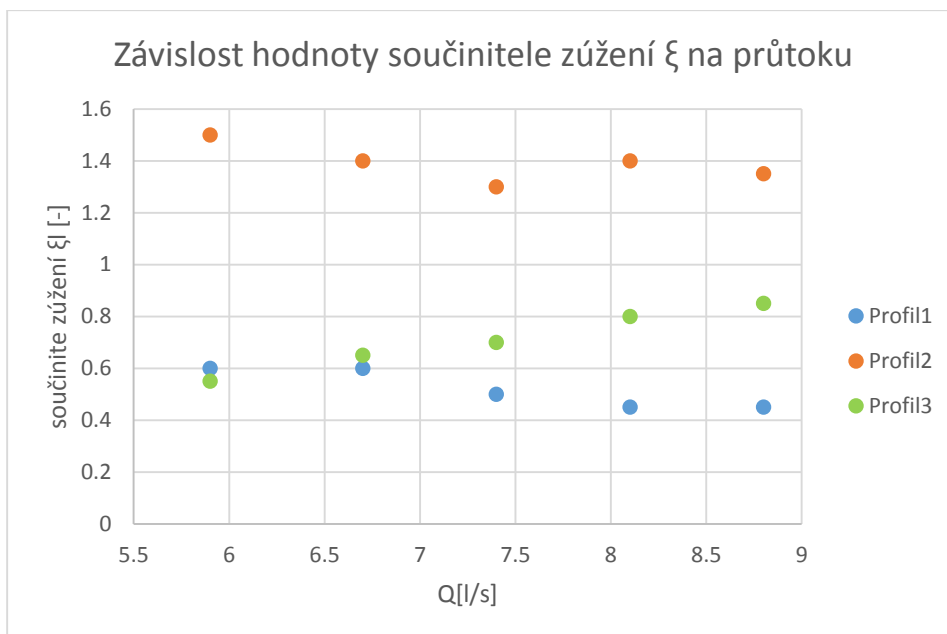
Níže je v obr. 9.4 zobrazen průběh proudění v mostním objektu s vyznačením poloh příčných řezů a směrem proudění. Řezy jsou v následném vyhodnocení číslovány ve směru proudění vody.



Obr. 9.4 Boční kontrakce v mostním objektu s vyznačením polohy příčných řezů

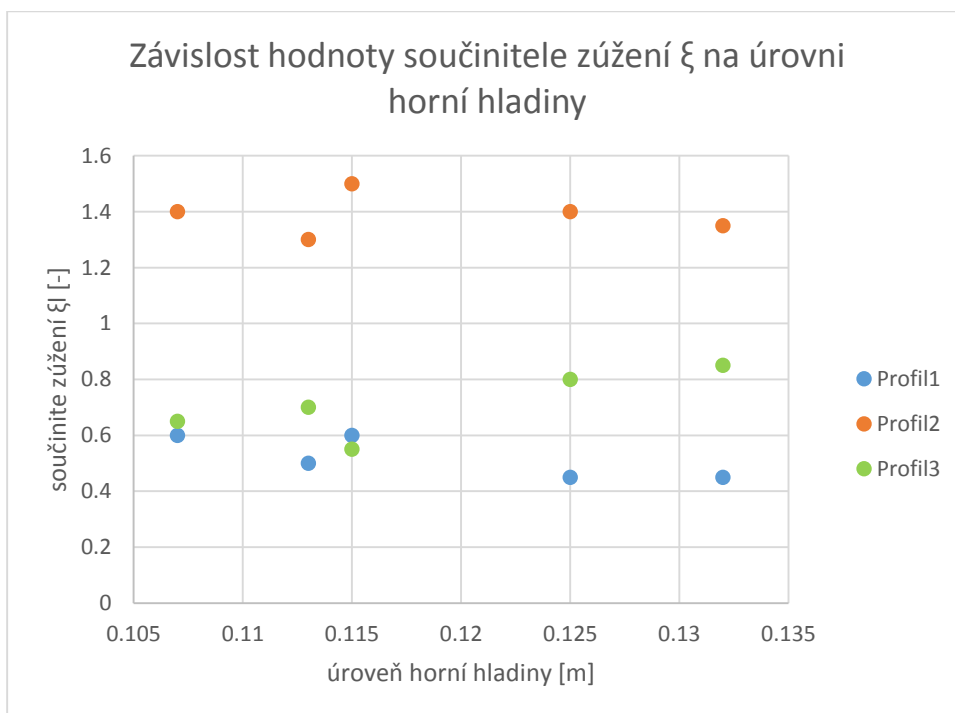
Hodnoty součinitele zúžení ξ byly stanoveny dle rovnice 8.3.2. Byla zkoumána závislost součinitele zúžení na hodnotách okrajových podmínek či průtoku. Ze zmíněných závislostí lze potvrdit závislost na hodnotě průtoku v hydraulickém žlabu. Vzájemná závislost je graficky zobrazena v obr. 9.5.

