



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

TENKOSTĚNNÝ PRAVOÚHLÝ PŘELIV S PŘÍTOKOVOU ŠACHTOU

THIN-PLATE RECTANGULAR WEIR WITH INLET SHAFT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Jiří Šváb

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ZBYNĚK ZACHOVAL, Ph.D.

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Jiří Šváb
Název	Tenkostěnný pravoúhlý přeliv s přítokovou šachtou
Vedoucí práce	doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2018
Datum odevzdání	11. 1. 2019

V Brně dne 31. 3. 2018

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Kandaswamy, P. K., Rouse, H., 1957. Characteristics of flow over terminal weirs and sills. Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the ASCE, 83, 4, 1-13.

Kolář, V., Patočka, C., Bém, J., 1983. Hydraulika. Praha: SNTL/Alfa.

Major, J., 2017. Vliv příčného rozměru přítokové šachty na přepad přes přeliv se širokou korunou. Czech Journal of Civil Engineering, roč. 2017, 2, 118-124.

Major, J., 2018. Vliv příčného rozměru šachty na charakteristiky přepadu přes přeliv se širokou korunou. In Juniorstav 2018. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. 807-812.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Směr přitékajícího proudu vody na přeliv má vliv na přepad. V případě přítoku žlabem je přepad podrobně popsán, avšak v případě přítoku šachtou není.

Cílem práce je stanovit vliv relativní délky svislé přítokové šachty (vztažené k přepadové výšce) na kapacitu přelivu a tvar přepadového paprsku při dokonalém přepadu přes tenkostěnný pravoúhlý přeliv bez bočního zúžení.

Požadované výstupy: pojednání o tenkostěnných přelivech, popis experimentu, měření a vyhodnocení, stanovení součinitele relativní délky šachty.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

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

doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY
ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Tenkostěnný pravouhlý přeliv s přítokovou šachtou* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 11. 1. 2019

Bc. Jiří Šváb
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Tenkostěnný pravouhlý přeliv s přítokovou šachtou* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11. 1. 2019

Bc. Jiří Šváb

autor práce

ABSTRAKT

Diplomová práce je rozdělena na literární rešerši a praktickou část (vlastní měření). Obsahem literární rešerše je popis přepadu přes tenkostěnný pravoúhlý přeliv. V praktické části je popsán model, měřicí přístroje a vlastní měření. Výsledkem je vyhodnocení průběhu dolní i horní obálky paprsku, stanovení součinitele přepadu, součinitele relativní délky šachty a určení mezní hodnoty relativní délky šachty pro neovlivnění tvaru přepadového paprsku.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tenkostěnný pravoúhlý přeliv, přítoková šachta, experimentální výzkum, tvar přepadového paprsku, součinitel přepadu, součinitel vlivu relativní délky šachty.

ABSTRACT

The thesis is divided into literary research and practical part (own measurement). The content of the literary research is a description of the flow over thin-plate rectangular weir. The practical part is focused on a description of the model, measuring equipment and measurement. The results are evaluation of lower and upper surface of nappe, determination of discharge coefficient, coefficient of relative length of shaft, limit value of relative length of shaft for uninfluenced shape of nappe.

KEYWORDS

Thin-plate rectangular weir, inflow shaft, experimental research, shape of nappe, discharge coefficient, coefficient of relative length of shaft.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Jiří Šváb *Tenkostěnný pravoúhlý přeliv s přítokovou šachtou*. Brno, 2019. 47 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu svojí diplomové práce Doc. Ing. Zbyňku Zachovalovi, Ph.D za ochotu, cenné rady a odbornou pomoc při zpracování této práce. V neposlední řadě mé poděkování patří především moji rodině a mým blízkým, kteří mi studium umožnili, vždy mi byli nápomocní a po celou dobu mého studia mě podporovali.

Obsah

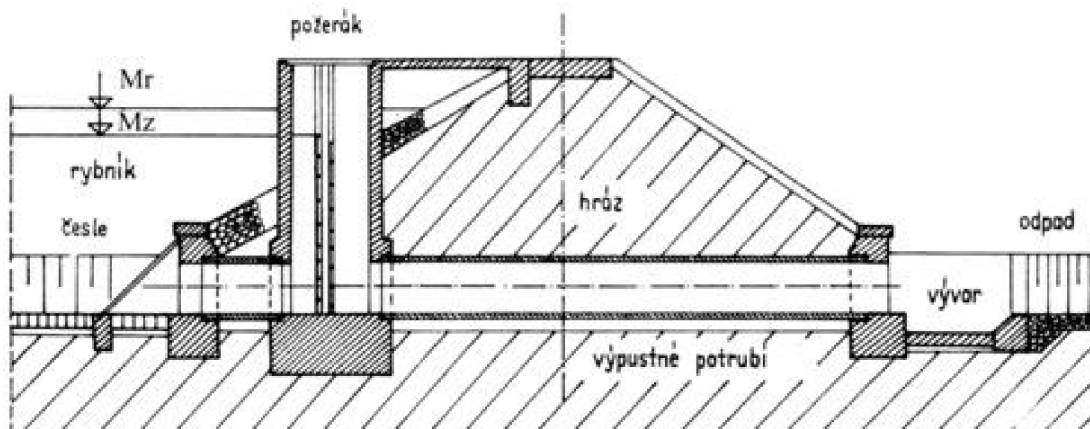
1	ÚVOD	1
2	CÍL PRÁCE A METODA ŘEŠENÍ	3
3	TENKOSTĚNNÉ PŘELIVY	4
3.1	Dělení tenkostěnných přelivů	4
3.2	Přehled publikací zabývajících se tenkostěnnými přelivy	5
3.3	Požadavky na tenkostěnné přelivy	6
3.4	Pravoúhlé tenkostěnné přelivy s přítokovým korytem.....	9
3.4.1	Pravoúhlý tenkostěnný přeliv bez bočního zúžení (Bazinův přeliv)	10
3.4.2	Pravoúhlý tenkostěnný přeliv s bočním zúžením.....	11
3.5	Pravoúhlé tenkostěnné přelivy s přítokovou šachtou	12
4	EXPERIMENT	13
4.1	Parametry modelu.....	13
4.2	Zhotovení experimentálního zařízení.....	16
4.3	Konstrukční požadavky na provedení přelivu dle normy	16
4.4	Měřicí přístroje	17
4.4.1	Digitální hrotové měřidlo	17
4.4.2	Indukční průtokoměr.....	20
4.4.3	Piezometrické trubice	21
4.5	Postup měření.....	22
5	VYHODNOCENÍ	25
5.1	Vykreslení průběhu hladin.....	25
5.2	Poměr přepadové výšky určené z měření hladiny v šachtě a z měření hladiny v piezometru	30
5.3	Stanovení součinitele přepadu.....	31
5.4	Mezní hodnota relativní délky šachty pro neovlivnění tvaru přepadového paprsku	36
5.5	Tvar dolní a horní obálky neovlivněného paprsku	40
6	ZÁVĚR A ZHODNOCENÍ	41

6.1 Závěr	41
6.2 Zhodnocení.....	42
7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	43
8 SEZNAMY	45
8.1 Seznam obrázků.....	45
8.2 Seznam tabulek	46
8.3 Seznam veličin	47
8.4 Seznam zkratek.....	47

1 Úvod

Směr přitékajícího proudu má vliv na přepad [1], [3] a přepadový součinitel. V případě přítoku žlabem s nulovým nebo pouze mírným sklonem dna je přepad podrobně popsán prakticky pro všechny v praxi používané typy a výšky přelivů. V případě nátoku svislou šachtou však podrobně popsán není, a to ani pro jeden z nich. Diplomová práce se proto zabývá stanovením vlivu relativní délky šachty na přepad přes tenkostěnný pravoúhlý přeliv. Různé relativní délky šachty (vztažené k přepadové výšce), mají vliv na průběh dolní i horní obálky paprsku proudu, na rychlostní a tlakové pole a také na průtočnost.

Typickým příkladem, kde se aplikuje nátok šachtou, je požerák. Požeráky se dělí na 2 typy [4]: otevřený a uzavřený. Uzavřený požerák se používá v případě vyšších hrází, nebo pokud se předpokládá, že na hladině nádrže se může vyskytovat větší množství plávi, které by mohlo přítok do otevřeného požeráku zahltit. Podélný řez uzavřeným požerákem je zobrazen na Obr. 1.1 a bývá obvykle umístěn v tělese hráze, jeho vtokový objekt se nachází v prostoru zátopy, u dna nádrže.



Obr. 1.1 Podélný řez uzavřeného požeráku [5]

Uvnitř požeráku se nachází dlužová stěna (obvykle dubové dluže umístěné ve svislých vodicích drážkách), kterou je udržována požadovaná hladina v nádrži dle manipulačního řádu. Před dlužovou stěnou proudí voda svisle vzhůru a následně přepadá přes korunu dlužové stěny do šachty a odtéká výpustným potrubím do vývaru. Na Obr. 1.2 je zobrazen uzavřený betonový požerák.



Obr. 1.2 Uzavřený požerák [6]

V praxi se přepad přes tenkostěnný přeliv s přítokem svislou šachtou používá i v průmyslu, laboratořích, čistírnách odpadních vod atd. Přítok svislou šachtou se obecně aplikuje v prostorách, kde dochází k vertikální dopravě vody.

2 Cíl práce a metoda řešení

Cílem práce bylo stanovit vliv relativní délky svislé přítokové šachty (vodorovná vzdálenost stěn šachty ve směru proudu při přepadu) na kapacitu pravoúhlého tenkostěnného přelivu bez bočního zúžení a na tvar přepadového paprsku při dokonalém přepadu. Práce nebyla zaměřena na popis rychlostního ani tlakového pole.

Metoda stanovení vlivu relativní délky šachty na kapacitu přelivu spočívala v experimentálním měření na modelu měřítkově odpovídajícímu prototypu umístěnému v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně.

Pro stanovení horní i dolní obálky paprsku se předpokládalo, že tvar paprsku je po šířce přelivu stejný, proto bylo měřeno pouze v podélné rovině symetrie přítokové šachty, přelivu a odtokové šachty. Měření proběhlo v jednotlivých bodech od koruny přelivu směrem ke stěně posuvné části šachty a poté i směrem do odtokové šachty. Obálky paprsku byly měřeny pro 5 různých průtoků a za 3 délek šachty. Prostor pod přelivem byl zavzdušněný a přepad byl za všech stavů dokonalý.

Očekávanými výsledky práce byly vztah pro stanovení součinitele relativní délky šachty vyjádřený pomocí relativní délky šachty, mezní hodnota relativní délky šachty, kdy tvar paprsku není ovlivněn relativní délkou šachty a ověření shodnosti tvaru dolní a horní obálky paprsku s případem přítoku korytem na vysoký přeliv.

3 Tenkostěnné přelivy

Tenkostěnnými přelivy [1] neboli ostrohrannými přelivy [3] se nazývají takové přelivy, u nichž se proud vody odtrhne od ostré návodní hrany koruny přelivu a takto vzniklý přepadový paprsek není přelivem ovlivňován. U přelivů s pravouhlým podélným profilem uvedené platí, když je splněno

$$t < 0,66 h, \quad (3.1)$$

kde h je přepadová výška a t je délka přelivu ve směru proudu (tloušťka přelivu). Přepadová výška je svislá vzdálenost mezi hladinou ve vzdálenosti $3h$ až $4h$ od návodní hrany koruny přelivu a korunou přelivu.

3.1 Dělení tenkostěnných přelivů

Název přelivu je odvozen od tvaru výřezu. Výřez může být jednoduchý nebo složený. Používanými jednoduchými výřezy jsou:

- obdélníkový (Bazinův),
- trojúhelníkový (Thomsonův),
- lichoběžníkový (Cipolettiho),
- půlkruhový,
- kruhový,
- parabolický,
- lineární
- a další.

V praxi se často používají názvy přelivů dle autorů, kteří se jako první přelivem s daným výřezem zabývali. Ve výše uvedeném členění jsou uvedeni v závorce.

Tenkostěnné přelivy lze dělit i dle bočního zúžení. Přelivy s bočním zúžením mají přítokové koryto, které je alespoň v jedné úrovni výřezu, kterou přepadá voda, širší, než je výřez. Přelivy bez bočního zúžení mají koryto v celé výšce výřezu, kterou přepadá voda, stejně široké, jako je výřez.

Přelivy mohou být s přítokovým korytem nebo s přítokovou šachtou. V případě přítokového koryta může být přeliv umístěn čelně – čelní přeliv, nebo je umístěn bočně – boční přeliv.

Měření průtoku pomocí ostrohranných přelivů se používá nejčastěji, jelikož jsou tvarově jednoznačné a byly experimentálně nejpodrobněji ověřeny.

3.2 Přehled publikací zabývajících se tenkostěnnými přelivy

V roce 1929 se Rehbock [13] zabýval stanovením empirického vztahu pro součinitel přepadu C_d , který závisí na relativní přepadové výšce

$$C_d = 0,611 + 0,08 \frac{h}{P}, \quad (3.2)$$

kde P je výška přelivu nade dnem přítokového koryta. Tento vztah nezahrnoval vliv viskozity a kapilarity. Je možno jej aplikovat pro poměry $h/P \leq 5$. Vztah vykazoval přesnost 0,5 % pro výšku přelivu 0,1 – 1,0 m a přepadovou výšku od 0,025 – 0,6 m [13]

Autoři Kandaswamy a Rouse v roce 1936 [13] experimentálně stanovili vztah pro součinitel přepadu v případě vyšších hodnot poměrů h/P , než zkoumal Rehbock

$$C_d = 1,06 \left(1 + \frac{h}{P}\right)^{1,5}. \quad (3.3)$$

Vztah platí pro poměr $h/P \geq 15$.

V roce 1957 autoři Kindsvater a Carter [14] stanovili vztah pro součinitel přepadu C_d , který zahrnuje vliv povrchového napětí a viskozity zavedením účinných veličin

$$Q = \frac{2}{3} C_e \sqrt{2g} b_e h_e^{3/2}, \quad (3.4)$$

kde C_e je součinitel přepadu, g je tíhové zrychlení, b_e je účinná šířka přelivu a h_e je účinná přepadová výška.

V roce 1977 byla publikována studie autorů Ranga Raju a Asawa [14], která označila proudění přes tenkostěnný přeliv za velmi komplexní problematiku. Přepad ovlivňuje nehydrostatické rozdělení tlaku, turbulence, povrchové napětí, tření a geometrie. Právě účinek povrchového napětí a viskozity má největší vliv při nízké přepadové výšce. Na základě těchto poznatků stanovili vztah pro výpočet průtoku, který obsahuje navíc korekční člen K zohledňující vliv viskozity a povrchového napětí

$$Q = \left[\frac{2}{3} \left(0,611 + 0,075 \frac{h}{P} \right) b \sqrt{2g} h^{3/2} \right] K. \quad (3.5)$$

Korekční člen K je funkcí Weberova a Reynoldsova čísla (kritéria).

