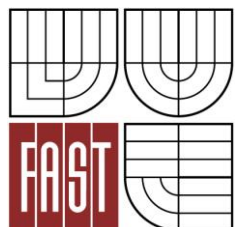




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

ANALÝZA Vlivu RELATIVNÍ VÝŠKY PRAVOÚHLÉHO PŘELIVU SE ŠIROKOU KORUNOU NA SOUČINITEL PRŮTOKU

ANALYSIS OF INFLUENCE OF THE RELATIVE WEIR HEIGHT OF RECTANGULAR
BROAD-CRESTED WEIR ON DISCHARGE COEFFICIENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MICHAELA KNÉBLOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ZBYNĚK ZACHOVAL, Ph.D.

BRNO 2013

SEM VLOŽIT ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ
PRÁCE

Abstrakt

Diplomová práce pojednává o vlivu relativní výšky přelivu pravoúhlého průřezu se širokou korunou na součinitel průtoku. Na základě měření úrovně hladiny před přelivem při různých průtocích i výškách přelivu P , byly stanoveny hodnoty součinitele průtoku v závislosti na h/P . Tyto hodnoty byly porovnány s výsledky měření a vztahy, jež jsou uvedeny v odborné literatuře. V závěru práce byly vyvozeny nové vztahy, kterých lze pro výpočet součinitele průtoku vztaženého k přepadové výšce využít.

Abstract

This diploma thesis dealt with the influence of relative weir height of rectangular broad-crested weir on discharge coefficient. Based on the level measurement in front of weir for different heights of the weir P and discharges were determined values of discharge coefficient according h/P . These values were compared with the results of measurements and relationships, which are mentioned in the professional literature. In conclusion were derived new relationships that can be used to calculate the discharge coefficient relative to the overflow head.

Klíčová slova

Přeliv se širokou korunou, součinitel průtoku, přepadová výška, energetická přepadová výška, relativní tloušťka přelivu, relativní výška přelivu.

Key words

Broad-crested weir, discharge coefficient, overflow head, overflow energy head, relative weir length, relative weir height.

Bibliografická citace

KNÉBLOVÁ, Michaela. *Analýza vlivu relativní výšky pravouhlého přelivu se širokou korunou na součinitel průtoku*. Brno, 2013. 66 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne

.....
Bc. Michaela Knéblová

Poděkování:

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Zbyňku Zachovalovi, Ph.D., za čas strávený konzultacemi, jeho trpělivost, cenné připomínky a odborné rady. Poděkování patří také mé rodině za podporu během studia.

Obsah

1	Úvod	13
2	Přelivy pravoúhlého průřezu.....	14
2.1	Přeliv pravoúhlého průřezu se širokou korunou.....	15
3	Vlastnosti proudu na koruně přelivu	20
3.1	Tvar hladiny	21
3.2	Tlak na koruně přelivu	22
3.3	Rychlostní pole	22
3.4	Numerické simulace proudění přes přeliv se širokou korunou	23
4	Rovnice pro stanovení průtoku.....	27
4.1	Odvození rovnice průtoku z Bernoulliho rovnice	28
4.1.1	Rovnice průtoku odvozená z Bernoulliho rovnice pro kritické proudění ideální kapaliny.....	28
4.1.2	Rovnice průtoku odvozená z Bernoulliho rovnice pro proudění reálné kapaliny	30
4.2	Odvození z rovnice hybnosti.....	31
4.3	Odvození z rozměrové analýzy	33
4.4	Platnost a použitelnost rovnic.....	34
5	Součinitel průtoku.....	35
5.1	Stanovení součinitele průtoku	36
6	Experiment.....	42
6.1	Měření	43
6.1.1	Ověření sond	44

6.2	Zpracování dat	46
7	Porovnání výsledků s jinými autory a vyhodnocení	54
8	Závěr a zhodnocení	62
9	Seznam použitých zdrojů	64

Seznam tabulek

Tab. 1 Členění přelivů dle relativní tloušťky a charakteru proudění.....	14
Tab. 2 Doporučené hodnoty drsnosti k [6].....	17
Tab. 3 Dynamická viskozita vody μ [6].....	18
Tab. 4 Konstantní hodnota součinitele průtoku a meze platnosti.....	36
Tab. 5 Součinitel průtoku přelivu se širokou korunou, vztažený k přepadové výšce [5]	37
Tab. 6 Součinitel průtoku C na koruně přelivu pravoúhlého průřezu [17].....	39
Tab. 7 Výsledky měření, $P = 0,250$ m.....	49
Tab. 8 Výsledky měření, $P = 0,151$ m.....	50
Tab. 9 Výsledky měření, $P = 0,103$ m.....	51
Tab. 10 Výsledky měření, $P = 0,077$ m.....	52
Tab. 11 Výsledky měření, $P = 0,052$ m.....	53
Tab. 12 Hodnoty součinitele průtoku v závislosti na h/P , stanovené měřením jednotlivých autorů.....	55
Tab. 13 Hodnoty součinitele průtoku v závislosti na h/P dle normy, vztahů a grafických vyjádření, které odvodili jednotliví autoři.....	57

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Charakter proudění u jednotlivých typů přelivů [8].....	14
Obr. 2.2 Přeliv pravoúhlého průřezu se širokou korunou a ostrou návodní hranou [5] .	15
Obr. 2.3 Relativní tloušťka mezní vrstvy [6]	17
Obr. 3.1 Oblasti odtržení [8]	20
Obr. 3.2 Druhá oblast odtržení	20
Obr. 3.3 Tvar hladiny, tlaková výška a rychlostní pole [9].....	22
Obr. 3.4 Podélný profil hladiny ve středu žlabu [18]	23
Obr. 3.5 Porovnání rychlostního pole (Bombardelli, García, Caisley) [2]	24
Obr. 3.6 Vektory rychlosti [2]	25
Obr. 3.7 Tvar hladiny dle Hagera a Schwalta [9].....	25
Obr. 3.8 Tvar hladiny na koruně přelivu při využití A) RSM, B) RNG [15].....	26
Obr. 3.9 Porovnání rychlostního pole (Hsu, Ozdemir) [15].....	26
Obr. 4.1 Schéma přepadu přes pravoúhlý přeliv se širokou korunou [23]	27
Obr. 4.2 Měrná energie a energetická výška průřezu [12].....	29
Obr. 4.3 Schéma přepadu přes pravoúhlý přeliv se širokou korunou [21]	31
Obr. 5.1 Součinitel přítokové rychlosti C_v [6].....	35
Obr. 5.2 Součinitel průtoku C v závislosti na h/t a h/P [5]	36
Obr. 5.3 Mapa izolinií hodnot součinitel průtoku C [20].....	37
Obr. 5.4 Opravný součinitel C_F pro přepad přes přeliv pravoúhlého průřezu [3]	38
Obr. 5.5 Opravný součinitel C_F pro přepad přes nízký přeliv pravoúhlého průřezu [3]	38