Z níže uvedeného grafu lze vyčíst, že boční kontrakce v prvním profilu má se vzrůstajícím průtokem lehce klesající tendenci. Naopak boční kontrakce v třetím profilu má lehce vzrůstající charakter se vzrůstajícím průtokem. Součinitel zúžení v prostředním profilu se pohybuje kolem své střední hodnoty.

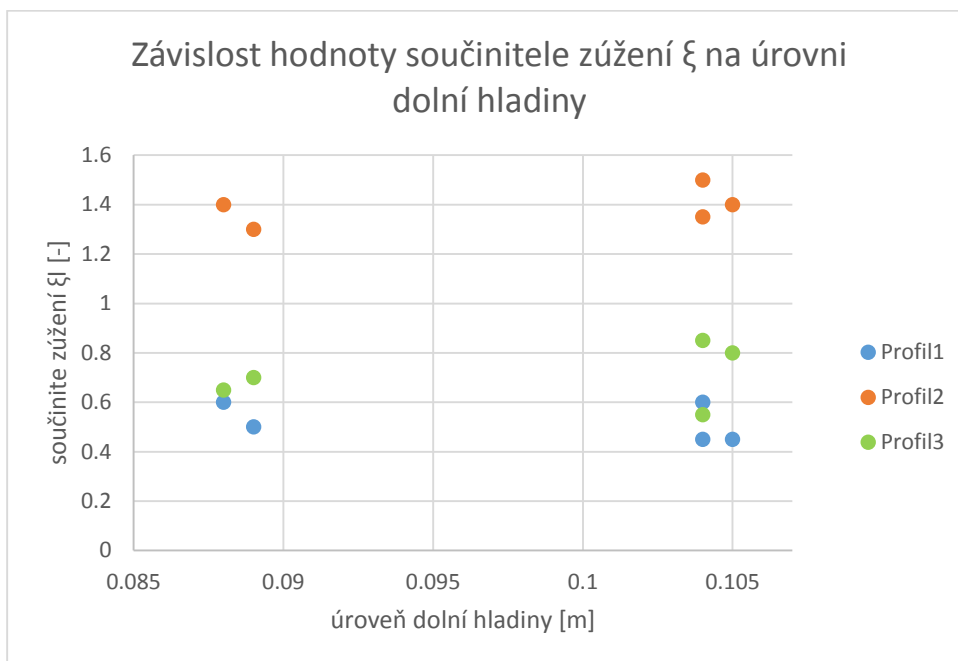


Obr. 9.5 Závislost hodnoty součinitele zúžení na hodnotě průtoku

Trendy vývoje bočních kontrakcí na úrovních hladin, které byly použity jako okrajové podmínky, odpovídají vývoji k závislosti na průtoku. V závislosti na zvýšení úrovní horní či dolní hladiny dochází ke snížení součinitele kontrakce v prvním profilu a naopak k vzrůstu hodnoty tohoto součinitele ve třetím profilu. Grafy závislostí jsou zobrazeny v obr. 9.6 a 9.7.