V roce 1988 autor Swamee P.K. [14] stanovil obecný vztah pro ostrohranné tenkostěnné přelivy, který vznikl kombinováním vztahů, stanovených

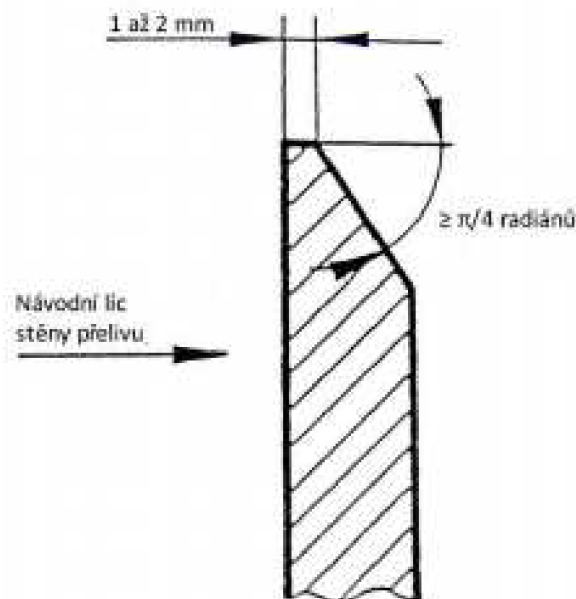
jinými autory. Tento vztah je vhodné aplikovat pro výpočet součinitele přepadu pro extrémní hodnoty h/P nebo h/b . Vztah má tvar

$$C_d = 1,06 \left[\left(\frac{14,14P}{8,15P + h} \right)^{10} + \left(\frac{h}{h + P} \right)^{15} \right]^{-0,1} \quad (3.6)$$

3.3 Požadavky na tenkostěnné přelivy

Pro dosažení přesných výsledků měření je vyžadováno [1], aby se jednalo o dokonalý přepad, přepadový paprsek byl volný a aby nedošlo k negativnímu ovlivnění přepadu přítokem. Poslední hledisko se zajišťuje například dostatečně dlouhým přímým přítokovým korytem, nebo se kolmo na směr přitékající vody umístí usměrňovací prvek např. děrované kovové síto, lamely.

Dalším požadavkem na tenkostěnné přelivy je svislost a hladkost přelivné stěny [3], která je jednostranně upravena do břitu zobrazeno na Obr. 3.1. Úprava spočívá v zešíkmení povodní hrany přelivu pod úhlem větším než $\pi/4$ rad.



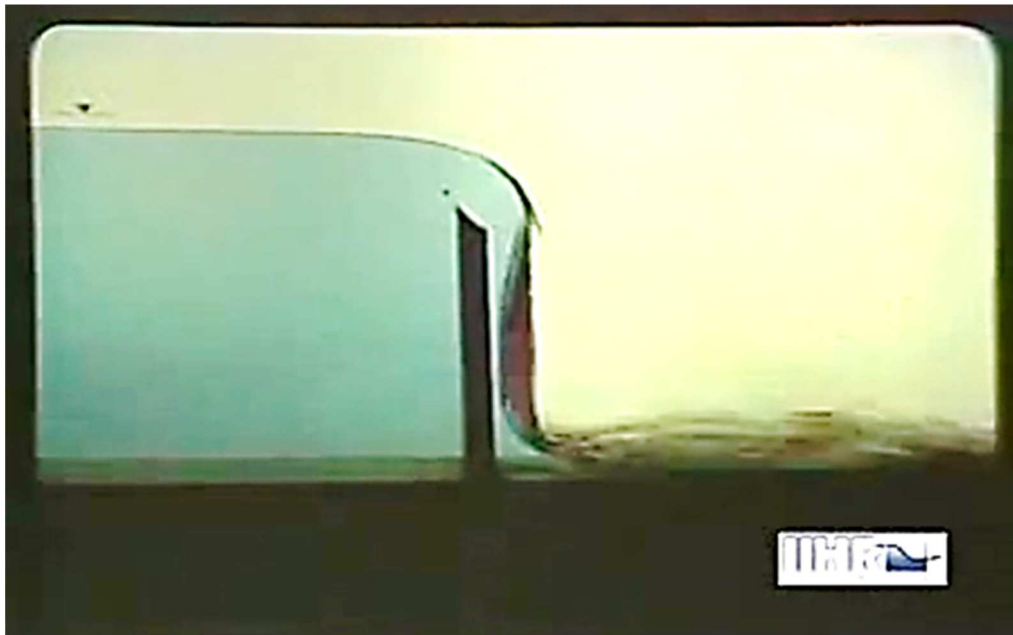
Obr. 3.1 Detail koruny přelivu [1]

Aby bylo možné naměřené hodnoty považovat za korektní, je nutno přeliv a jeho okolí udržovat v dobrém stavu [7]. V případě aplikace přelivu v oblastech, kde dochází k transportu splavenin a pláví, může časem dojít k jejich nahromadění před návodní stěnou přelivu. Výška usazenin může ovlivnit kapacitu přelivu, proto v tomto případě musí dojít k jejich odstranění, což je znázorněno na Obr 3.2.



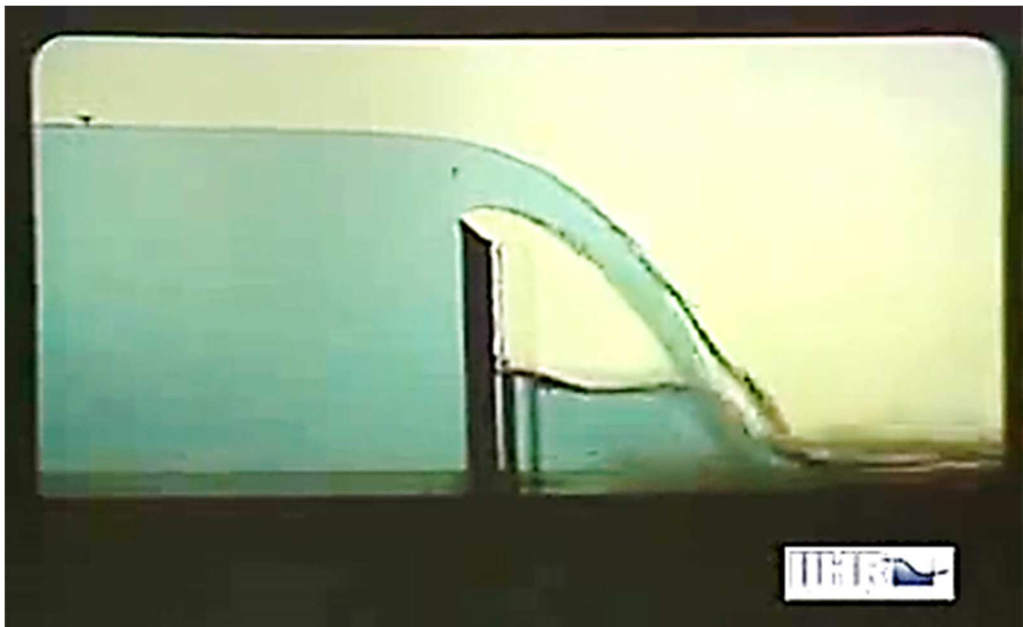
Obr. 3.2 Údržba návodního prostoru přelivu [7]

Je nutno provést zavzdušnění dolní obálky přepadajícího paprsku tak, aby děj probíhal za atmosférického tlaku [3]. Pokud v prostoru pod přepadovým paprskem nebude zajištěn atmosférický tlak, vysává z něj proudící voda vzduch [8], tím klesá tlak, což má vliv na průtok, který se může zvětšit až o 25 %. Dále vznikají pulzace proudu, které mohou vést ke vzniku vibrací přelivu, čímž je ale ohrožena jeho stabilita. Na Obr. 3.3 je zobrazen stav, kdy není zajištěn atmosférický tlak pod paprskem, paprsek přilne k lici přelivu a při odtrhávání a přilnutí dochází k pulzacím proudu.



Obr. 3.3 Nezavzdušněný paprsek [12]

Pokud bude tento prostor zavzdušněn, například půdorysným rozšířením koryta za přelivem, rozrážeči proudy, nebo bude vzduch pod paprsek přiveden zavzdušňovacím potrubím, vytvoří se volný paprsek. Tímto se přepad stabilizuje, nevznikne podtlak vůči atmosférickému tlaku a s ním související pulzace. Tento žádoucí stav je zobrazen na Obr.3.4..

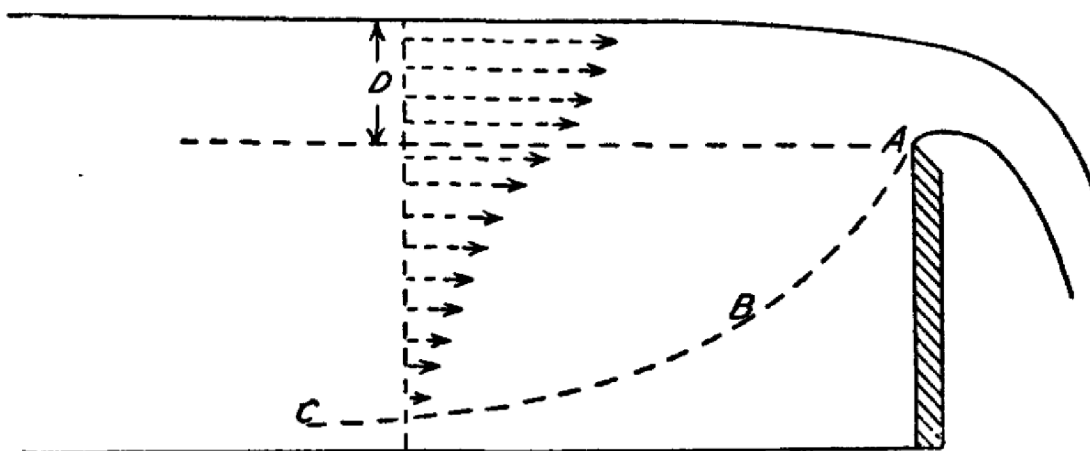


Obr. 3.4 Zavzdušněný paprsek [12]

Pro dosažení dostatečně přesných hodnot je nutno též pravidelně udržovat přelivnou hranu. Často dochází k jejímu odření, znečištění a zaoblování.

Dále je nutno dodržet kolmost a ostrost břitu přelivné hrany. Z tohoto důvodu je nejčastěji používaným materiálem pro výrobu přelivné hrany nerezová ocel. Dřevo, hliník a plast nemají dostatečnou povrchovou hladkost nebo odolnost proti oděru nebo je nelze vyrobit dostatečně tenké a zároveň odolné tlaku, který vyvolává přitékající voda.

Rozložení rychlosti přitékající vody na přeliv je znázorněno na Obr. 3.5 [9]. Pod čerchovanou spojnici bodů A, B a C se vyskytuje úplav.



Obr. 3.5 Rozložení rychlosti [9]

3.4 Pravoúhlé tenkostěnné přelivy s přítokovým korytem

Pro výpočet průtoku Q přes tenkostěnný přeliv s pravoúhlým výřezem se užívá vztah [3]

$$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} [(h_0^{3/2} - k^{3/2})], \quad (3.7)$$

kde μ je součinitel přepadu daného přelivu, k je rychlostní přítoková výška

$$k = \frac{\alpha v_0}{2g}, \quad (3.8)$$

kde α je Coriolisovo číslo (součinitel kinetické energie), v_0 přítoková rychlost a h_0 je energetická přepadová výška

$$h_0 = h + k. \quad (3.9)$$

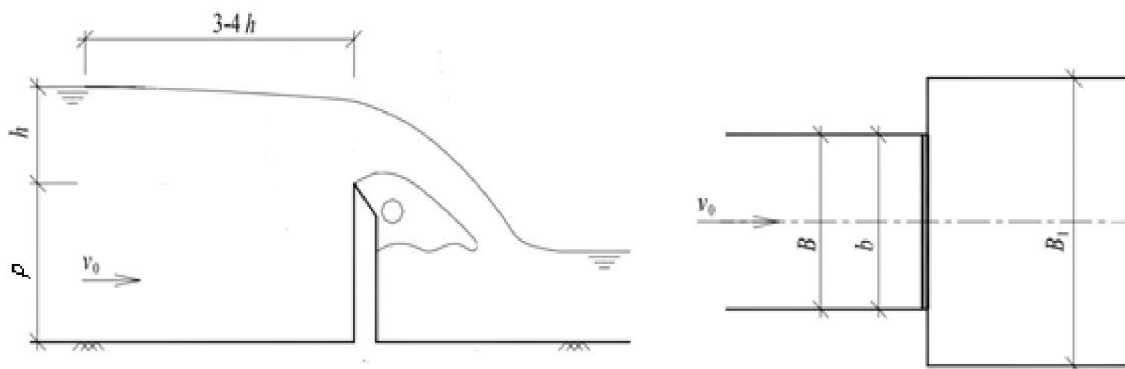
Pokud se neuvažuje s přítokovou rychlostí, je možné používat zjednodušený vztah, tzv. rovnici Poleniovu nebo Dubatovu [3]

$$Q = \frac{2}{3} C_d b \sqrt{2gh^3}, \quad (3.10)$$

Součinitel přepadu C_d závisí na typu přelivu, přepadové výšce, výšce přelivu nade dnem přítokového koryta a na tlaku pod přepadovým paprskem.

3.4.1 Pravoúhlý tenkostěnný přeliv bez bočního zúžení (Bazinův přeliv)

Jedná se o přeliv, kde je šířka přelivu b stejná jako šířka koryta B , kterým voda na přeliv přitéká. Tento typ přelivu se nazývá Bazinův, jelikož se jím jako první nejpodrobněji zabýval. Je nutno splnit rozmezí platnosti používaných rovnic a dále předepsané požadavky na umístění přelivu. Pokud nedojde ke splnění těchto požadavků, musí se měrná křivka přelivu určit tárováním přímo na místě aplikace měrného přelivu.



Obr. 3.6 Bazinův přeliv [3]

Bazin odvodil pro stanovení průtoku Q rovnici, kterou lze použít i pro další typy přelivů. Rovnice vznikla zanedbáním členu $k^{3/2}$ v rovnici 3.7, protože dosahuje mnohem nižších hodnot než předchozí člen $h_0^{3/2}$. Po úpravách, kdy se vytkne člen $h_0^{3/2}$, člen $\frac{2}{3}\mu$ se označí jako m a dostane se ve finále rovnice ve tvaru [3]

$$Q = m b \sqrt{2g} h^{3/2}, \quad (3.11)$$

kde m je součinitel přepadu, který zahrnuje ztráty a kontrakci na přelivu a vliv přítokové rychlosti.

Bazin experimentálně stanovil součinitel přepadu m_{Bazin} jako [3]:

$$m_{Bazin} = \left(0,405 + \frac{0,003}{h}\right) + \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{h+P}\right)^2\right], \quad (3.12)$$

Rovnice 3.11 platí s chybou menší než 1 % pro:

$$0,1 \text{ m} < h < 1,24 \text{ m},$$

$$0,2 \text{ m} < b < 2,0 \text{ m},$$

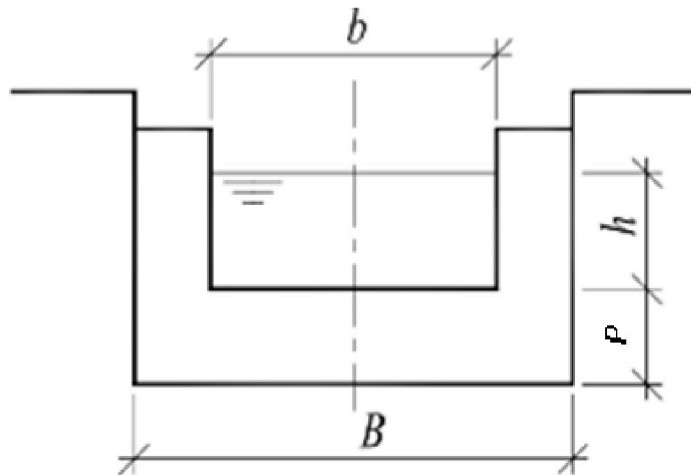
$$0,2 \text{ m} < P < 2,0 \text{ m}.$$

Bazin udal charakteristiky přepadového paprsku na přelivu v poměru k přepadové výšce. Ve vodorovné vzdálenosti $3h$ před přelivnou hranou je snížení hladiny $0,003h$, zatímco přímo nad přelivnou hranou je toto snížení rovno $0,15h$.