Obr. 5.6 Součinitel průtoku C přelivu s pravoúhlým průřezem [17].....	39
Obr. 5.7 Měřením stanovené hodnoty součinitele průtoku [1].....	41
Obr. 6.1 Přeliv pravoúhlého průřezu se širokou korunou a ostrou návodní hranou	42
Obr. 6.2 Žlab.....	43
Obr. 6.3 Rozměry a rozsah měření kompaktních ultrazvukových sond PU [7].....	44
Obr. 6.4 Princip porovnávání měřených hodnot digitálního posuvného délkového měřidla a jednotlivých sond	44
Obr. 6.5 Absolutní a relativní chyba měření sondy č. 1.....	45
Obr. 6.6 Absolutní a relativní chyba měření sondy č. 2.....	45
Obr. 6.7 Opravná funkce sondy č. 1	46
Obr. 6.8 Měrné křivky jednotlivých přelivů	47
Obr. 6.9 Součinitel průtoku C v závislosti na relativní výšce přelivu h/P	48
Obr. 7.1 Součinitel průtoku C v závislosti na relativní výšce přelivu h/P	59
Obr. 7.2 Vyhodnocení.....	61

Seznam veličin

A	průtočný průřez	$[\text{m}^2]$
b	šířka přelivu, šířka obdélníkového průtočného profilu	$[\text{m}]$
C	součinitel průtoku vztažený k přepadové výšce	
C_D	součinitel průtoku vztažený k energetické přepadové výšce	
C_F	opravný součinitel	
C_h	součinitel průtoku vztažený k přepadové výšce (vlastní měření pomocí hrotového měřidla)	
C_s	součinitel průtoku vztažený k přepadové výšce (vlastní měření pomocí ultrazvukové sondy)	
C_v	součinitel přítokové rychlosti	
d	relativní tloušťka mezní vrstvy	
F	vnější tlaková síla	$[\text{N}]$
F_p	vnější tlaková síla od návodního líce přelivu	$[\text{N}]$
g	tíhové zrychlení	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$
H	energetická přepadová výška	$[\text{m}]$
h	přepadová výška	$[\text{m}]$
H_1	energetická výška průřezu	$[\text{m}]$
h_1	výška průřezu	$[\text{m}]$
h_2	výška paralelního proudu	$[\text{m}]$
h_k	kritická hloubka	$[\text{m}]$
H_{max}	maximální energetická přepadová výška	$[\text{m}]$
h_{max}	maximální přepadová výška	$[\text{m}]$
h_{min}	minimální přepadová výška	$[\text{m}]$
h_z	ztrátová výška	$[\text{m}]$
K_p	tlakový koeficient	
M	hybnost proudu	$[\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
P	výška přelivu	$[\text{m}]$
Q	průtok	$[\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$
r	poloměr zaoblení návodní hrany přelivu	$[\text{m}]$
Re	Reynoldsovo kritérium	

t	tloušťka (délka) přelivu	[m]
u	bodová rychlost	[m·s ⁻¹]
v	průřezová rychlost	[m·s ⁻¹]
α	součinitel kinetické energie	
γ	měrná tíha vody	[N·m ⁻³]
Δ	absolutní chyba měření	[m]
δ	relativní chyba	
δ^*	tloušťka mezní vrstvy	[m]
ε_k	součinitel výškového zúžení	
μ	dynamická viskozita	[kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹]
ζ	součinitel místních ztrát	
ρ	hustota kapaliny	[kg·m ⁻³]
φ	rychlostní součinitel	

1 ÚVOD

Ve vodohospodářské praxi jsou přelivy pravoúhlého průřezu se širokou korunou často využívány jako čelní přelivy k nadržení vody a ke stanovení průtoku. Pro zajištění správné funkce je třeba znát měrnou křivku přelivu, kterou lze určit experimentálně kalibrací, nebo výpočtem [23].

K výpočtu je možné použít rovnice, odvozené různými přístupy (v práci uvedeny), se součinitelem průtoku, jehož příslušnost k dané rovnici je nutné dodržet. S rozvojem výpočetní techniky se nabízí i další možnost určení měrné křivky přelivu výpočtem, a to pomocí numerického modelu. Vzhledem k obtížnosti numerického řešení proudění se zónami odtržení, které na široké koruně mohou vznikat, jsou stále upřednostňovány klasické přístupy, tedy pomocí výše zmíněných rovnic. Ty bývají obvykle odvozeny pro vysoké přelivy, kde je hodnota součinitele průtoku C v daných mezích konstantní a na relativní výšce přelivu nezávisí [23]. Hodnoty součinitele průtoku, stejně jako meze jejich platnosti jsou v odborné literatuře udávány různě, proto bylo provedeno vlastní měření, které ukázalo vhodnost jednotlivých vyjádření.

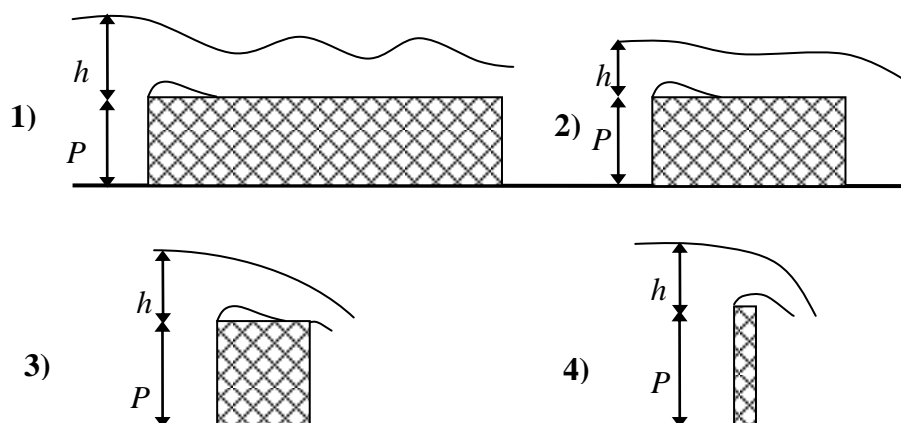
Pomocí ultrazvukové sondy a hrotového měřidla byla při měnící se výšce přelivu pravoúhlého průřezu se širokou korunou s ostrou návodní i povodní hranou a pro různé průtokové stavy měřena úroveň hladiny před přelivem. Vyhodnocením výsledků měření a jejich grafickým porovnáním s výsledky měření ostatních autorů byly vyvozeny vztahy pro výpočet součinitele průtoku v závislosti na relativní výšce přelivu h/P .

2 PŘELIVY PRAVOÚHLÉHO PRŮŘEZU

Na základě charakteru proudění na koruně (Obr. 2.1) a poměru h/t , kde h je přepadová výška (často se uvádí i energetická přepadová výška H) a t tloušťka přelivu, se pravoúhlé přelivy dělí do čtyř základních skupin [8] (Tab. 1).