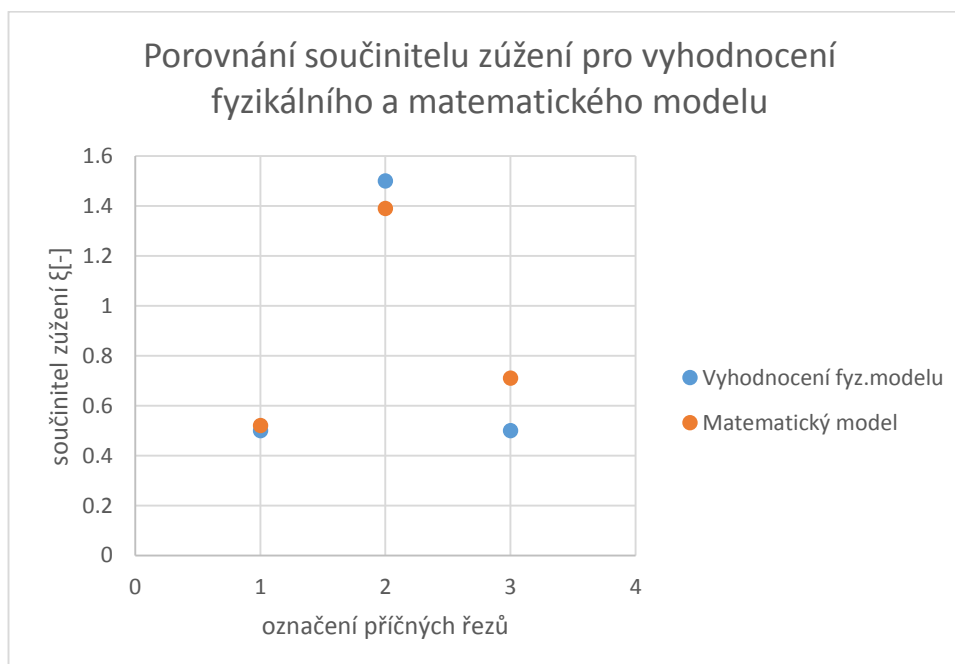


Obr. 9.6 Závislost hodnoty součinitele zúžení na úrovni horní hladiny



Obr. 9.7 Závislost hodnoty součinitele zúžení na úrovni dolní hladiny

Hodnoty součinitelů kontrakce pro jednotlivé příčné profily byly zprůměrovány a porovnány s hodnotami součinitelů využitých pro vyhodnocení fyzikálního modelu. Vzájemné grafické porovnání je zobrazeno v obr 9.8, tabelárně jsou hodnoty uvedeny v tabulce 9.1.



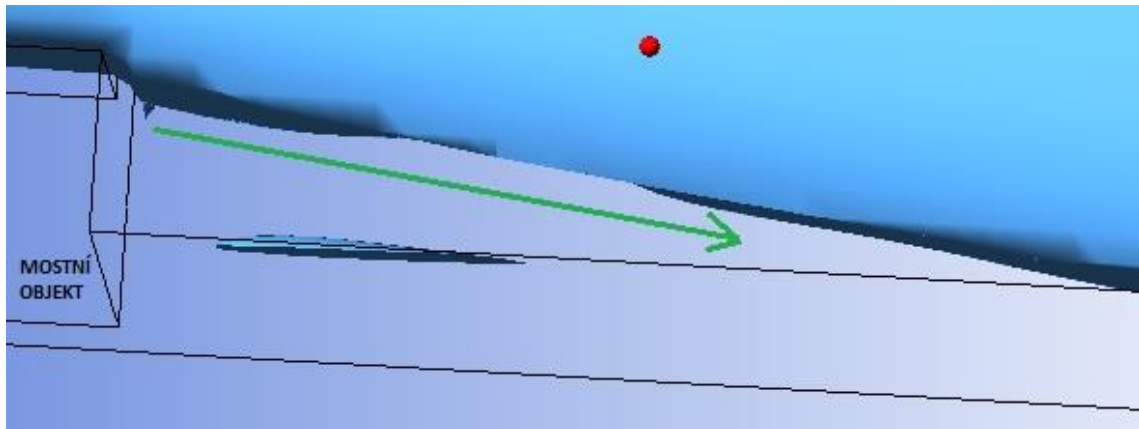
Obr. 9.8 Porovnání hodnot součinitelů zúžení pro FM a MM