Z tohoto zjištění plyne, že se přepadová výška musí měřit ve vzdálenosti $3h$ až $4h$ před přelivem.

3.4.2 Pravoúhlý tenkostěnný přeliv s bočním zúžením

Pravoúhlý tenkostěnný přeliv s bočním zúžením (obdélníkový přeliv) je vhodný pro měření průtoků na malých vodních tocích a v korytech s obdélníkovým průtočným průřezem [8]. Aplikuje se na tocích s poměrně vyrovnaným rozsahem průtoků. S lineárně rostoucí přepadovou výškou roste lineárně i průtočná plocha.

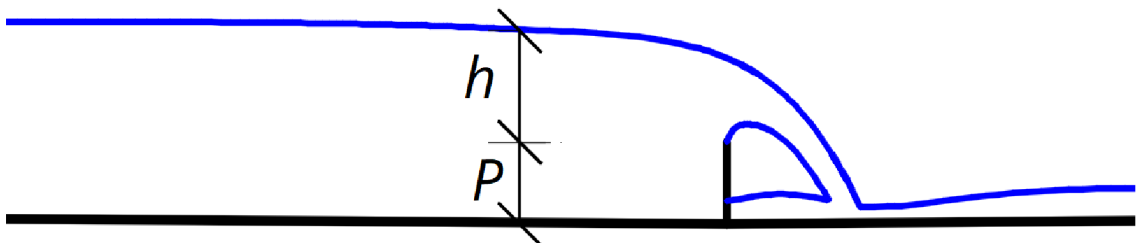


Obr. 3.7 Pravoúhlý tenkostěnný přeliv s bočním zúžením [3]

Podélný řez korytem je znázorněn na Obr. 3.8. Pro stanovení průtoku se používá vztah (3.10). Součinitel přepadu dle Ponceleta $m_{Poncelet}$ [3] je

$$m_{Poncelet} = \left[0,405 + \frac{0,0027}{h} - 0,03 \left(1 - \frac{b}{B} \right) \right] \left[1 + 0,55 \left(\frac{A}{A_0} \right)^2 \right], \quad (3.13)$$

kde A je plocha průtočného průřezu výřezu a A_0 je plocha průtočného průřezu přítokového koryta.



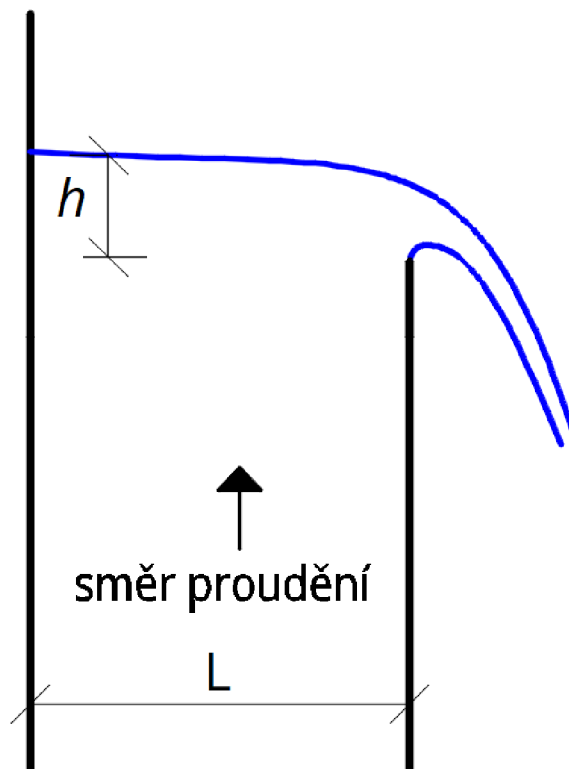
Obr. 3.8 Schéma podélného řezu

3.5 Pravoúhlé tenkostěnné přelivy s přítokovou šachtou

Schéma nátoku svislou šachtou je znázorněno na Obr. 3.9. V případě přítoku vody na přeliv svislou šachtou lze vyjít z rovnice 3.10 [15]. Součinitel přepadu je zde závislý na relativní délce šachty,

$$C_d = f\left\{\frac{h}{L}\right\}, \quad (3.14)$$

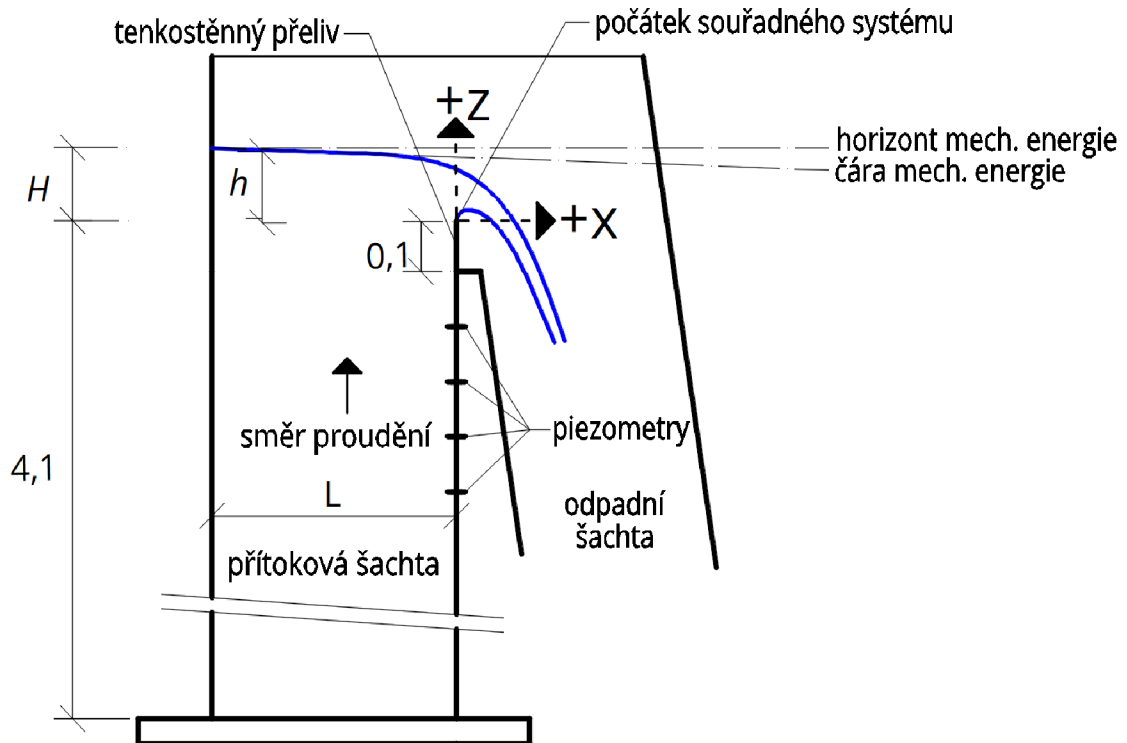
kde L je délka šachty (vodorovná vzdálenost od zadní stěny přítokové šachty k návodní stěně přelivu).



Obr. 3.9 Schéma nátoku šachtou

4 Experiment

4.1 Parametry modelu



Obr. 4.1 Schéma modelu

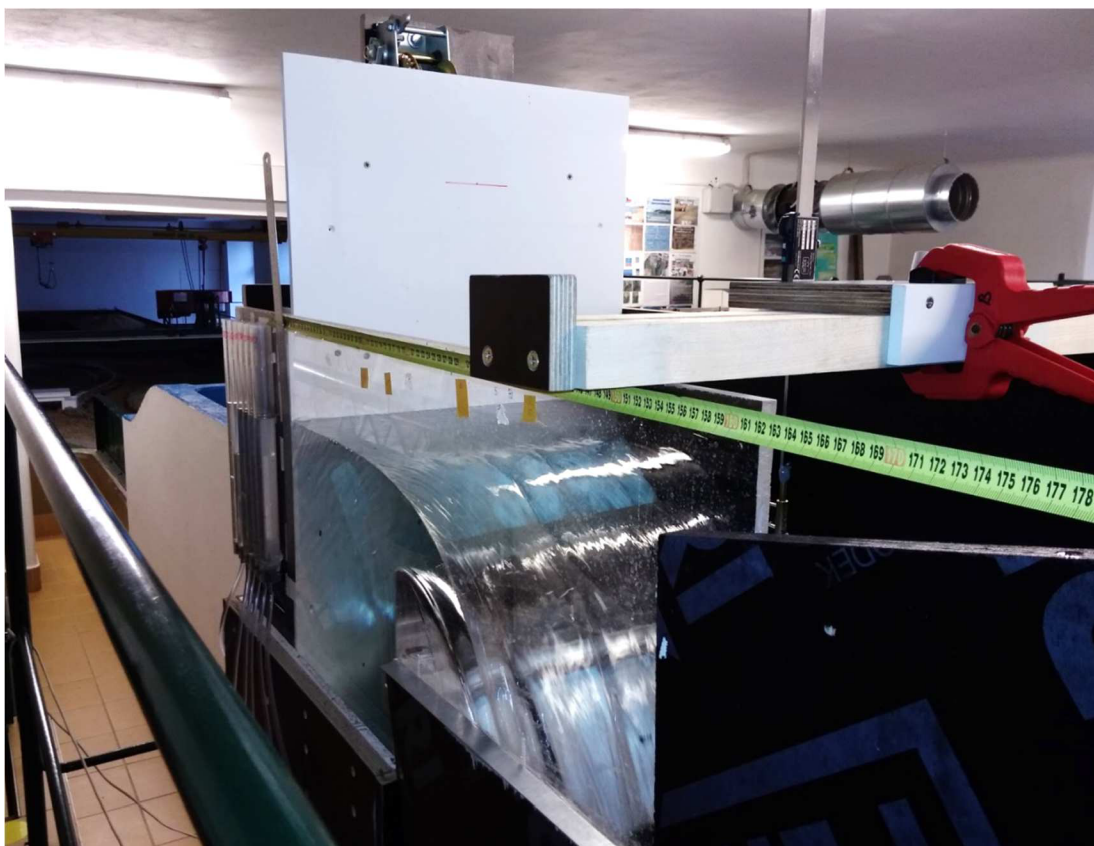
Experiment byl proveden v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Vzdálenost ode dna šachty po přelivnou hranu byla $4,1$ m. Stěny tvořila svislá šachta z vodovzdorné překližky s tloušťkou stěny $0,021$ m. Základní vnitřní rozměr šachty byl $b = 0,500$ m $L = 0,500$ m. Šachta je zobrazena na Obr 4.2. V šachtě se nacházela vnitřní posuvná stěna z PVC tloušťky $0,01$ m, která umožňovala změnu délky šachty. Spodní část posuvné stěny byla provedena se zalomením o 30° vůči svislé rovině tak, aby docházelo k minimálnímu ovlivnění proudění vody šachtou.



Obr. 4.2 Model šachty

V horní části šachty byl umístěn tenkostěnný pravoúhlý přeliv vyrobený z plechu z nerezové oceli tloušťky $t = 0,0012$ m. Pravá poproudňící stěna v okolí přelivu byla vytvořena z polymethylmetakrylátu (PMMA) tak, aby bylo možné pozorovat průběh hladiny. Boční stěny přelivu byly provedeny s převýšením 0,3 m nad korunu přelivu. Oblast, ve které probíhalo měření, je znázorněna na Obr. 4.3

Prostor pod dolní obálkou hladiny bylo nutné zavzdušnit PVC potrubím DN20, které bylo vytaženo nad úroveň bočních stěn přelivu. Přepad byl při všech měřených stavech dokonalý.



Obr. 4.3 Měřicí oblast

Přítoková šachta byla pomocí potrubí DN250 napojena na cirkulační okruh laboratoře. Voda byla čerpána ze zásobní nádrže ponornými čerpadly. Čerpadla byla vybavena řízením otáček motoru měničem frekvence tak, aby bylo možné nastavit požadovaný průtok.

Mezi přívodem vody v dolní části šachty a vnitřní posuvnou stěnou bylo umístěné kovové síto za účelem dosažení rovnoměrného proudění s vyvinutým rychlostním profilem ve svislé šachtě.

Odtok vody byl řešen jako přepad do volna, kdy byl dále za pomoci vodovzdorné překližky usměrněn do žlabu a odváděn zpět do zásobní nádrže.

4.2 Zhotovení experimentálního zařízení

Výroba modelu se skládala z mnoha dílčích činností:

1. Zhotovení šachty, přelivu a odpadní štol (vodovzdorná překližka, PVC, PMMA, ocelový plech a spojovací materiál).
2. Instalace svislé šachty na místo určení (umístění, vyrovnaní do svislé a vodorovné roviny a upevnění).
3. Instalace přelivné hrany a odpadní šachty (umístění, vyrovnaní, montáž a těsnění).
4. Instalace přívodního potrubí (umístění, vyrovnaní, podložení a upevnění proti posunům vyvolaných tlakem a dynamickými účinky vody).
5. Měření daných veličin.
6. Demontáž modelu.

4.3 Konstrukční požadavky na provedení přelivu dle normy

U konstrukce přelivu musí být zajištěna [1] vodotěsnost a pevnost průsečíků stěn přelivu se dnem a stěnami koryta. Přeliv musí odolávat maximálnímu průtoku bez deformací nebo porušení.

V případě potřeby zkrátit přítokové koryto (šachtu) je možno na přítoku osadit usměrňovače průtoku. Účelem těchto usměrňovačů je úprava proudu tak, aby došlo k pravidelnému a stálému rozložení rychlostí.

Usměrňovač by se měl skládat z minimálně 4 perforovaných desek instalovaných kolmo na směr přitékající vody, s minimálním prostorem mezi jednotlivými deskami 0,2 m. Otvory v desce by měly tvořit 40 % až 60 % celkové plochy desky.

Desky včetně jejich ukotvení by měly být dostatečně silné a pevné, aby odolávaly tlaku, který vyvolává přitékající voda.

Desky mohou být instalovány tak, že otvory jsou v řadě za sebou a voda v nich protéká přímo, nebo je možno je umístit s přesazením. Druhá možnost je použitelná za předpokladu, že vzdálenost mezi jednotlivými sousedními deskami je větší než průměr otvorů.

4.4 Měřicí přístroje

4.4.1 Digitální hrotové měřidlo

Pro měření úrovně hladiny bylo použité digitální hrotové měřidlo. Toto měřidlo bylo umístěno na konstrukci, která byla vedena nad měřeným prostorem. Konstrukce umožňovala posun měřicího zařízení v jedné ose-v popravním směru. U posuvné konstrukce bylo připevněno měřicí pásmo, pro přesný posun konstrukce. Po každém posunu byla konstrukce připevněna svorkami zamezujícími pohyb, který by vedl k nepřesnostem v měření.