Tab. 1 Členění přelivů dle relativní tloušťky a charakteru proudění

Ozn.	Relativní tloušťka přelivu h/t	Klasifikace přelivu	Charakter proudění
1)	$0 < h/t \leq 0,1$	Přeliv s dlouhou (velmi širokou) korunou	Proudění na koruně přelivu je podkritické. Tento přeliv se vyznačuje vznikem příčných vln, někdy i vlnovitého vodního skoku a pro měření průtoku ho využít nelze [3].
2)	$0,1 < h/t \leq 0,4$	Přeliv se širokou korunou	U přelivů se širokou korunou je proudění v určitém úseku s jejich korunou rovnoběžné [5].
3)	$0,4 < h/t \leq 1,5$	Přeliv s krátkou (úzkou) korunou	Hladina je nad korunou přelivu zakřivena [5].
4)	$h/t \geq 1,5$	Přeliv tenkostěnný (s ostrou hranou)	Přepadový paprsek volně přepadá přes přeliv. Hladina nad korunou je zcela zakřivena [3].

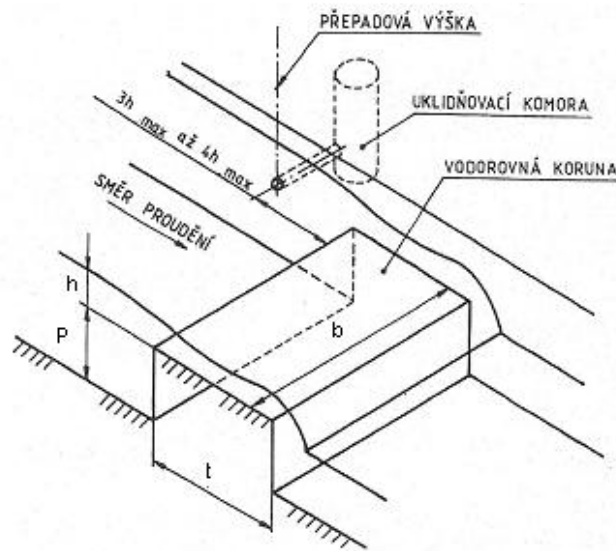


Obr. 2.1 Charakter proudění u jednotlivých typů přelivů [8]

2.1 Přeliv pravoúhlého průřezu se širokou korunou

Aby se jednalo o přeliv pravoúhlého průřezu se širokou korunou s ostrou návodní hranou, musí platit:

- Koruna, jejíž délka se rovná šířce koryta, ve kterém je přeliv osazen, je vodorovná, rovinná a s hladkým povrchem. Návodní a povodní stěna je hladká, svislá a kolmá ke dnu i stěnám koryta. Rovina návodní a povodní stěny se protíná s rovinou koruny pod pravým úhlem a průsečnice těchto rovin tvoří ostrou hranu [5].
- Hodnota relativní tloušťky přelivu h/t , tedy poměr přepadové výšky h (v některých případech je uváděna energetická přepadová výška H) a tloušťky přelivu t , musí být v rozmezí $0,1 < h/t \leq 0,4$. Minimální hodnota je limitující z hlediska ovlivnění povrchovým napětím a viskozitou [8].



Obr. 2.2 Přeliv pravoúhlého průřezu se širokou korunou a ostrou návodní hranou [5]

Dále jsou doporučeny následující podmínky:

- K eliminaci účinků povrchového napětí a viskozity musí být dodržena šířka přelivu $b \geq 0,3$ m, výška přelivu $P \geq 0,15$ m a minimální přepadová výška $h_{min} = 0,06$ m [5], nebo dle Hagera $h_{min} = 0,05$ m [9].
- Doporučená drsnost povrchu odpovídá drsnosti válcovaného plechu [5].

Mezi hlavní výhody přelivů pravoúhlého průřezu se širokou korunou a s ostrou návodní i povodní hranou patří velký rozsah měřených průtoků, jednoduchost konstrukce a s ní spjatý nižší nároky na její provedení [9], mimořádná robustnost a necitlivost na menší poškození [6]. Nevýhodami jsou nízká průtočnost (vytváří velké ztráty) a odtržení proudu za návodní hranou přelivu, což může ovlivnit úroveň hladiny v místě měření přepadové výšky h [5].

Održení proudu lze zabránit zaoblením návodní hrany přelivu. V takovém případě musí být přeliv navržen tak, aby splňoval následující požadavky: poloměr zaoblení $r \geq 0,2 \cdot H_{max}$, délka vodorovného úseku koruny $t \geq 1,75 \cdot H_{max}$ a součet délky koruny a poloměru zaoblení $(t+r) \geq 2,25 \cdot H_{max}$, kde H_{max} je maximální energetická přepadová výška. Hodnoty součinitele průtoky C_D , jsou vyšší, než u přelivů s ostrou návodní hranou a stanoví se na základě tloušťky mezní vrstvy dle rovnice [6]

$$C_D = \left(1 - \frac{2 \cdot d \cdot t}{b}\right) \cdot \left(1 - \frac{d \cdot t}{h}\right)^{1/2}, \quad (2.1)$$

kde b je šířka přelivu. Relativní tloušťka mezní vrstvy d je vyjádřena jako poměr tloušťky mezní vrstvy δ^* a tloušťky přelivu t

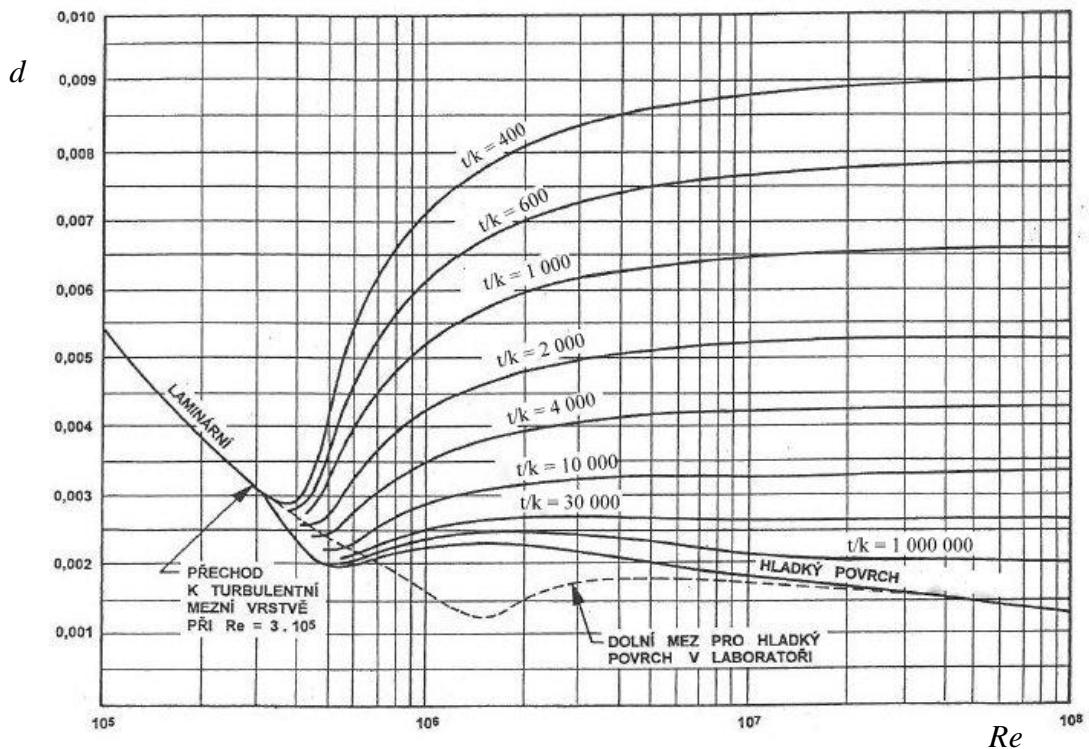
$$d = \frac{\delta^*}{t}. \quad (2.2)$$

V grafu (Obr. 2.3) je tato hodnota vynesena pro různé drsnosti koruny k , jež jsou uvedeny v tabulce (Tab. 2) v závislosti na Reynoldsově kritériu