Tab. 9.1 Porovnání hodnot součinitelů zúžení pro FM a MM

Označení příčného profilu	FM	MM
1	0.50	0.52
2	1.50	1.39
3	0.50	0.71

Oproti uvažované hodnotě součinitele zúžení ξ , který byl použit pro vyhodnocení fyzikálního modelu, dochází k největšímu rozdílu ve třetím příčném profilu, kde jsou boční kontrakce dle matematického modelu rozvinuty více, než bylo při vyhodnocení fyzikálního modelu uvažováno. Hodnoty součinitelů kontrakce v prvním a druhém příčném profilu lze považovat za sobě odpovídající.

V rámci vyhodnocení fyzikálního modelu bylo uvažováno postupné rozšiřování proudu za mostním objektem, viz kapitola 8.4. Tato skutečnost byla ověřena matematickým modelem a postupné rozšiřování proudu dle matematického modelu je zobrazeno v obr. 9.9.



Obr. 9.9 Postupné rozšíření proudu za mostním objektem

10. Závěr

V rámci diplomové práce bylo provedeno měření sad průběhů hladin a průtoků při různém ovlivnění proudění dolní vodou. K měření byl využit fyzikální model ve vodohospodářské laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze. Do hydraulického žlabu byly postupně instalovány celkem 3 různé modely mostů, resp. mosty se 3 různými světlými výškami mostních otvorů.

Data, která byla změřena, byla následně vyhodnocena s cílem zjištění hodnoty průtokového koeficientu C_D . Z vyhodnocení vyplývá, že hodnota průtokového koeficientu je závislá na hodnotě y_c , popř. na hodnotě parametru, který vychází z hodnoty snížené hloubky y_c . Průměrná hodnota průtokového koeficientu byla stanovena 0,60.

Výsledné hodnoty průtokového koeficientu C_D byly porovnány s hodnotami koeficientu pro výpočet výtoku pod stavidlem a hodnotami dle výzkumu Ing. Mattase, CSc.. Vyšší shoda sledovaných hodnot vyšla v prvním zmíněném porovnání.

V rámci vyhodnocení fyzikálního výzkumu bylo provedeno ověření výpočetní rovnice softwaru HEC-RAS, kdy byla vyvrácena konstantní závislost mezi hodnotou světlé výšky otvoru a sníženou hloubkou proudění.

V závěru práce byly porovnány uvažované boční kontrakce při vyhodnocení fyzikálního modelu s výsledky 3D matematického modelu, který byl v rámci práce vytvořen v programu ANSYS – Fluent. Byly zjištěny odpovídající hodnoty uvažovaných součinitelů zúžení v 2 z 3 příčných profilů. Ve třetím příčném profilu došlo oproti uvažovaným kontrakcím v rámci fyzikálního modelu k většímu rozvinutí kontrakcí v matematickém modelu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ INFORMACÍ

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 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
- [4] HAVLÍK, A., PICEK, T. *Přepady*. 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/ke_stazeni/prednasky/HY2V_06_Prepady.pdf
- [5] PICEK, T., MAREŠOVÁ I. *Proudění s volnou hladinou*. Přednášky pro posluchače programu Stavitelství na Fakultě stavební ČVUT v Praze [online].
Dostupné z:
http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HYAR/ke_stazeni/prednasky/HYAR_pr_08.pdf
- [6] HAVLÍK, A., PICEK, T. *Hydraulika otevřených koryt*. 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/ke_stazeni/prednasky/HY2V_05_Ustalene_proudeni_v_korytech.pdf
- [7] JANDORA, J., STARA, V., STARÝ, M. *Hydraulika a hydrologie*. Brno: CERM s.r.o., 2011, ISBN 978-80-7204-739-0.