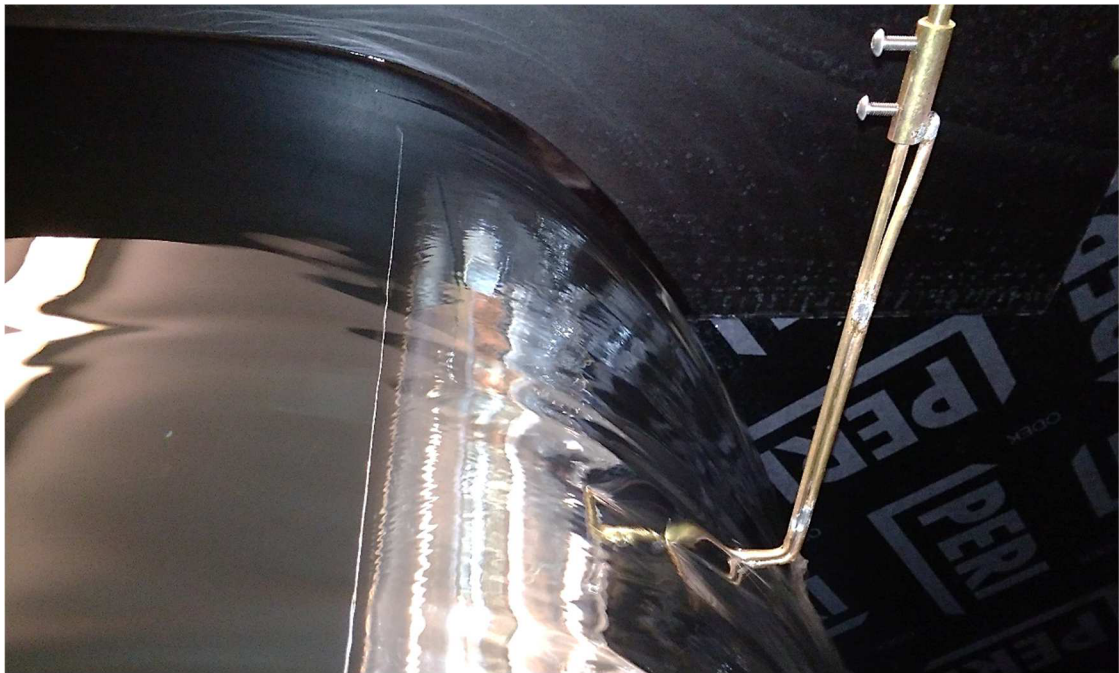
Výchozí nulová hodnota byla umístěna v úrovni koruny přelivu. Digitální hrotové měřidlo umožňovalo odečít hodnot s přesností na setiny milimetru. Chyba měření vlivem kolísání hladiny, provedení hrotu, rovnosti pojezdu a zkušenostem byla za ideálních podmínek odhadnuta na $\pm 0,1$ mm.

Měření horní hladiny probíhalo postupným přibližováním hrotu měřidla až k hladině. V momentě, kdy došlo ke styku kovového hrotu a vody, se na displeji odečetla daná úroveň hladiny [11]. V důsledku pulzací hladiny však tento předpoklad nebylo možno vždy splnit, v případě menších délek šachty a vyšších průtoků docházelo k velmi výraznému kolísání úrovně hladiny v průběhu času. Proto byla v těch případech zvolena metoda odborného odhadu střední hodnoty výšky úrovně hladiny. Vlivem smáčivosti a povrchového napětí došlo při styku kovového hrotu měřidla s vodou k následnému výstupu vody po stěně měřidla (tento jev se nazývá kapilární elevace). Na Obr. 4.4 je znázorněno hrotové měřidlo.

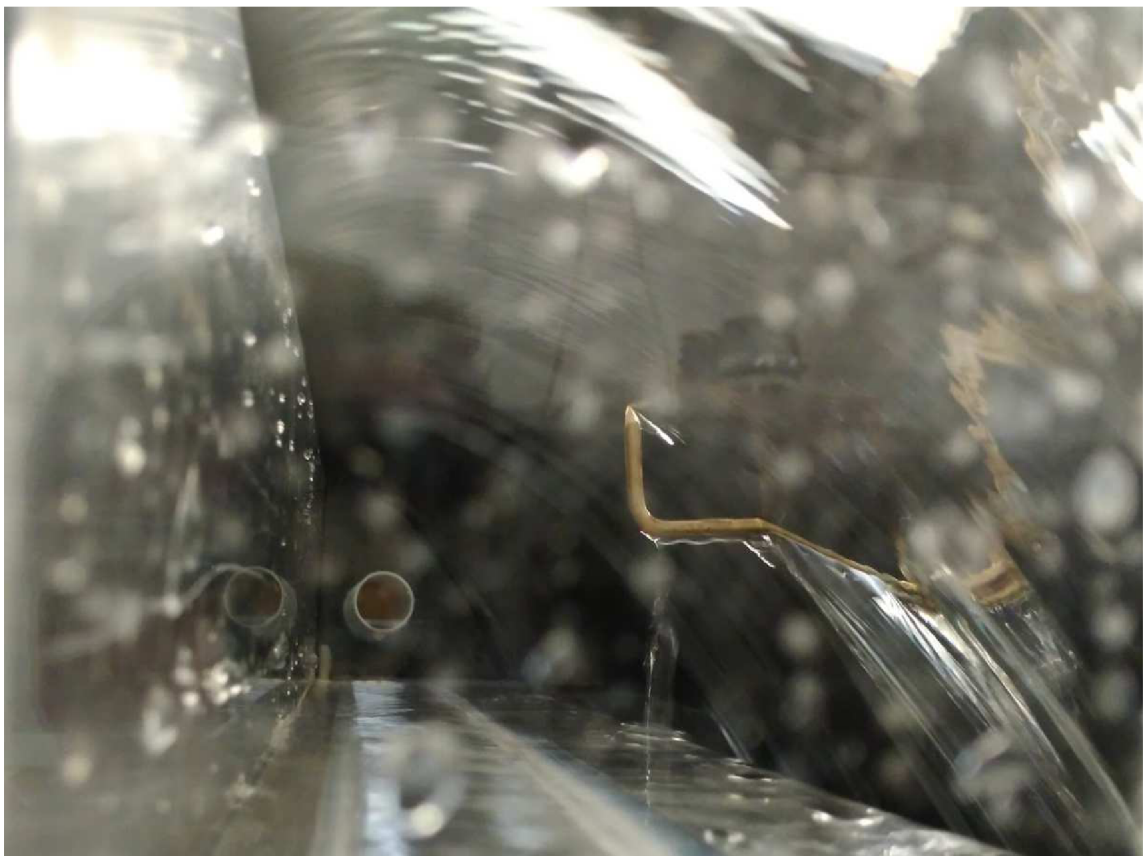


Obr. 4.4 Hrotové měřidlo

Pro měření dolní obálky vodního paprsku byl vyroben měřicí hák, který umožňoval měřit úroveň dolní obálky paprsku. Výchozí nulová hodnota byla též umístěna v úrovni koruny přelivu. Měření probíhalo postupným zvedáním hrotu až do stavu, kdy došlo ke styku kovového hrotu s dolní obálkou. Tento stav byl pozorován boční průhlednou částí stěny šachty, viz Obr. 4.6 (na obrázku je v zadní části patrné i zavzdušňovací potrubí) a současně pohledem shora. Citlivým posunem měřicího háku ve svislém směru byl nalezen stav, kdy hrot nevystupuje nad dolní obálku paprsku, ale pouze se jí dotýká. V této poloze došlo k zaznamenání hodnoty zobrazené na displeji digitálního měřidla.



Obr. 4.5 Měření dolní obálky paprsku mosazným hákem



Obr. 4.6 Boční pohled na měření dolní obálky paprsku

4.4.2 Indukční průtokoměr

V okruhu laboratoře je umístěn indukční průtokoměr s označením MQI 99-SMART N DN100 s výrobním číslem 08 700. Průtokoměr byl kalibrován laboratoří ENBRA, a.s. v rozmezí hodnot průtoku $Q = 0,004 \text{ m}^3/\text{s}$ až $Q = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$. Rozšířená nejistota měření U_b byla stanovena na hodnotu $\pm 0,22 \%$ při průtoku $0,004 \text{ m}^3/\text{s}$. Řídicí jednotka průtokoměru je zobrazena na Obr. 4.7. Příklad přírubového snímače průtokoměru je znázorněn na Obr. 4.8.



Obr. 4.7 Řídicí jednotka [16]



Obr. 4.8 Přírubový snímač [17]

4.4.3 Piezometrické trubice

Pro každý průtok a každou délku šachty byla měřena tlaková výška odečtem z piezometrických trubic. Piezometry byly osazeny pod korunou přelivu, napojení na konstrukci šachty bylo provedeno pomocí kovových trubiček, kdy byl vstup skrz vodovzdornou překližku zatěsněn silikonem. Piezometrické trubice byly umístěny v jedné rovině na tělese šachty. V jejich těsné blízkosti bylo osazeno ocelové měřidlo pro odečet piezometrických výšek h_{Piezo} v kladném směru osy z. Piezometry jsou zobrazeny na Obr. 4.9.



Obr. 4.9 Piezometrické trubice s osazeným ocelovým měřidlem

4.5 Postup měření

Měření na modelu probíhalo v následujících krocích:

1. Bylo provedeno vlastní měření fyzikálních veličin (průtok, úroveň hladiny, piezometrické výšky, délka a šířka šachty-ocelovým měřidlem).
2. Po naměření všech potřebných veličin došlo k posunu vnitřní pohyblivé stěny, jednalo se o 3 polohy (délka šachty $L = 0,2$ m, $0,3$ m a $0,5$ m).
3. Poté byla opakována měření potřebných fyzikálních veličin pro různé délky šachty.
4. Proběhlo zpracování naměřených hodnot pomocí programu Excel a byly vykresleny grafy průběhu hladiny v závislosti na délce šachty a průtocích.
5. Bylo provedeno vyhodnocení dat, jednalo se o stanovení vlivu poměru h/L na součinitel přepadu.
6. Následně byl stanoven tvar rovnice součinitele vlivu relativní délky šachty C_L , závislého na poměru h/L .
7. Byla stanovena mezní hodnota relativní délky šachty pro neovlivnění tvaru přepadového paprsku.
8. Byl vykreslen průběh dolní a horní obálky neovlivněného paprsku.

Měření úrovně hladiny probíhalo v podélné rovině symetrie šachty. Měřené body se od sebe nacházely $0,01$ m a to v místech, kde docházelo k výrazným změnám úrovně hladiny. Tento prostor je definován protiproudni vzdáleností $0,07$ m od hrany přelivu. Od tohoto místa probíhalo měření po-proudě ve stejném rastru vzdáleností až do odpadního žlabu.

V místech, kde již nedocházelo k výraznějším změnám úrovně hladiny, byly výšky měřeny po vzdálenostech $0,02$ m. Měření probíhalo vždy, až po ustálení průtoku. Měření úrovně hladiny bylo provedeno s odhadnutou chybou $0,1$ mm.

Měření bylo provedeno pro 3 délky šachty: $L = 0,2$; $0,3$ a $0,5$ m. Při každém stavu délky šachty bylo měřeno 5 různých průtoků: $Q = 0,020$; $0,030$; $0,040$ a $0,050$ m³/s.

Hodnoty odečtené při každém měření z piezometrických trubic jsou uvedeny v Tab. 4.1.

Tab. 4.1 Hodnoty piezometrických výšek

$L = 0,2 \text{ m}$		$L = 0,3 \text{ m}$		$L = 0,5 \text{ m}$	
$Q \text{ [m}^3\text{/s]}$	$h_{Piezo} \text{ [m]}$	$Q \text{ [m}^3\text{/s]}$	$h_{Piezo} \text{ [m]}$	$Q \text{ [m}^3\text{/s]}$	$h_{Piezo} \text{ [m]}$
0,02	0,078	0,02	0,079	0,02	0,079
0,03	0,100	0,03	0,103	0,03	0,105
0,04	0,118	0,04	0,124	0,04	0,125
0,05	0,136	0,05	0,143	0,05	0,143
0,06	0,147	0,06	0,149	0,06	0,160

Bylo zavedeno rozlišení měření následně: A, B, C značí délku šachty ($L = 0,2, 0,3$ a $0,5 \text{ m}$), hodnota 1-5 značí průtoky $Q = 0,020; 0,030; 0,040$ a $0,050 \text{ m}^3\text{/s}$. Písmeno a označuje dolní obálku paprsku, b značí horní obálku paprsku. Úrovně hladin byly měřeny v polovině šířky šachty.



Obr. 4.10 Průběh hladiny při $L = 0,3 \text{ m}$



Obr. 4.11 Průběh hladiny při $L = 0,2 \text{ m}$ a $Q = 0,06 \text{ m}^3/\text{s}$

5 Vyhodnocení

5.1 Vykreslení průběhu hladin

Vyhodnocení naměřených veličin bylo provedeno pomocí programu MS Excel. U každé jednotlivé délky šachty byl vytvořen graf, znázorňující průběh horní i dolní obálky paprsku v absolutním i relativním vyjádření.

Absolutní vyjádření znázorňuje skutečně naměřené úrovně hladiny, kde počátek vykreslení průběhu horní o dolní obálky paprsku se nachází v návodní hraně tenkostěnného pravoúhlého přelivu.

V případě relativního znázornění průběhu horní i dolní obálky paprsku byly na vodorovnou osu s označením x^* , vyneseny hodnoty přepočtené ve vztahu k přepadové piezometrické výšce h_{Piezo} , dle vztahu

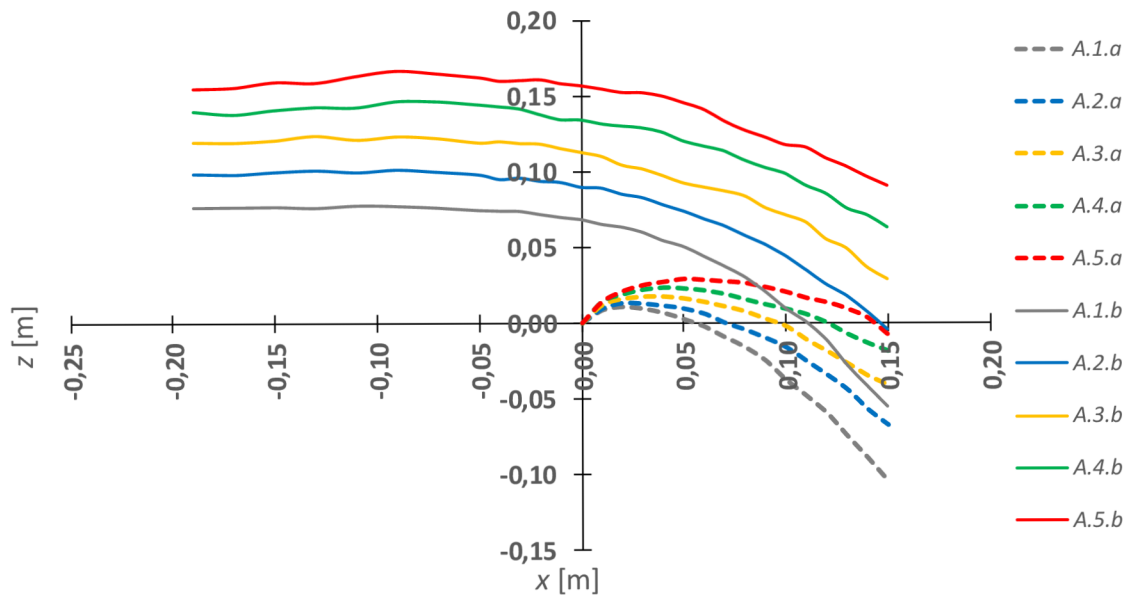
$$x^* = x / h_{Piezo} . \quad (5.1)$$

Kladné hodnoty byly v poproudním směru a záporné hodnoty protiproudě od přelivu, směrem ke stěně šachty.