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot t}{\mu}, \quad (2.3)$$

kde ρ je hustota vody. Průřezová rychlost v může být vyjádřena vztahem (2.4) [6].
Hodnoty dynamické viskozity vody μ v závislosti na teplotě zobrazuje Tab. 3.

$$v = \left(\frac{2}{3} \cdot g \cdot h \right)^{1/2} \quad (2.4)$$



Obr. 2.3 Relativní tloušťka mezní vrstvy [6]

Tab. 2 Doporučené hodnoty drsnosti k [6]

Klasifikace povrchu	Hodnoty k [mm]	
	kvalitní provedení	běžné provedení
Plastické hmoty (a podobné)		
Plexisklo, PVC a jiné plastické hmoty s hladkým povrchem	-	0,003
Azbestocement	-	0,015
Skelná vlákna pojená pryskyřicí lisovaná v hladké formě z plechu nebo osmirkovaného a nalakovaného dřeva	0,03	0,06

Klasifikace povrchu	Hodnoty k [mm]	
	kvalitní provedení	běžné provedení

Kovy		
Hladký, obrobený a leštěný povrch	0,003	0,006
Nepokovený plech zbavený koroze	0,015	0,03
Natřený plech	0,03	0,06
Pozinkovaný kov	0,06	0,15
Natřený nebo pokovený odlitek	0,06	0,15
Nepokovený odlitek	0,15	0,3
Beton		
Monolitická nebo prefabrikovaná konstrukce do ocelového bednění, nepravidelnosti obroušeny nebo vyplněny	0,06	0,15
Monolitická nebo prefabrikovaná konstrukce do bednění z překližky nebo ohoblovaného dřeva	0,3	0,6
Hlazený cementový potěr	0,3	0,6
Betonový povrch s tenkým povlakem nebo stokovým kalem	0,6	1,5
Dřevo		
Ohoblované dřevo nebo překližka	0,3	0,6
Ohoblované a nalakované dřevo	0,03	0,06

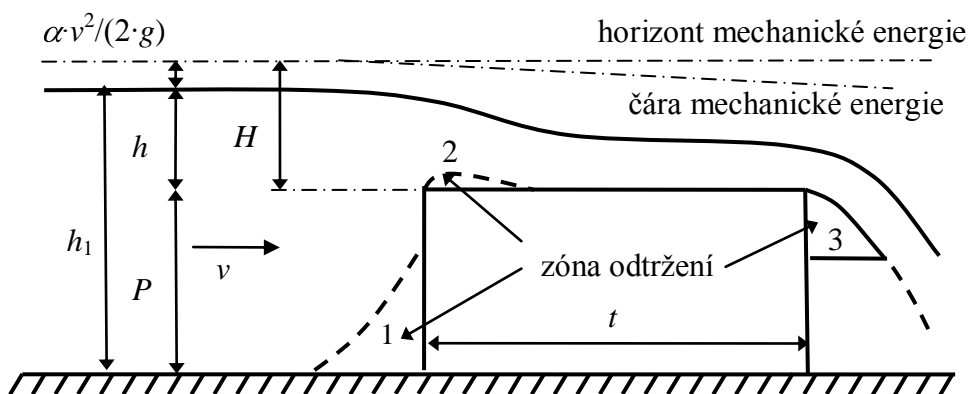
Tab. 3 Dynamická viskozita vody μ [6]

Teplota	Dynamická viskozita
[°C]	[kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹]
0	1,79E-03
5	1,52E-03
10	1,31E-03
15	1,14E-03
20	1,01E-03
25	0,90E-03
30	0,81E-03

Dle relativní výšky lze přelivy se širokou korunou a ostrou návodní hranou rozdělit na vysoké a nízké. Vysoké přelivy, u kterých je součinitel průtoku v daném rozmezí h/t konstantní, jsou definovány poměrem přepadové výšky h a výšky přelivu P jako $h/P < 0,15$ [5], nebo $0,06 < h/P < 0,55$ [20]. Někteří autoři vyjadřují relativní výšku přelivu ve tvaru $h/(h+P)$, limitní hodnoty se pak pohybují od 0,35 [3] do 0,36 [19]. Při vyšších hodnotách h/P , respektive $h/(h+P)$ dojde k jinému zakřivení proudnic, a to především v místě recirkulační oblasti proudu, která vznikne bezprostředně za návodní hranou koruny přelivu, což má vliv na změnu součinitele průtoku C [22]. V této práci je součinitel průtoku C pro nízké přelivy posuzován dle různých autorů v rozmezí $0,15 < h/P < 1,6$; $0,55 < h/P < 1,6$ a $0,35 < h/(h+P) < 0,6$.

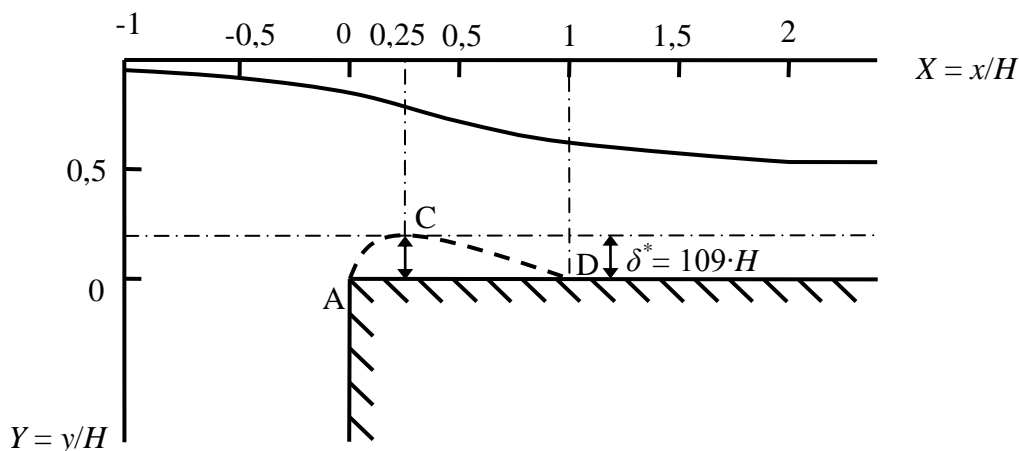
3 VLASTNOSTI PROUDU NA KORUNĚ PŘELIVU

Při přepadu přes přeliv se širokou korunou vznikají tři oblasti odtržení. První se vytvoří před návodní stěnou přelivu, druhá na koruně přelivu a třetí těsně za jeho povodní stěnou. Zatímco v první oblasti je vlivem odtržení proudu tlak větší, než hydrostatický, ve druhé oblasti, o které bude dále pojednáno, je tomu naopak (Obr. 3.1) [8].