- [8] MATOUŠEK, V. *Výtok otvorem – aplikace pro stavidlo a plavební komoru*. 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_HY3_V_10_Vytok_otvorem_stavidlo_a_plavebni_komora.protected.pdf
- [9] MATTAS, D. *Měření průtoků nestandardními metodami a v nestandardních podmínkách*. Praha: VÚV TGM, 1998, ISBN 80-85900-20-3
- [10] ČSN 73 6200 Mosty – Terminologie a třídění, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 07/2011
- [11] HAVLÍK, A., PICEK, T. *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/ke_stazeni/prednasky/HY2V_08_Mosty_propustky.pdf
- [12] HAMIL, L., *Bridge Hydraulics*. London: Spon Press, 1999, ISBN 0-419-20570-5
- [13] US Army Corps of Engineers, *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. [online]. Dostupné z:
https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Reference_Manual.pdf
- [14] MATOUŠEK, V. *Volný a zatopený výtok pod stavidlem*. Protokol k laboratornímu cvičení pro studenty oboru Vodní hospodářství a vodní stavby na Fakultě stavební ČVUT v Praze [online]. Dostupné z:
http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Users/Matousek/downloads/LAB_HY3_V_stavidlo.pdf
- [15] MATTAS, D. *Výpočet průtoků v otevřených korytech*. Praha: VÚV TGM, 2014, ISBN 978-80-87402-27-6

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3.2.1.1 Schéma zúžení proudu při proudění mostním objektem.....	7
Obr. 3.2.2.1 Srovnání obdélníkového a obloukového mostu.....	8
Obr. 3.3.1 Typy vstupních hran.....	9
Obr. 3.4.1 Typy šikmostí mostní konstrukce vůči vodnímu proudu.....	10
Obr. 3.4.2 Příklady umístění mostního otvoru v rámci příčného profilu.....	10
Obr. 4.1 Schéma proudění mostním objektem při zatopeném čele mostovky a volném výtoku.....	11
Obr. 4.2.1 Schéma pro aplikaci zachování hybnosti.....	13
Obr. 4.3.1 Schéma pro výpočet výtoku pod stavidlem [14].....	14
Obr. 4.3.2 Graf vzájemné závislosti koeficientů při výpočtu výtoku pod stavidlem [14]	15
Obr. 4.4.1 Náčrt Escandovy metody [11].....	16
Obr. 6.1.1.1 Schéma hydraulického okruhu.....	22
Obr. 6.1.2.1 Pohled na hydraulický žlab.....	23
Obr. 6.1.3 Náčrtek mostních objektů.....	24
Obr. 6.2.1.1 Hrotové měřítko.....	25
Obr. 6.2.2.1 Elektrický indukční průtokoměr.....	26
Obr. 6.2.2.2 Thomsonův měrný přeliv.....	27
Obr. 6.2.2.3 Hrotové měřítko v tlumícím válci.....	27
Obr. 7.2.1 Rozmístění měřících bodů v měrném žlabu.....	29
Obr. 7.2.2 Výsek rozmístění měřících bodů v okolí mostního objektu.....	30
Obr. 8.1.1 Vznik příčných vln.....	32
Obr. 8.1.2 Schéma pro výpočet střední hloubky mimo mostní objekt.....	33
Obr. 8.1.3 Schéma pro výpočet střední hloubky v mostním objektu.....	34
Obr. 8.4.1 Postupné rozšiřování proudu za mostním objektem.....	36
Obr. 8.4.2 Detail vznikajících úplavů pod mostním objektem.....	37
Obr. 8.6.1 Schéma výpočtových veličin mezi sousedními příčnými profily [15].....	38
Obr. 8.9.1 Závislost průtokového koeficientu na zúžené hloubce proudění.....	41
Obr. 8.9.2 Závislost průtokového koeficientu na poměru zúžené hloubky proudění a světle výšky mostního otvoru.....	41
Obr. 8.9.3 Závislost průtokového koeficientu na poměru zúžené hloubky proudění a energetické výšky před mostní konstrukcí.....	42