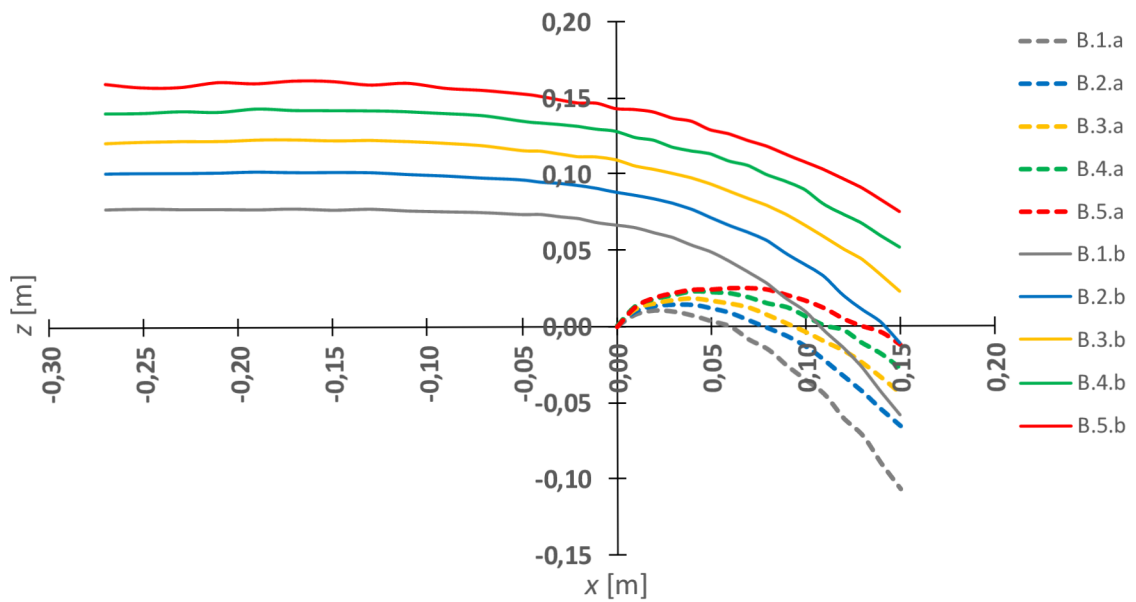
Na svislou osu s označením z^* byl vynesen poměr naměřené svislé vzdálenosti úrovně hladiny od přelivné hrany v daném místě vůči přepadové piezometrické výšce h_{Piezo} , dle vztahu

$$z^* = z / h_{Piezo} . \quad (5.2)$$

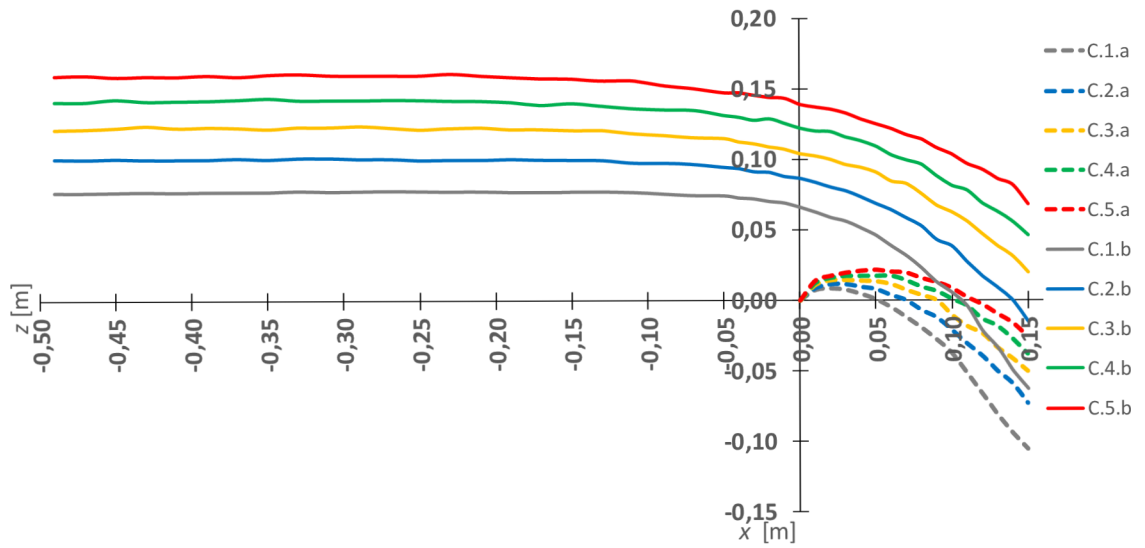
Kladné hodnoty byly u měření, které probíhalo nad korunou přelivu, záporné hodnoty při měření pod úrovní koruny přelivu. Na Obr. 5.1 až Obr 5.6 je zakreslen průběh horní i dolní obálky paprsku-v absolutním i relativním vyjádření.



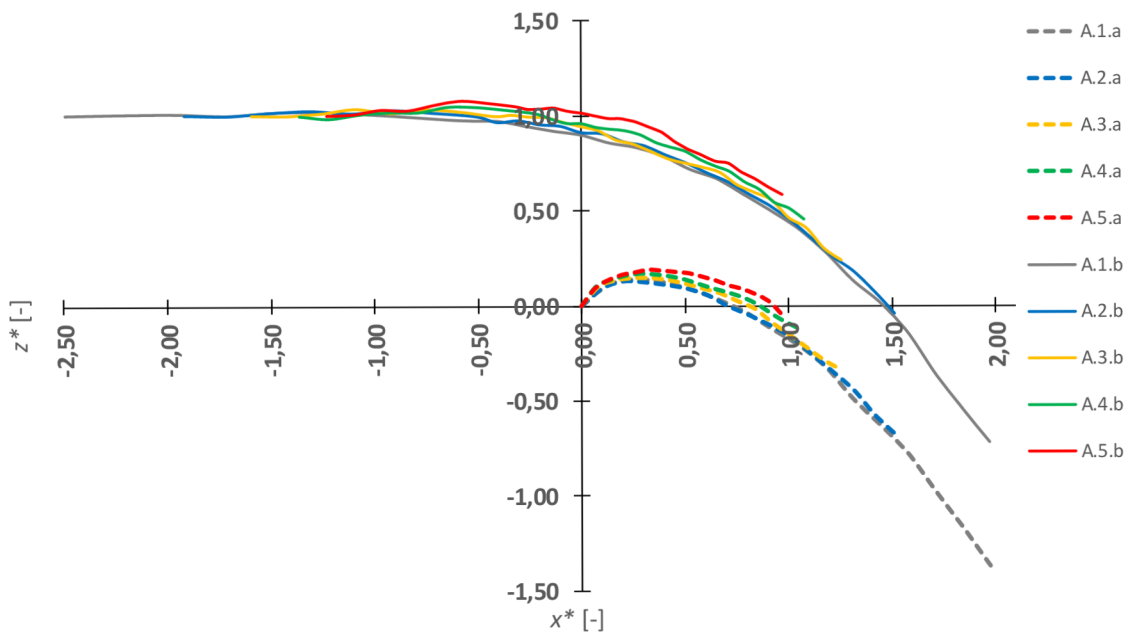
Obr. 5.1 Průběh dolní a horní obálky paprsku v absolutním vyjádření pro $L = 0,2$ m



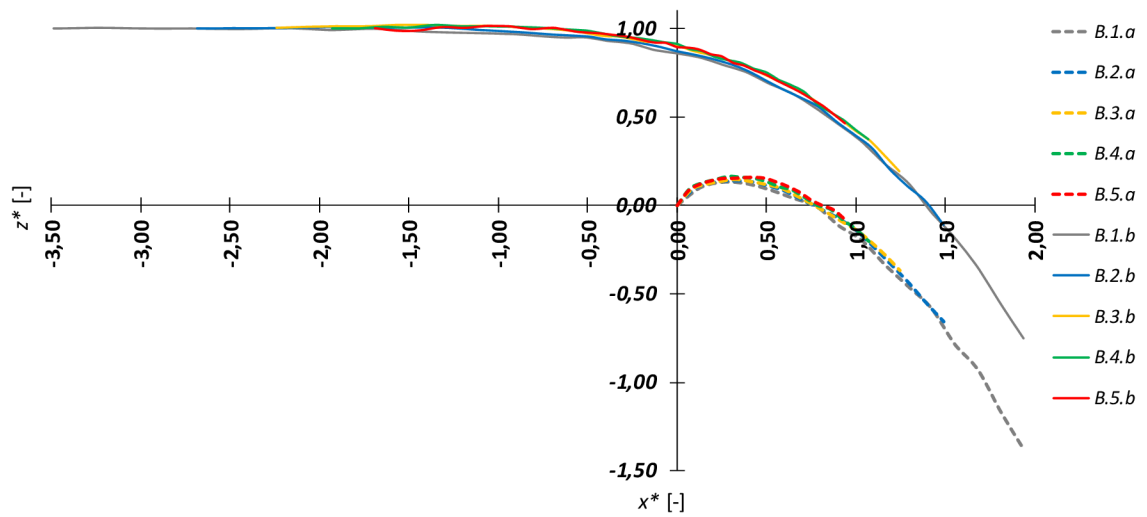
Obr. 5.2 Průběh dolní a horní obálky paprsku v absolutním vyjádření pro $L = 0,3$ m



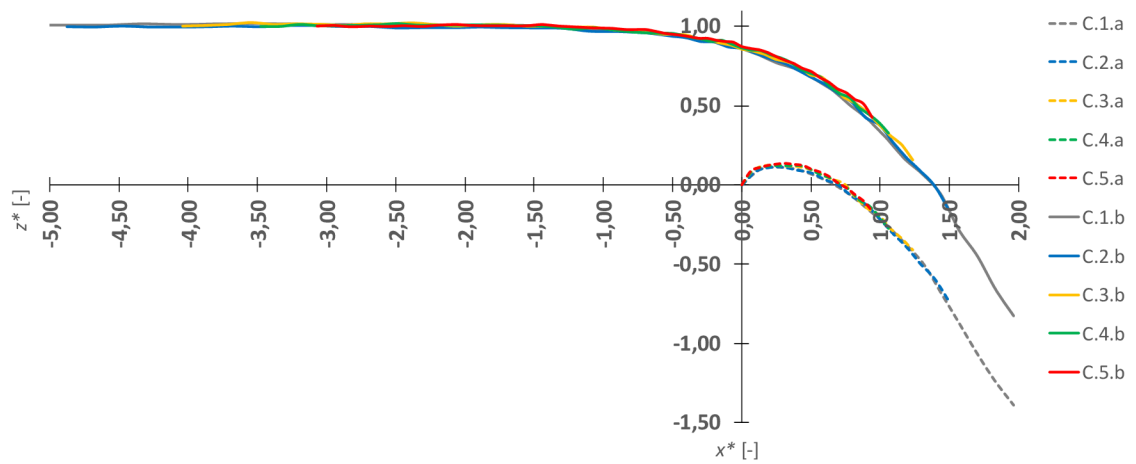
Obr. 5.3 Průběh dolní a horní obálky paprsku v absolutním vyjádření pro $L = 0,5$ m



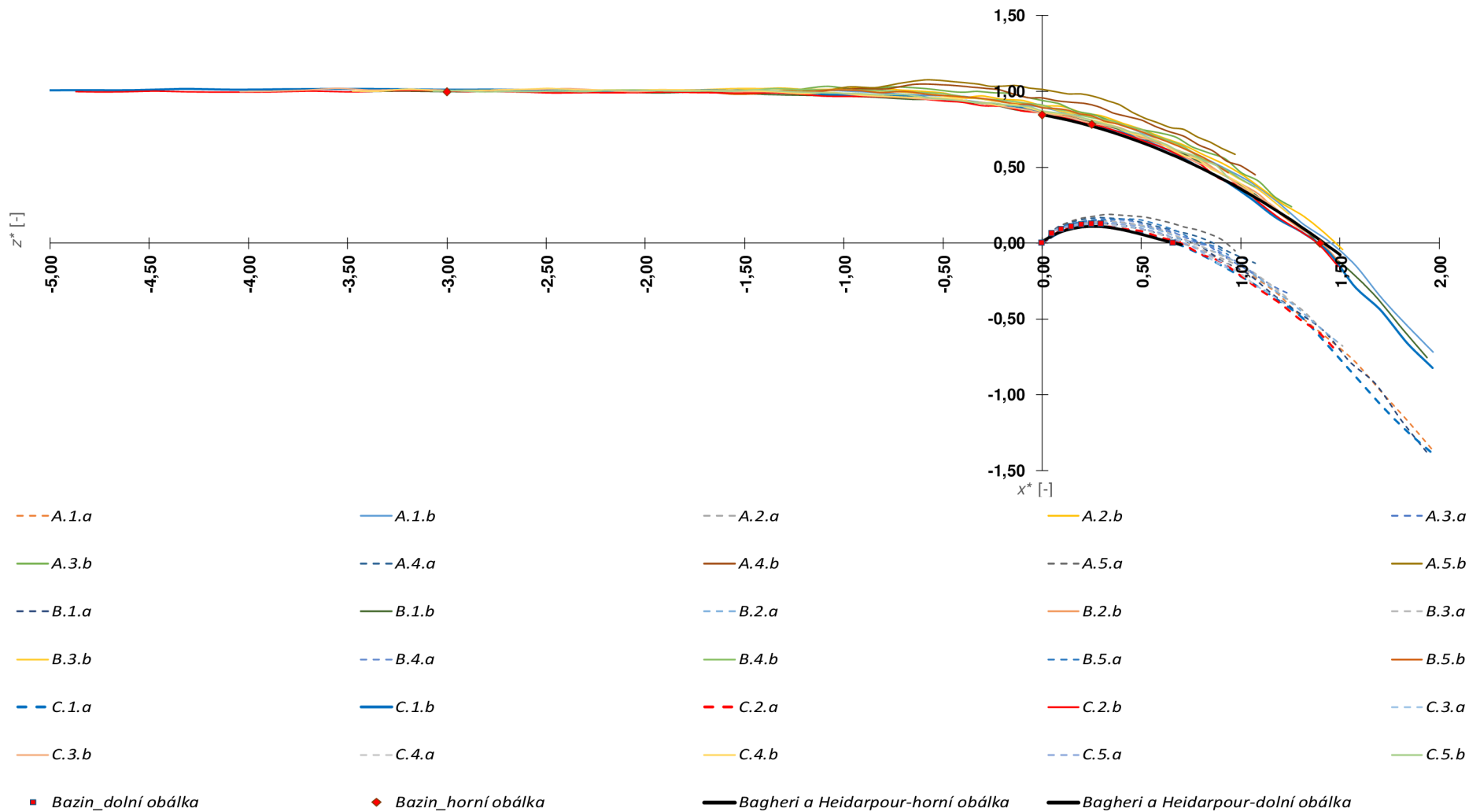
Obr. 5.4 Průběh dolní a horní obálky paprsku v relativním vyjádření pro $L = 0,2$ m



Obr. 5.5 Průběh dolní a horní obálky paprsku v relativním vyjádření pro $L = 0,3$ m



Obr. 5.6 Průběh dolní a horní obálky paprsku v relativním vyjádření pro $L=0,5$ m



Obr. 5.7 Průběh dolní a horní obálky paprsku v relativním vyjádření pro všechny délky šachty L a průtoky Q

Na obr. 5.7 je vložen průběh horní i dolní obálky paprsku pro poměr $b/B = 1$ a nátok korytem, který v roce 2010 stanovili autoři Bagheri a Heidarpour [13]. Autoři publikovali pouze průběh od počátku do vzdálenosti 0,7 na ose x^* a pouze kladné hodnoty na svislé ose z^* . Průběh horní obálky paprsku popsali autoři rovnicí ve tvaru

$$z/h = -0,251 \left(x/h_{\text{piezo}} \right)^2 - 0,239 \left(x/h_{\text{piezo}} \right) + 0,846. \quad (5.3)$$

Průběh dolní obálky paprsku má tvar

$$z/h = 1,318 \left(x/h_{\text{piezo}} \right)^3 - 2,205 \left(x/h \right)^2 + 0,865 \left(x/h_{\text{piezo}} \right) \quad (5.4)$$

Z grafu je patrné, že průběh horní i dolní křivky dle autorů se nejvíce ztotožňuje s křivkami *C.1.b* a *C.2.b*. Podobnost je způsobena největší délkou šachty ($L = 0,5$ m) a zároveň dvěma nejnižšími hodnotami průtoku ($Q = 0,02$ m³/s a $0,03$ m³/s). Je to způsobeno faktem, že čím větší je délka šachty a menší přepadová výška, tím více se průběh obálek paprsku bude podobat nátoku korytem na vysoký přeliv, což je způsob nátoky, který autoři zkoumali.