Obr. 3.1 Oblasti odtržení [8]

Druhá oblast odtržení vznikne za návodní hranou koruny přelivu a po té znovu přilne k povrchu koruny v relativní vzdálenosti $X_D = x_D/H = 1$ (Obr. 3.2) [10]. V tomto místě turbulentní mezní vrstva o tloušťce $\delta^* = 0,109 \cdot H$ [10] odpovídá maximální tloušťce oblasti odtržení y_C ve vzdálenosti $X_C = x_C/H = 0,25$ [10]. Hodnota relativní tloušťky oblasti odtržení δ^*/H není závislá na Reynoldsově kritériu Re [10].



Obr. 3.2 Druhá oblast odtržení

Hager a Schwalt [9] uvádějí rovnici popisující tvar oblasti odtržení. Po úpravě

$$X^* = X \cdot \left(\frac{e^{-1}}{X_C} \right) = 0,836 \cdot X, \quad (3.1)$$

$$Y^* = Y \cdot \left(\frac{e^{-1}}{Y_C} \right) = 1,840 \cdot Y \quad (3.2)$$

se získá

$$Y^* = -X^* \cdot \ln X^* \quad (3.3)$$

Dle těchto autorů je maximální tloušťka oblasti odtržení $Y_C = y_C/H = 0,20$ v relativní vzdálenosti $X_C = x_C/H = 0,44$ a relativní délka oblasti odtržení $X_D = x_D/H = 1,18$ (Obr. 3.2) [9].

Zrychlený proud a ztráty způsobují zakřivení hladiny před přelivem, proto se měřicí profil doporučuje umístit v dostatečné vzdálenosti protiproudě od návodní stěny přelivu. Norma ČSN ISO 3846 uvádí tuto vzdálenost $3 \cdot h$ až $4 \cdot h$ [5].

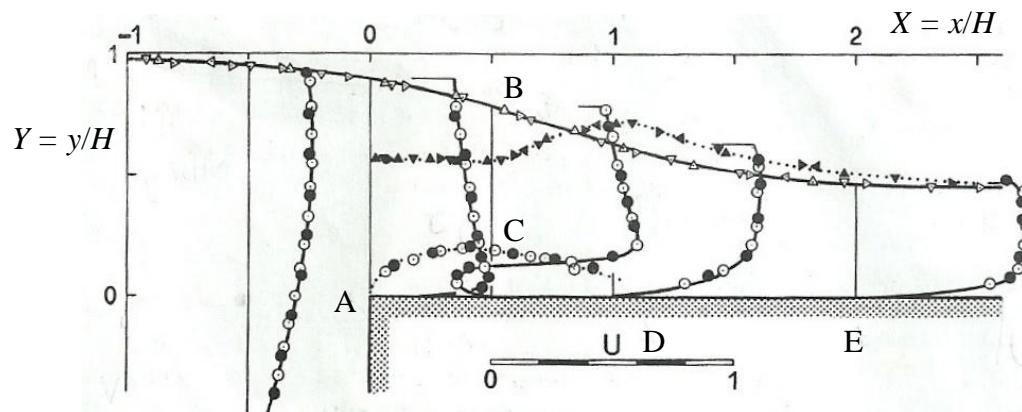
3.1 Tvar hladiny

Proudění přes přeliv je v určitém úseku rovnoběžné s jeho korunou [5]. Podrobněji je průběh hladiny znázorněn na obrázku (Obr. 3.3), kde $X = x/H$ a $Y = y/H$. Hladina nad návodní hranou koruny přelivu je v relativní výšce $y_A/H = 0,9$ a klesá až na konstantní hloubku y_E , která je v relativním vyjádření $y_E/H = 0,46$ [9].

Tvar hladiny, který je přibližně symetrický okolo bodu B v relativní výšce $Y_B = y_B/H = 0,73$ a vzdálenosti $X_B = x_B/H = 2/3$, lze vyjádřit

$$\frac{Y - Y_B}{1 + c_B - Y_B} = \operatorname{tgh}(X_B - X), \quad (3.4)$$

kde je pro rozsah $-1 < X < 2$ opravný součinitel $c_B = 0,03$, jinak $c_B = 0$ [9].



Obr. 3.3 Tvar hladiny, tlaková výška a rychlostní pole [9]

3.2 Tlak na koruně přelivu

Na základě měření pomocí manometru určili Hager a Schwalt tlakovou výšku $p/(\rho g)$, kde p je tlak a ρ hustota kapaliny pro oblast odtržení i odtržený proud. Tlaková výška vyjádřená relativně vůči energetické přepadové výšce H je od návodní hrany koruny přelivu téměř konstantní $p/(\rho g \cdot H) = 0,56$ až $0,57$, následně roste až na maximální hodnotu $p/(\rho g \cdot H) = 0,73$ v relativní vzdálenosti $X = x/H = 1,05$. Od toho místa hodnota tlakové výšky směrem k volné hladině klesá (Obr. 3.3) [9].

Obdobným měřením se zabýval také Moss, který udává relativní tlakovou výšku pro oblast odtržení $p/(\rho g \cdot H) = 0,58$ a maximální relativní tlakovou výšku $p/(\rho g \cdot H) = 0,69$ [9].

3.3 Rychlostní pole

Rychlostní pole vyjádřili Hager a Schwalt jako odmocninu z relativní rychlostní výšky

$$U = u/(2 \cdot g \cdot H)^{1/2}, \quad (3.5)$$

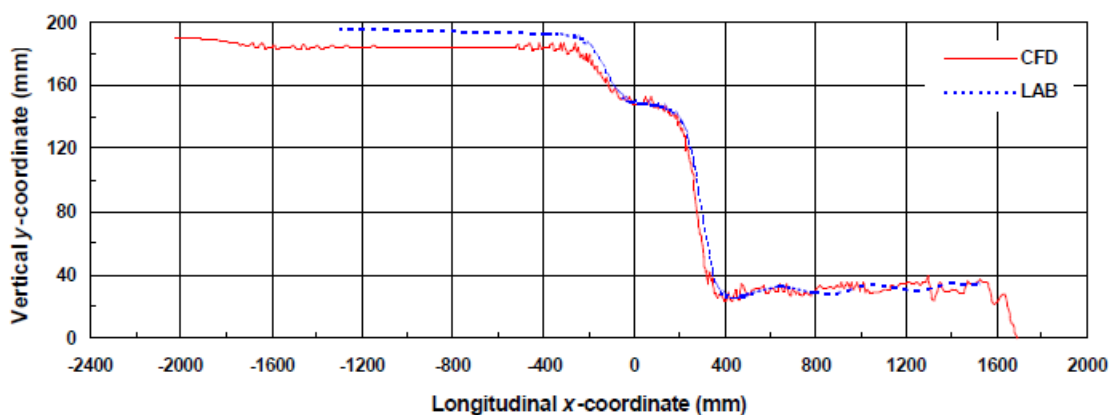
kde u je bodová rychlost měřená ve vybraných profilech $X = x/H = -0,5; 0; 0,5; 1$ a 2 po výšce 10 mm (Obr. 3.3) [9].