Obr. 8.9.4 Závislost průtokového koeficientu na rozdílu energetické výšky před mostní konstrukcí a zúžené hloubky proudění	42
Obr. 8.9.5 Závislost průtokového koeficientu na rozdílu energetické výšky na konci měrného žlabu a zúžené hloubky proudění	43
Obr. 8.9.6 Závislost průtokového koeficientu na podílu zúžené hloubky proudění a průtoku.....	43
Obr. 8.10.2 Závislost součinitele kontrakce na poměru světlé výšky mostního otvoru a hloubky proudění před mostním profilem.....	47
Obr. 8.11.1 Graf závislosti snížené hloubky proudění na světlé výšce mostního otvoru.....	49
Obr. 8.11.2 Porovnání E_h z fyzikálního modelu a dle HEC-RAS.....	50
Obr. 9.1 Výpočetní síť.....	52
Obr. 9.2 Detail výpočetní sítě u mostního objektu.....	52
Obr. 9.3 Graf rozdílu průtoků na vstupu a výstupu z modelu.....	53
Obr. 9.4 Boční kontrakce v mostním objektu s vyznačením polohy příčných řezů.....	54
Obr. 9.5 Závislost hodnoty součinitele zúžení na hodnotě průtoku.....	55
Obr. 9.6 Závislost hodnoty součinitele zúžení na úrovni horní hladiny.....	55
Obr. 9.7 Závislost hodnoty součinitele zúžení na úrovni dolní hladiny.....	56
Obr. 9.8 Porovnání hodnot součinitelů zúžení pro FM a MM.....	56
Obr. 9.9 Postupné rozšíření proudu za mostním objektem.....	57

SEZNAM TABULEK

Tab. 7.1 Klasifikace stavů v závislosti na zatopení čela mostu.....	28
Tab. 8.9.1 Tabelární přehled výsledných hodnot koeficientů.....	44
Tab. 8.10.1 Úspěšnost kritérií shody pro koeficienty průtoku a kontrakce.....	46
Tab. 8.10.2 Porovnání hodnot součinitele kontrakce dle fyzikálního výzkumu a Mattase.....	48
Tab. 8.11.1 Tabulka hodnot E_h z fyzikálního výzkumu a dle HEC-RAS.....	51
Tab. 9.1 Porovnání hodnot součinitelů zúžení pro FM a MM.....	57

SEZNAM ROVNIC

(3.1.1) Rovnice pro výpočet Froudova čísla.....	5
(4.1.1) Bernoulliho rovnice [11].....	12
(4.2.1) Aplikace rovnice hybnosti pro výpočet proudění v mostním objektu [11].....	13
(4.3.1) Výpočet výtoku pod stavidlem [14].....	14
(4.3.2) Výpočet výtoku pod stavidlem se zavedením součinitele kontrakce.....	14
(4.5.1) Rovnice pro výpočet průtokového množství v programu HEC-RAS [13].....	15
(4.5.2) Upravený tvar rovnice 4.5.1 [13].....	15
(4.5.3) Vztah pro výpočet snížené hloubky proudění dle HEC-RAS.....	16
(5.1.1) Froudovo kritérium podobnosti.....	19
(5.1.2) Výpočet měřítka rychlosti dle Frouda.....	19
(5.1.3) Výpočet měřítka průtoku dle Frouda.....	19
(5.1.4) Reynoldsovo kritérium podobnosti.....	19
(5.1.5) Výpočet měřítka rychlosti dle Reynoldse.....	20
(5.1.6) Výpočet měřítka průtoku dle Reynoldse.....	20
(8.1.1) Výpočet střední hloubky proudění mimo mostní objekt.....	33
(8.1.2) Výpočet střední hloubky proudění v mostním objektu.....	33
(8.2.1) Podmínka zatopeného výtoku.....	34
(8.3.1) Stanovení účinné šířky proudu [4].....	35
(8.3.2) Stanovení účinné šířky proudění v profilech v mostním objektu.....	35
(8.5.1) Výpočet průtočné plochy.....	37
(8.5.2) Výpočet rychlosti proudění.....	37
(8.6.1) Výpočet energetické výšky [5].....	38
(8.6.2) Rovnice pro výpočet změny polohy hladiny mezi profily [15].....	39
(8.7.1) Výtokové množství se zavedením průtokového koeficientu [8][9].....	39
(8.7.2) Výpočet průtokového součinitele.....	39
(8.8.1) Výpočet součinitele kontrakce.....	39
(8.8.2) Výpočet rychlostního součinitele [8].....	40