V grafu jsou pomocí bodů vyneseny i průběhy horní i dolní obálky paprsku, které stanovil Bazin pro případ nátoky korytem.

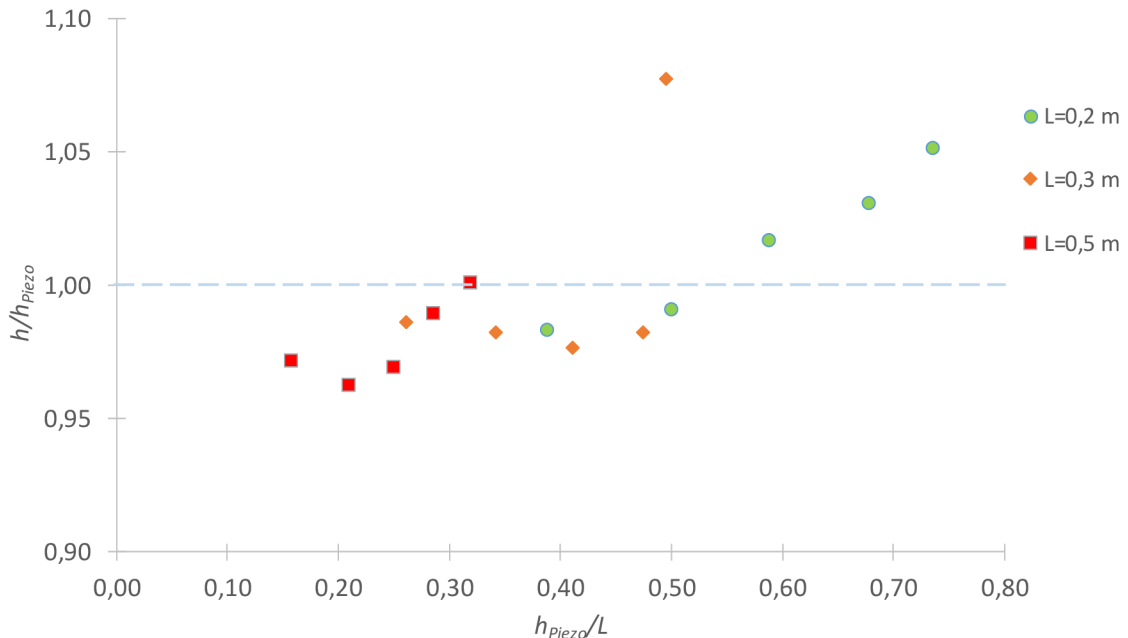
Z grafů je patrné, že se zvětšující se délkou přítokové šachty, dochází k vyrovnanějšímu průběhu hladiny a nejsou zde patrné výraznější odchylky. Současně jsou u nižších průtoků patrné menší výchylky v úrovni horní i dolní obálky paprsku, než v případě vyšších hodnot průtoku.

5.2 Poměr přepadové výšky určené z měření hladiny v šachtě a z měření hladiny v piezometru

Poměr přepadové výšky naměřené hrotovým měřidlem v šachtě a výšky odečtené z piezometrické trubice s označením 200 je zobrazen na Obr. 5.8.

Hodnota poměru naměřených hodnot hrotovým měřidlem v šachtě a odečtem z piezometru se s rostoucím poměrem h_{piezo}/L zvětšuje. Chybu v měření je možno považovat za zanedbatelnou do hodnoty $h_{\text{piezo}}/L = 0,475$ (chyba nabývá hodnoty max. 3,5%). Pro délku šachty $L = 0,2$ m, nabývá chyba hodnot max. 3,5 %. Pro délku šachty $L = 0,3$ m, je max. chyba 8 %, která je

zřejmě způsobena chybou v odečtu výšky hladiny v piezometru u měření s označením B.5 ($Q = 0,060 \text{ m}^3/\text{s}$). Pro délku šachty $L = 0,5 \text{ m}$ je max. chyba 5 %. Rozptyl hodnot je pravděpodobně dán nepřesnostmi při odečtu rozkolísané úrovně hladiny nebo při odečtu z piezometru.



Obr. 5.8 Závislost poměru h_{Piezo}/L na h/h_{Piezo}

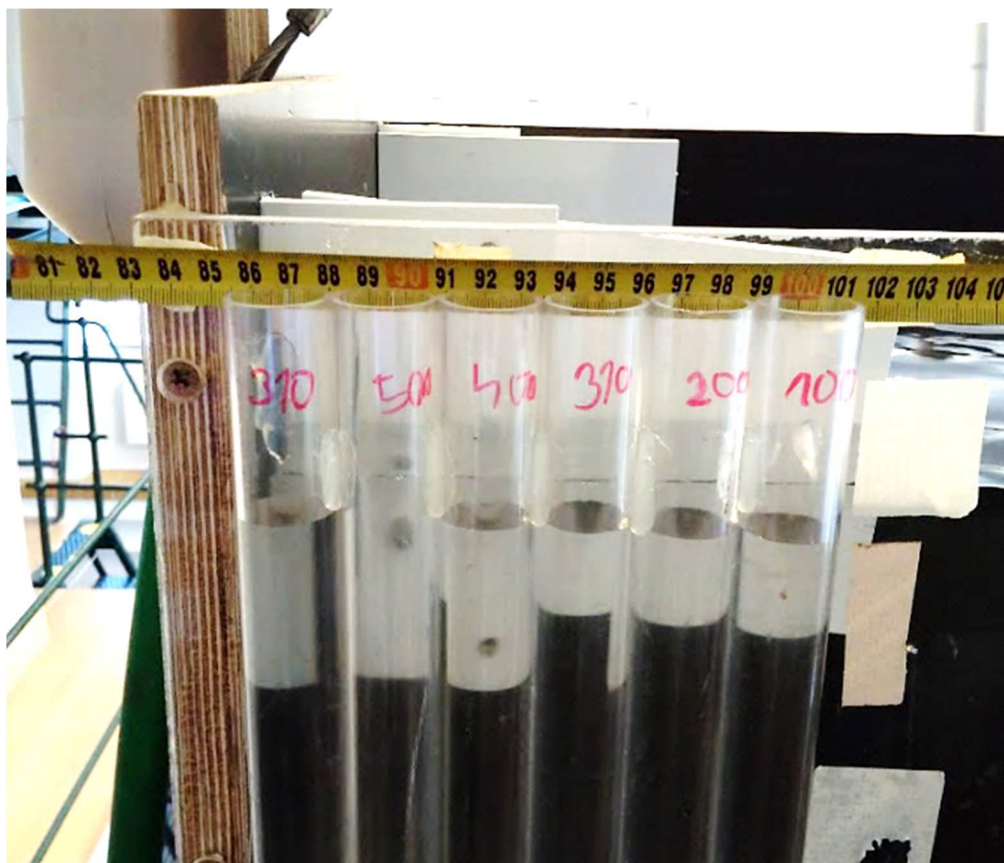
5.3 Stanovení součinitele přepadu

Je možno konstatovat, že v případě nekonečně velké délky L (zanedbatelně malý poměr h/L) bude součinitel C_d nabývat stejných hodnot, jako v případě nátoky korytem na relativně vysoký přeliv. Pro jiné poměry h/L však nelze teoreticky odvodit žádnou závislost. Proto byla stanovena z dat změřených na modelu.

Při stanovení součinitele přepadu C_d bylo možno vycházet z naměřených hodnot pomocí hrotového měřidla v šachtě h , nebo bylo možno použít hodnotu z piezometrické trubice h_{Piezo} .

Vzhledem k rozkolísanosti hladiny u menších délek šachty, nebo při vyšších průtocích a s tím souvisejících nepřesnostech v odečtu přímo měřené přepadové výšky byly pro následující výpočty použity výšky z piezometru s označením 200 (piezometr umístěný 0,3 m pod úrovní přelivu).

Poloha piezometru s ozn. 200 byla též vyjádřena relativně jako h_{Piezo}/L . Přepočítání na relativní měřítko vznikl poměrem maximální přepadové výšky odečtené daným piezometrem za všech měřených stavů, vůči svislé vzdálenosti piezometru od koruny přelivu. Hodnota h_{Piezo}/L se pohybovala v rozmezí $0,258 < h_{Piezo}/L < 0,495$.



Obr. 5.8 Trubice piezometrů

Vyjádřením ze vztahu 3.10 byl odvozen vztah pro výpočet součinitele přepadu C_d

$$C_d = \frac{Q}{\sqrt[2]{3} \sqrt{2g} b (h_{Piezo})^{3/2}} \quad (5.5)$$

Pro každou délku šachty L a každý průtok Q byl spočten poměr h_{Piezo}/L . Rovnice pro stanovení součinitele průtoku C_d byla rozšířena o člen C_{Lr} , tedy

$$C_d = C_{d0} C_{Lr} \quad (5.6)$$

kde C_{d0} je součinitel přepadu pro přeliv neovlivněný výškou přelivu v případě přítoku korytem (vysoký přeliv) a pro přeliv neovlivněný délkou šachty v případě přítoku šachtou. Z literatury [1] byla zjištěna výchozí hodnota hodnota C_{d0} dle Rehbocka jako $C_{d0} = 0,602$.

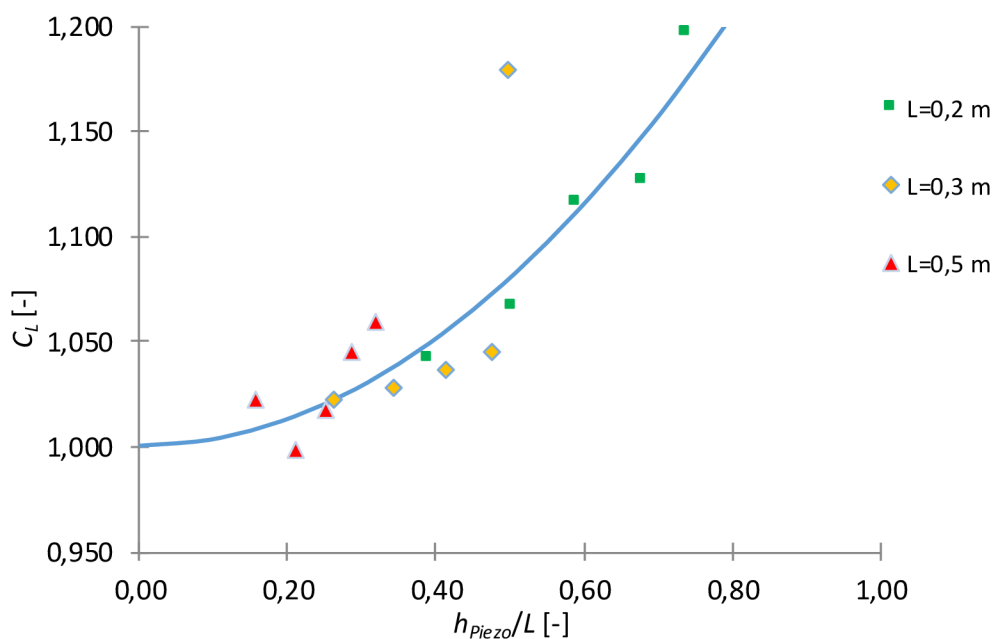
Vyjádřením ze vztahu 5.6 vznikl vztah

$$C_L = \frac{C_d}{C_{d0}}, \quad (5.7)$$

V tabulce 5.1 byl proveden výpočet součinitele C_L dle vztahu 5.6. Následně bylo provedeno zpětné dopočítání průtoku dle rovnice 3.13, čímž byla ověřena správnost stanovení součinitele. Největší rozdíly oproti skutečně převáděnému průtoku byly vypočteny u každé jednotlivé délky šachty vždy u 2 nejvyšších průtoků. Je to způsobené tím, že při těchto průtocích docházelo k výraznějším pulzacím proudu, které mohly mít vliv na odečet přepadové výšky h_{Piezo} . Dále se při vyšších průtocích více projevuje rozšířená nejistota měření průtokoměru, která činí 0,22 %.

Tab. 5.1 Výpočet součinitele průtoku C_L

C_{d0}		0,602		Výpočet		Zpětné ověření		
	Q [m ³ /s]	h_{Piezo} [m]	h_{Piezo}/L [-]	C_d [-]	$C_L = C_d/C_{d0}$ [-]	C_L [-]	C_d [-]	Q [m ³ /s]
L = 0,2 m	0,02	0,078	0,381	0,628	1,043	1,046	0,630	0,020
	0,03	0,100	0,496	0,643	1,067	1,079	0,649	0,030
	0,04	0,118	0,598	0,673	1,117	1,114	0,671	0,041
	0,05	0,136	0,699	0,679	1,128	1,156	0,696	0,054
	0,06	0,147	0,773	0,721	1,198	1,191	0,717	0,064
L = 0,3 m	0,02	0,079	0,258	0,616	1,023	1,021	0,615	0,020
	0,03	0,103	0,336	0,619	1,029	1,036	0,624	0,029
	0,04	0,124	0,402	0,624	1,037	1,052	0,633	0,039
	0,05	0,143	0,467	0,630	1,046	1,070	0,644	0,050
	0,06	0,149	0,533	0,710	1,180	1,091	0,657	0,062
L = 0,5 m	0,02	0,079	0,153	0,616	1,023	1,007	0,606	0,019
	0,03	0,105	0,201	0,601	0,999	1,013	0,610	0,029
	0,04	0,125	0,242	0,613	1,018	1,019	0,613	0,038
	0,05	0,143	0,282	0,630	1,046	1,025	0,617	0,048
	0,06	0,160	0,319	0,638	1,060	1,033	0,622	0,059



Obr. 5.9 Graf závislosti h_{piezo}/L na C_L

Hodnotami zobrazenými v grafu na Obr. 5.9 byla proložena obecná mocninná funkce

$$C_L = a(h_{piezo}/L)^b + 1, \quad (5.8)$$

přičemž se měnily koeficienty a , b tak, aby průběh spojnice trendu nejvíce vystihoval trend vynesných vypočtených hodnot.