3.4 Numerické simulace proudění přes přeliv se širokou korunou

S nárůstem výkonu výpočetní techniky, jež umožňuje simulovat stále složitější a komplexnější děje, roste také využití matematického modelování ve vodním hospodářství i dalších technických oborech. Pomocí numerické simulace proudění tekutin Computational Fluid Dynamics (CFD) lze získat detailní informace o základních charakteristikách proudění [16].

K tomuto účelu je k dispozici relativně velké množství softwarů. Patří k nim např. ANSYS-Fluent, ANSYS-Flotran, ANSYS-CFX, Phoenix, Flow 3D a další. Přesnost výsledků je ovšem podmíněna tolika faktory (volba matematického modelu, hustoty sítě, velikosti časového kroku apod.), že je zatím nutné jejich srovnání s hodnotami fyzikálního experimentu, nebo jiného přístupu k problematice [14].

Sarker a Rhodes [18] využili k porovnání výsledků numerický model vytvořený v programu Fluent za použití klasického $k-\varepsilon$ modelu, stěnových funkcí a Volume Of Fluid (VOF) analýzy pro určení polohy hladiny. Z grafu (Obr. 3.4) je patrná poměrně přesná predikce hladiny na koruně přelivu a poproudě za ní. Protiproudě od návodní stěny přelivu se výška modelované hladiny od naměřené liší až o 10,5 mm (tedy přibližně o 5,9 %), což je způsobeno tím, že do výpočtu není zahrnuta ztráta energie v oblasti odtržení, vznikající bezprostředně za návodní hranou přelivu, která je eliminována použitím stěnové funkce. Z tohoto důvodu není použití stěnové funkce bez přesného určení jejího měřítka příliš vhodné.

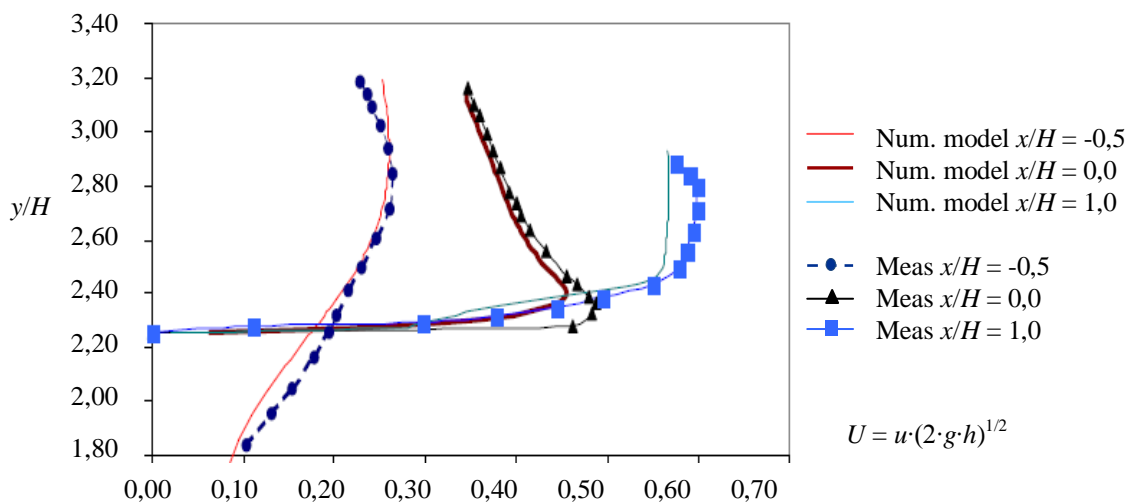


Obr. 3.4 Podélný profil hladiny ve středu žlabu [18]

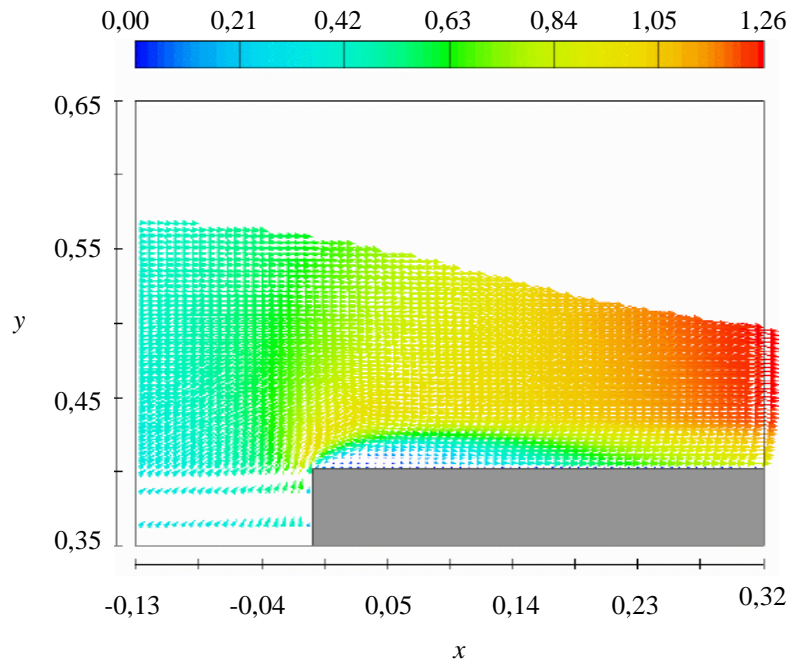
Výsledky měření Hagera a Schwalta [9] byly porovnány s výsledky numerického modelu Bombardelliho, Garcíi a Caisleyho [2], kteří pro simulaci proudění přes přeliv použili dvourovnicový turbulentní model Renormalization Group (RNG) $k-\varepsilon$ v softwaru Flow 3D.

Geometrie modelovaného přelivu byla shodná s geometrií vybraného přelivu Hagera a Schwalta, stejně tak přepadová výška. Konkrétně se jednalo o přeliv označený jako $10a$ o tloušťce $t = 500$ mm, výšce $P = 401$ mm, s přepadovou výškou $h = 176$ mm. Vypočítaný průtok $Q_v = 56,54$ l/s se od měřeného $Q_m = 54,83$ l/s lišil o 3,1% [2].