Tab. 5.2 Průběh aproximační křivky

a	0,32
b	2

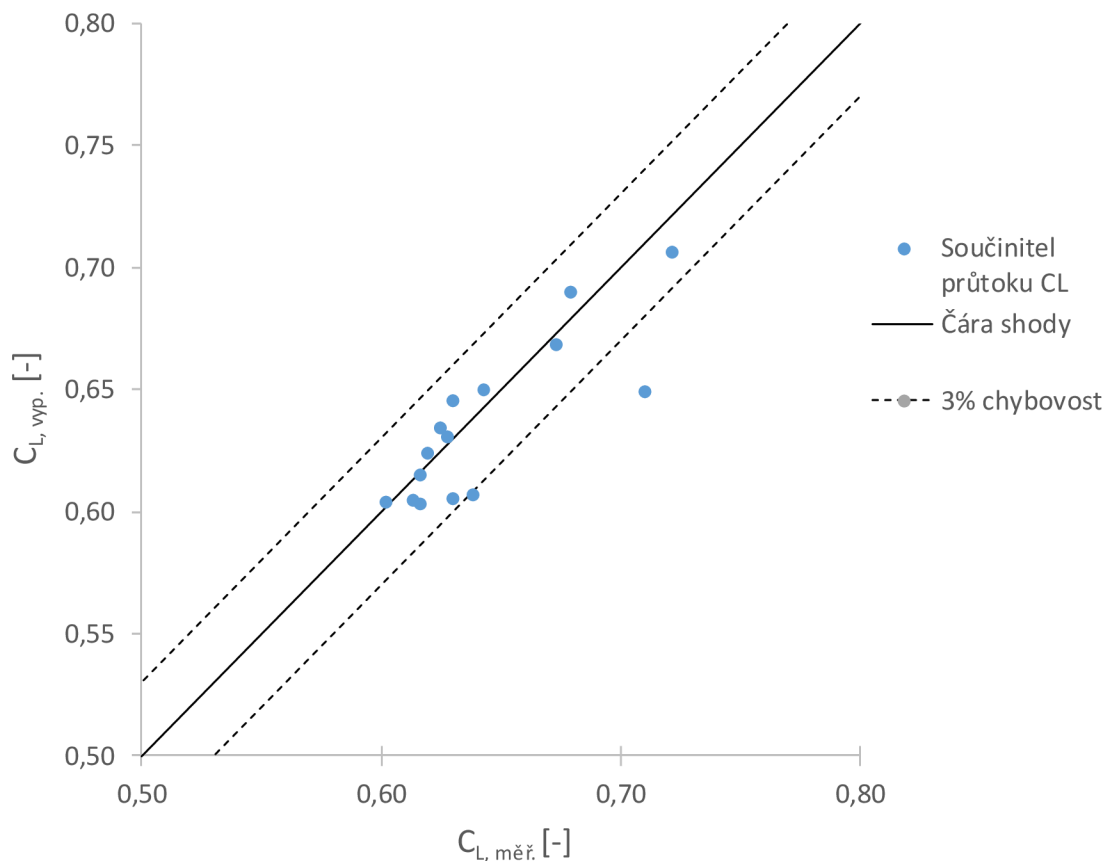
h_{piezo}/L [-]	C_L [-]
0,00	1,000
0,10	1,003
0,20	1,013
0,30	1,029
0,40	1,051
0,50	1,080
0,60	1,115
0,70	1,157
0,80	1,205

Rovnice aproximační křivky je ve tvaru

$$C_L = 1 + 0,32 \left(\frac{h_{\text{piezo}}}{L} \right)^2 \quad (5.9)$$

Koeficient determinace nabývá hodnoty 0,926.

Byl vytvořen graf pro porovnání naměřených a vypočtených hodnot součinitele vlivu relativní délky šachty C_L . Do grafu byly zaneseny křivky 3% chyby. 2 měření, která vybočují z daného prostoru chybovosti, jsou hodnoty součinitele průtoku stanovené z měření o označení B.5 a C.5. Tato odchylka je zřejmě způsobená chybou v odečtení piezometrické výšky, jelikož se jednalo o měření s největšími průtoky ($Q = 0,06 \text{ m}^3/\text{s}$).



Obr. 5.10 Poměr naměřených a spočtených hodnot C_L

5.4 Mezní hodnota relativní délky šachty pro neovlivnění tvaru přepadového paprsku

Pro stanovení mezní hodnoty relativní délky šachty, kdy nedochází k ovlivnění tvaru přepadového paprsku, byly vytvořeny 2 grafy. Pro horní obálku paprsku v místě nad přelivnou hranu a pro dolní obálku v místě, kde tvar obálky paprsku nabýval maximální hodnoty. Hodnoty byly přepočteny relativně v závislosti na hodnotě z_o^* , což je výška neovlivněná relativní délkou šachty.

Každým jednotlivým průběhem dolní obálky paprsku v absolutním vyjádření byl proložen polynom 4. stupně a pomocí analytického nástroje Řešitel byla v programu MS Excel stanovena maximální hodnota, kdy se paprsek nacházel nejvýše (v místě, kde $z^* = \max.$). Jako hodnota $z_{o,vrchol}^*$ byla použita maximální hodnota úrovně dolní obálky paprsku stanovená Bagheri a Heidarpourem.

V případě horní obálky, byl každým vykresleným průběhem horní obálky paprsku proložen polynom 4. stupně a stanovena hodnota v místě ležícím přímo nad přelivnou hranou (v místě, kde $x^* = 0$ m). Jako hodnota $z_{o,vrchol}^*$ byla použita hodnota úrovně horní obálky paprsku v místě nad přelivnou hranou stanovená Bagheri a Heidarpourem.

Z dat byly vytvořeny 2 grafy pro dolní i horní obálku paprsku. Vykreslení dolní obálky bylo vztažené k maximální hodnotě $z_{o,vrchol}^*$ které dosáhne křivka průběhu dolní obálky stanovená Bagheri a Hedairpourem.

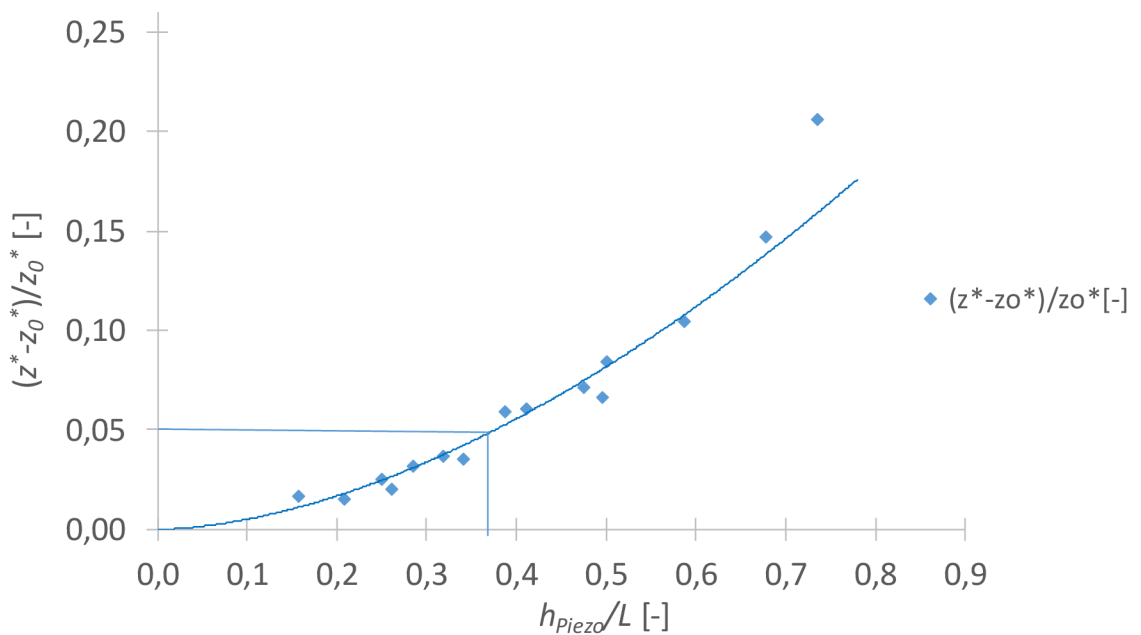
Vykreslení horní obálky paprsku bylo vztažené k hodnotě $z_{o,koruna}^*$, které nabývala křivka stanovená Bagheri a Hedairpourem v místě nad korunou přelivu.

Následně byla vyneseny daty proložena spojnice trendu v exponenciálním tvaru.

Tab. 5.3 Mezní hodnota relativní délky šachty pro neovlivnění tvaru
přepadového paprsku horní a dolní obálky paprsku

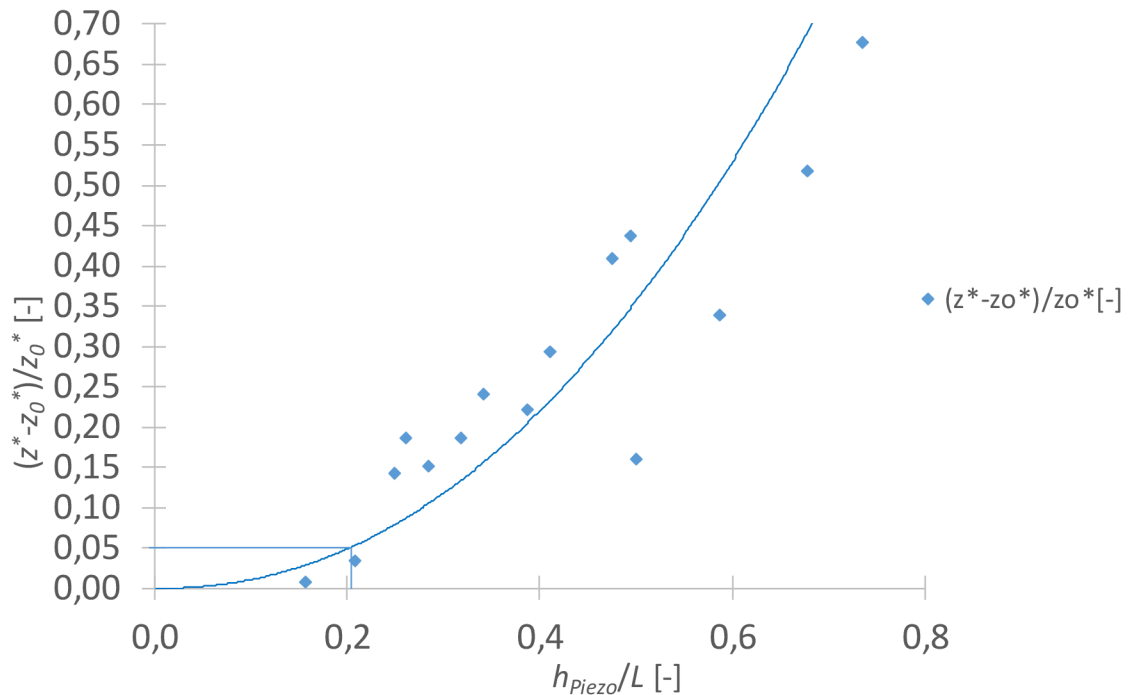
Bagheri a Heidarpour					
$z_{0,koruna}^*$		0,846			
$z_{0,vrchol}^*$		0,112			
		Horní obálka- Nad korunou přelivu		Dolní obálka- Vrchol paprsku	
Ozn.	h_{Piezo}/L [-]	z^* [-]	$(z^* - z_0^*)/z_0^*$ [-]	z^* [-]	$(z^* - z_0^*)/z_0^*$ [-]
A.1	0,388	0,896	0,059	0,137	0,223
A.2	0,500	0,917	0,084	0,130	0,161
A.3	0,588	0,934	0,104	0,150	0,339
A.4	0,678	0,970	0,147	0,170	0,518
A.5	0,735	1,020	0,206	0,188	0,679
B.1	0,262	0,863	0,020	0,133	0,188
B.2	0,342	0,876	0,035	0,139	0,241
B.3	0,412	0,897	0,060	0,145	0,295
B.4	0,475	0,906	0,071	0,158	0,411
B.5	0,495	0,902	0,066	0,161	0,438
C.1	0,157	0,860	0,017	0,113	0,009
C.2	0,209	0,859	0,015	0,116	0,036
C.3	0,250	0,867	0,025	0,128	0,143
C.4	0,285	0,873	0,032	0,129	0,152
C.5	0,319	0,877	0,037	0,133	0,188

Změna polohy zvolených bodů je v obou případech plynulá, nelineárně se zvětšující, nelze stanovit oblast, kde by byla beze změny. Nárůst relativní chyby je však pro horní a dolní obálku paprsku jiný. Proto pro specifikování rozdílnosti nárůstu byla zvolena 5% relativní chyba.



Obr. 5.10 Horní obálka-v místě nad přelivem

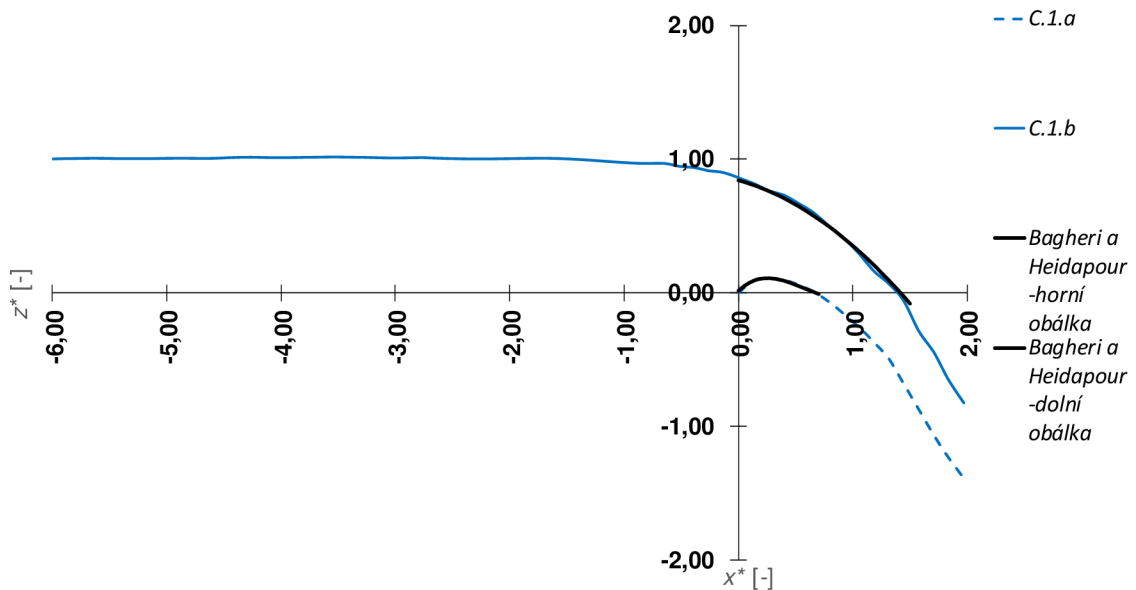
V případě horní obálky ve vzdálenosti $x^* = 0$ je možno konstatovat, že velikosti relativní chyby 5 % nastává při $h_{piezo}/L = 0,374$. Pro hodnoty menší je průběh hladiny bez větších výchylek a je nejvíce podobný průběhu křivek, které stanovili Bagheri a Heidarpour. Jedná se o všechny stavy měřené pro délku šachty $L = 0,5$ m (C.1.b až C.5.b). Dále tento parametr splňují první dvě měření u délky šachty $L = 0,3$ m (B.1.b a B.2.b). Je to způsobeno malou hodnotou rychlostní výšky a jejím malým vlivem na průběh horní obálky paprsku.