Z Obr. 3.5 je zjevné, že jsou měřené a modelované rychlostní pole v různých místech poproudě i protiproudě od přelivu přibližně shodné. Pomocí modelu je také možné určit délku oblasti odtržení proudu [2].

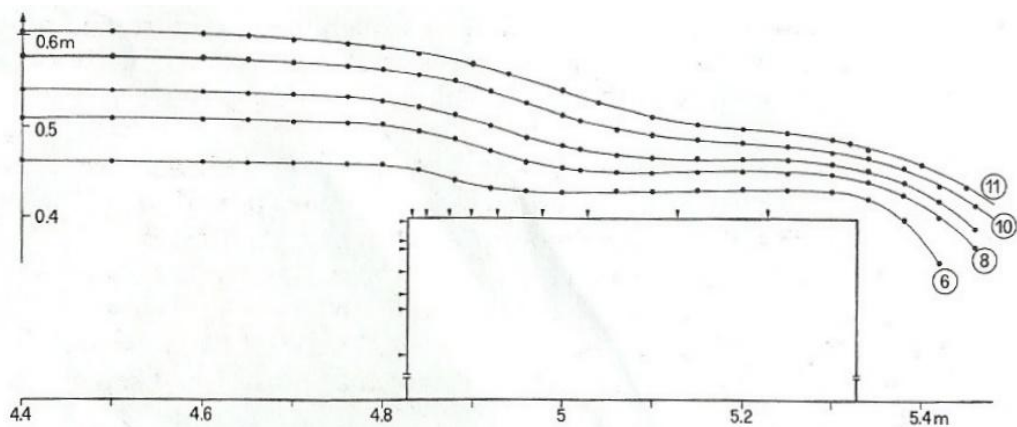


Obr. 3.5 Porovnání rychlostního pole (Bombardelli, García, Caisley) [2]

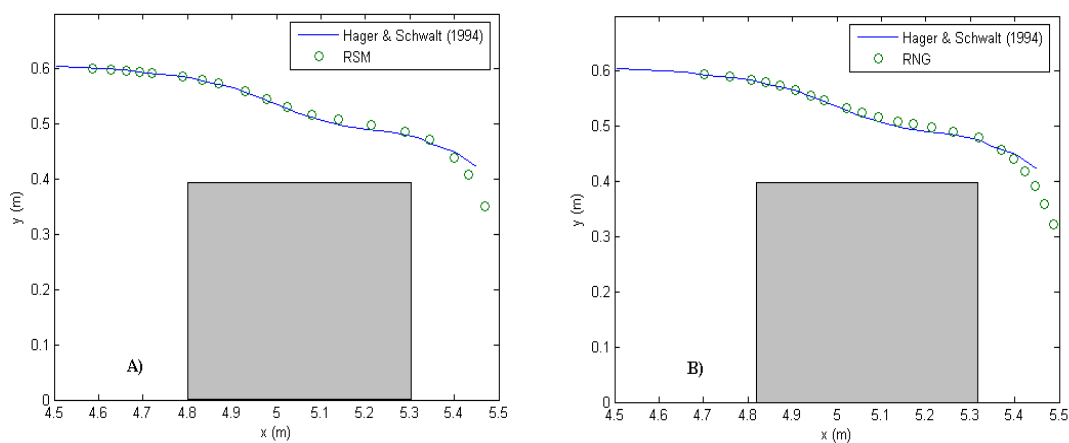


Obr. 3.6 Vektory rychlosti [2]

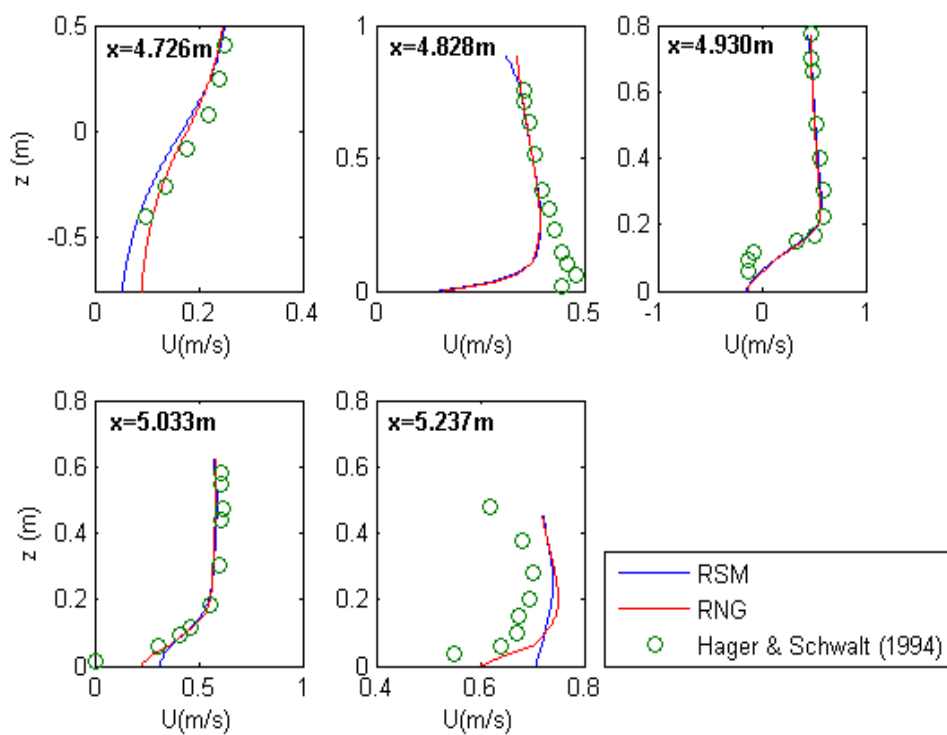
Podobné srovnání provedli také Hsu a Ozdemir [15], kteří sledovali jak rychlostní pole (Obr. 3.9), tak průběh hladiny na koruně přelivu (Obr. 3.8). K tomu použili software Fluent a dva turbulentní modely Renormalization Group (RNG) a Reynolds Stress Model (RMS). Největší neshoda nastala opět na návodní hraně přelivu, tedy v místě $x = 4,828$ m (Obr. 3.7) a (Obr. 3.9), kde se modelovaný rychlostní profil od naměřeného lišil nejvíce.