Obr. 5.11 Dolní obálka-v místě maximální výšky obálky paprsku

V případě dolní obálky je možno konstatovat, že relativní chyba 5 % nastává při $h_{piezo} / L = 0,204$. Pro hodnoty menší, je průběh hladiny bez větších výchylek. Počet stavů, které splňují 5% relativní chybu v případě dolní obálky paprsku je menší, než v případě horní obálky paprsku. Rozdíl je způsobený tím, že rychlostní výška je v blízkosti koruny přelivu větší než v blízkosti hladiny. Měření, které splňuje uvedenou relativní chybu je pouze C.1.a, kdy měla šachta největší délku ($L = 0,5$ m) a zároveň nejnižší průtok ($Q = 0,02$ m³/s). Při větších průtocích, nebo menších délkách šachty už je hodnota relativní chyby větší.

5.5 Tvar dolní a horní obálky neovlivněného paprsku



Obr. 5.12 Průběh horní a dolní obálky neovlivněného paprsku

Z výše provedené analýzy vyplynulo, že nelze nalézt oblast s neovlivněným tvarem paprsku. Z uvedeného důvodu bylo pro porovnání s neovlivněným tvarem paprsku stanoveným autory Bagheri a Heidarpour vybráno měření s nejnižší hodnotou h_{Piezd}/L , které se neovlivněnému paprsku blíží nejvíce. Jednalo se o měření C.1.a, kde byl poměr $h/L = 0,157$, $L = 0,5$ m a průtok $Q = 0,02$ m³/s. Je to způsobené tím, že toto měření s nejnižší hodnotou h/L se nejvíce blíží přepadu s přítokem korytem.

6 Závěr a zhodnocení

6.1 Závěr

Cílem diplomové práce bylo stanovení součinitele přepadu pro tenkostěnný pravoúhlý přeliv bez bočního zúžení s přítokem svislou šachtou. Pro stanovení součinitele přepadu C_d byla použita rovnice (5.5) a zvolen koncept zavedení základního součinitele přepadu C_{d0} pro přeliv neovlivněný relativní délkou přítokové šachty a opravného součinitele vyjadřujícího vliv relativní délky šachty, tedy součinitele vlivu relativní délky šachty C_L . Pro stanovení součinitele byla jako výchozí hodnota použita hodnota dle Rehbocka $C_{d0} = 0,602$. Součinitele vlivu relativní délky šachty byl stanoven proložením vypočtených hodnot C_L v závislosti na h/L pomocí aproximační mocninné funkce (5.8).

Průtok byl měřen indukčním průtokoměrem, piezometrická výška pomocí piezometrických trubic, průběh dolní a horní obálky paprsku hrotovým měřidlem a rozměry šachty ocelovým měřidlem. Pro vyhodnocení přepadové výšky byl použit piezometr s označením 200, který se nacházel v hloubce 0,3 m pod korunou přelivu.

Průběh obálek paprsku byl stanoven na základě měření horní i dolní obálky paprsku pro různé průtoky a různé délky šachty. Pro měření horní obálky paprsku bylo využito digitálního hrotového měřidla s rovným hrotem, pro měření dolní obálky paprsku bylo využito mosazného háku. Byly znázorněny průběhy horní i dolní obálky paprsku pro všechna měření. Průběhy byly zakresleny samostatně pro jednotlivé délky šachty a průtoky v grafech v absolutním i relativním zobrazení. Byl vytvořen souhrnný v graf, který zahrnoval všechny měřené stavy v relativním zobrazení, včetně porovnání průběhu s křivkami Bazina a křivkami stanovenými Bagheri a Heidarpourem.

Bylo stanoveno, že nelze najít na základě provedených měření mezní hodnotu relativní délky šachty pro neovlivnění tvaru přepadového paprsku, protože změna je plynulá.

Byl stanoven rozsah h_{piezo}/L , kdy lze stanovit přepadovou výšku měřením hladiny v šachtě i piezometrem s relativní chybou přepadové výšky do 3,5 %. Stanovený součinitel vlivu relativní délky šachty je pak možné použít i pro výpočet průtoku v místech, kde dochází ke svislé dopravě vody a nelze použít piezometru. Bylo by například možné osadit uzavřený požerák v horní části ultrazvukovým snímačem polohy hladiny a při znalosti šířky šachty poté jednoduše stanovit odtok z nádrže.

6.2 Zhodnocení

Naměřené hodnoty přepadové výšky se pohybovaly od hodnot $h = 0,076$ m při průtoku $Q = 20$ l/s a délce šachty $L = 0,2$ m až po hodnotu $h = 0,160$ m při průtoku $Q = 60$ l/s a délce šachty $L = 0,5$ m.

Rozsah měřených hodnot je od poměru $h/L = 0,157$ až do $0,735$. Měření nižších poměrů než je dolní hranice rozsahu měření by bylo méně přesné z důvodu vlivu povrchového napětí a tření, přepadová výška by nesplnila požadavek na minimální přepadovou výšku $h > 0,06$ m. Pokud by se poměr h/L blížil hodnotě 0, jednalo by se o přítok šachtou, jejíž délka by byla nekonečně velká a přepad by se nejvíce blížil případu přítoku korytem. V laboratoři nebyl model uzpůsobený pro měření větších délek šachty než je $L = 0,5$ m.

V případě měření větších poměrů h/L než je horní hranice, by bylo komplikované, z důvodu rozkolísanosti hladiny a výrazněji by se projevil vliv tření vody o povrch šachty.

Do hodnoty $h/L < 0,475$ je možno považovat rozdíl mezi měření přepadové výšky piezometrem nebo hrotovým měřidlem za zanedbatelný.

Při ověření chyby naměřených a následně zpětně stanovených hodnot C_L bylo zjištěno, že při nejvyšších hodnotách průtoku (měření B.5 a C.5) došlo zřejmě k chybě v odečtu piezometrické výšky.

V rámci dalšího výzkumu by bylo možno provést měření rychlostí například ultrazvukovým UVP měřidlem a poté vykreslit průběh rychlosti proudění v okolí přelivu a stanovit místa vzniku úplavu. Rovněž by bylo přínosné popsat tlakovou výšku na stěnách šachty.

7 Seznam použité literatury

- [1] ČSN ISO 1438 (259331) Hydrometrie - Měření průtoku vody v otevřených korytech pomocí tenkostěnných přelivů
- [2] korytech pomocí tenkostěnných přelivů
- [3] JANDORA, Jan, Vlastimil STARA a Miloš STARÝ. *Hydraulika a hydrologie*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-739-0.
- [4] Výpusti rybníků - požeráky » Rieder Beton Jihlava. Novinky » Rieder Beton Jihlava [online]. Copyright © 2004 [cit. 05.01.2019]. Dostupné z: <http://www.rieder.cz/produkty/vypusti-rybniku-pozeraky/vypusti-rybniku-pozeraky.php>
- [5] Technická zařízení na vodních nádržích [online]. In: . [cit. 2019-01-11]. Dostupné z : http://hgf10.vsb.cz/546/Ekologicke%20aspekty/cviceni/cviceni_lenticky/technicka_zarizeni.htm
- [6] Požeráky [online]. In: . [cit. 2019-01-11]. Dostupné z: http://www.kora-vodostaving.cz/?page_id=158
- [7] Limitations of Thin-Plate Weirs. Flumes - Manholes - Shelters - Buildings - Enclosures - Weirs - Staff Gages [online]. Copyright ©2018 OpenchannelFlow. All rights reserved. [cit. 17.12.2018]. Dostupné z: <https://www.openchannelflow.com/blog/limitations-of-thin-plate-weirs>
- [8] Choosing a Weir or Flume Style. Flumes - Manholes - Shelters - Buildings - Enclosures - Weirs - Staff Gages [online]. Copyright ©2018 OpenchannelFlow. All rights reserved. [cit. 17.12.2018]. Dostupné z: <https://www.openchannelflow.com/blog/selecting-a-primary-device-choosing-a-weir-or-flume-style>
- [9] HORTON, Robert E. Weir experiments, coefficients, and formulas. Washington: Govt. Print. Off., 1906.
- [10] Thin Plate Weir Stage Discharge Relationships. HSU Users Web Pages [online]. Dostupné z: <http://users.humboldt.edu/finneyb/nws/thinplate.html>
- [11] ŠVÁB, Jiří. Proudění v prostoru šachtového přelivu VD Labská [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, 2017 [cit. 2018-12-17]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/69030>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Zbyněk Zachoval.
- [12] Aerated Unaerated Flow Over Weirs. Flumes - Manholes - Shelters - Buildings - Enclosures - Weirs - Staff Gages [online]. Copyright ©2018 OpenchannelFlow. All rights reserved. [cit. 17.12.2018]. Dostupné z: <https://www.openchannelflow.com/blog/flow-over-weirs>

- [13] BAGHERI, Sara a Manouchehr HEIDARPOUR. Flow over rectangular sharp-crested weirs. Irrigation Science [online]. 2010, 28(2), 173-179 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1007/s00271-009-0172-1. ISSN 0342-7188. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00271-009-0172-1>
- [14] PANDEY, MITTAL a CHOUDHARY. International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology (IJSET). Srivilliputtur: IJSET, 2015.
- [15] MAJOR, Jakub. Vliv geometrie přítokové šachty na kapacitu přelivu se širokou korunou: Závěrečná zpráva. Brno, 2018.
- [16] MQI 99 – SMART [online]. In: . [cit. 2019-01-11]. Dostupné z: <http://www.elabrno.cz/cs/mqi-99/>
- [17] MQI 99 – SMART [online]. In: . [cit. 2019-01-11]. Dostupné z: <http://www.elabrno.cz/wp-content/uploads/2015/09/Vut-Brno.jpg>

8 Seznamy

8.1 Seznam obrázků

Obr. 1.1 Podélný řez uzavřeného požeráku [4]	1
Obr. 1.2 Uzavřený požerák [6]	2
Obr. 3.1 Detail koruny přelivu [1]	6
Obr. 3.2 Údržba návodního prostoru přelivu [6].....	7
Obr. 3.3 Nezavzdušněný paprsek [11]	8
Obr. 3.4 Zavzdušněný paprsek [11]	8
Obr. 3.5 Rozložení rychlosti [8].....	9
Obr. 3.6 Bazinův přeliv [2]	10
Obr. 3.7 Pravoúhlý tenkostěnný přeliv s bočním zúžením [2].....	11
Obr. 3.8 Schéma podélného řezu.....	11
Obr. 3.9 Schéma nátoky šachtou	12
Obr. 4.1 Schéma modelu.....	13
Obr. 4.2 Model šachty	14
Obr. 4.3 Měřicí oblast.....	15
Obr. 4.4 Hrotové měřidlo	18
Obr. 4.5 Měření dolní obálky paprsku mosazným hákem	19
Obr. 4.6 Boční pohled na měření spodní obálky paprsku	19
Obr. 4.7 Řídící jednotka	20
Obr. 4.8 Přírubový snímač.....	20
Obr. 4.9 Piezometrické trubice s osazeným ocelovým měřidlem	21
Obr. 4.10 Průběh hladiny při $L = 0,3$ m.....	21
Obr. 4.11 Průběh hladiny při $L = 0,2$ m a $Q=0,06$ m ³ /s.....	21
Obr. 5.1 Průběh dolní a horní obálky paprsku v absolutním vyjádření pro $L = 0,2$ m	26
Obr. 5.2 Průběh dolní a horní obálky paprsku v absolutním vyjádření pro $L = 0,3$ m	26
Obr. 5.3 Průběh dolní a horní obálky paprsku v absolutním vyjádření pro $L = 0,5$ m	27
Obr. 5.4 Průběh dolní a horní obálky paprsku v relativním vyjádření pro $L = 0,2$ m.....	27
Obr. 5.5 Průběh dolní a horní obálky paprsku v relativním vyjádření pro $L = 0,3$ m	28
Obr. 5.6 Průběh dolní a horní obálky paprsku v relativním vyjádření pro $L=0,5$ m.....	28

Obr. 5.7 Průběh dolní a horní obálky paprsku v relativním vyjádření pro všechny délky šachty L a průtoky Q	29
Obr. 5.8 Trubice piezometrů.....	32
Obr. 5.9 Graf závislosti h_{piezo}/L na C_L	34
Obr. 5.10 Horní obálka-v místě nad přelivem.....	38
Obr. 5.11 Dolní obálka-v místě maximální výšky obálky paprsku	39
Obr. 5.12 Průběh horní a dolní obálky neovlivněného paprsku	40

8.2 Seznam tabulek

Tab. 4.1 Hodnoty piezometrických výšek.....	23
Tab. 5.1 Výpočet součinitele průtoku C_L	33
Tab. 5.2 Průběh aproximační křivky	34
Tab. 5.3 Mezní hodnota relativní délky šachty pro neovlivnění tvaru přepadového paprsku horní a dolní obálky paprsku.....	37

8.3 Seznam veličin

L	délka šachty	[m]
C_L	součinitel vlivu relativní délky šachty	[-]
t	délka přelivu ve směru proudu (tloušťka přelivu)	[m]
h	výška přepadu	[m]
μ	součinitel přepadu	[-]
b	šířka přelivu	[m]
B	šířka koryta	[m]
g	tíhové zrychlení	[m/s ²]
h_0	energetická přepadová výška	[m]
k	rychlostní přítoková výška	[m]
v_0	přítoková rychlost	[m/s]
Q	průtok	[m ³ /s]
m	součinitel přepadu	[-]
m_{Bazin}	součinitel přepadu stanovený Bazinem	[-]
A	plocha průtočného průřezu výřezu	[m ²]
A_0	plocha průtočného průřezu přítokového koryta	[m ²]
P	výška přelivu nade dnem přítokového koryta	[m]
U_B	rozšířená nejistota měření	[%]
h_{Piezo}	piezometrická výška vztažená ke koruně přelivu (přepadová výška stanovená piezometrem)	[m]
C_{d0}	součinitel přepadu pro neovlivněný přepad	[-]

8.4 Seznam zkratek

VUT	Vysoké učení technické
FAST	Fakulta stavební
PVC	Polyvinylchlorid
PMMA	Polymethylmetakrylát
DN	Světlost potrubí
UVP	Ultrasonic Velocity Profiling