Obr. 3.7 Tvar hladiny dle Hagera a Schwalta [9]



Obr. 3.8 Tvar hladiny na koruně přelivu při využití A) RSM, B) RNG [15]



Obr. 3.9 Porovnání rychlostního pole (Hsu, Ozdemir) [15]

4 ROVNICE PRO STANOVENÍ PRŮTOKU

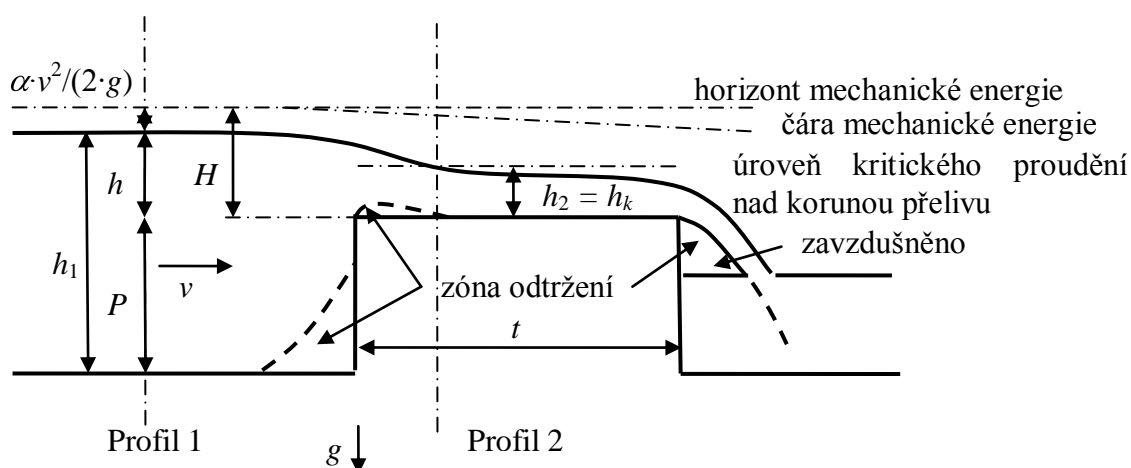
Ke stanovení průtoku Q přes pravoúhlý přeliv pravoúhlého průřezu se širokou korunou se dá využít, za předpokladu znalosti energetické přepadové výšky H (případně přepadové výšky h) a šířky přelivu b , tří přístupů:

- odvození z Bernoulliho rovnice,
- odvození z rovnice hybnosti,
- odvození z rozměrové analýzy [23].

Vzniknou tak tři odlišné rovnice s příslušnými součiniteli průtoku. Odvození rovnic se obvykle provádí pro vysoké přelivy, kde hodnota součinitele průtoku C nezávisí na poměru h/P , respektive $(h/(h+P))$. Při zanedbání přítokové rychlosti v platí $h = H$ [23].

Součinitel průtoku pak zohledňuje ztráty vzniklé při proudění od Profilu 1 do Profilu 2 (Obr. 4.1), tedy do profilu s kritickým prouděním. Předpokládá se, že proudění poproudě za Profilem 2 neovlivňuje kritické proudění, a proto nemá vliv na hodnotu součinitele průtoku [23].

Předpoklad existence kritického proudění na koruně přelivu v případě skutečné kapaliny zde není zcela přesný [23].



Obr. 4.1 Schéma přepadu přes pravoúhlý přeliv se širokou korunou [23]

4.1 Odvození rovnice průtoku z Bernoulliho rovnice

Rovnici průtoku lze z Bernoulliho rovnice odvodit dvěma způsoby, které vycházejí z proudění ideální a reálné kapaliny. V obou případech se předpokládá přeměna mechanické energie v Profilu 1 na energii polohovou a na energii kinetickou při kritickém proudění v Profilu 2 (Obr. 4.1) [23].

4.1.1 Rovnice průtoku odvozená z Bernoulliho rovnice pro kritické proudění ideální kapaliny

V obecném průřezu otevřeného koryta s prouděním ideální kapaliny (Obr. 4.2) se předpokládá ve všech bodech průřezu stejná bodová rychlost u , která se rovná průřezové rychlosti v . Pro proudnici procházející libovolně zvoleným bodem B, se může napsat Bernoulliho rovnice (srovnávací rovina prochází nejnižším bodem dna v průřezu)

$$y_B + \frac{p_B}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} = konst., \quad (4.1)$$

kde p_B je tlak v příslušném bodě, ρ je hustota kapaliny, g je tíhové zrychlení [12].

Nejsou-li proudnice zakřiveny, je tlak v bodě B určen tlakovou výškou

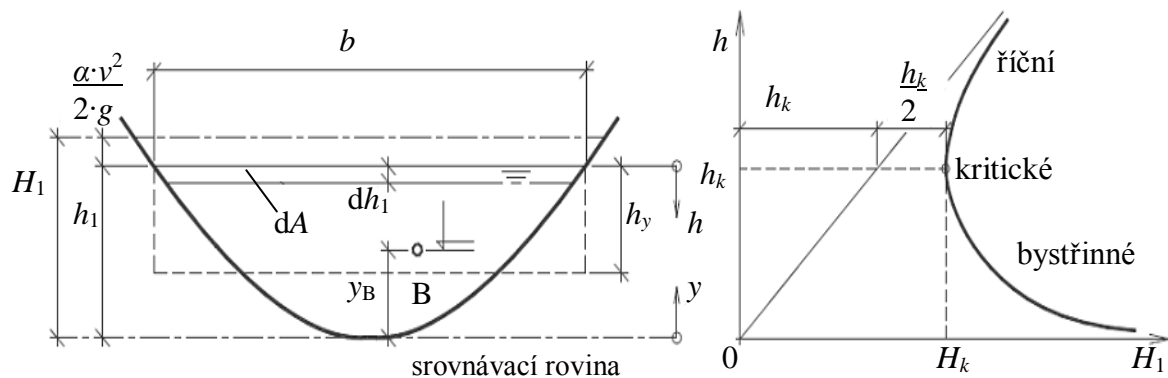
$$\frac{p_B}{\rho \cdot g} = h_1 - y_B. \quad (4.2)$$

Dosazením do (4.1) se získá

$$y_B + h_1 - y_B + \frac{v^2}{2 \cdot g} = konst. = H_1, \quad (4.3)$$

$$H_1 = h_1 + \frac{v^2}{2 \cdot g} = h_1 + \frac{Q_i^2}{2 \cdot g \cdot A^2}, \quad (4.4)$$

kde H_1 je energetická výška průřezu a Q je průtok vody, A je průtočný průřez [12].



Obr. 4.2 Měrná energie a energetická výška průřezu [12]

Kritické proudění ideální kapaliny se určí z podmínky minima [21] rovnice (4.4)

$$\frac{dH_1}{dh_1} = 0 = 1 - \frac{Q_i^2}{g \cdot A_k^3} \frac{dA}{dh_1} = 1 - \frac{v_{ik}^2}{g \cdot A_k} \frac{dA}{dh_1}. \quad (4.5)$$

Jestliže pro obdélníkový průřez platí

$$\frac{dA}{dh_1} = b, \quad (4.6)$$

z rovnice (4.5) se získá vztah pro kritické proudění

$$\frac{v_{ik}^2}{2 \cdot g} = \frac{A_k}{2 \cdot b} \quad (4.7)$$

a pro kritickou rychlost

$$v_{ik} = \left(\frac{g \cdot A_k}{b} \right)^{1/2} = (g \cdot h_k)^{1/2}. \quad (4.8)$$

Po dosazení do (4.4) pro kritické proudění

$$H_k = h_k + \frac{v_{ik}^2}{2 \cdot g} = \frac{3}{2} \cdot h_k, \quad (4.9)$$

se obdrží vztah pro kritickou hloubku

$$h_k = \frac{2}{3} \cdot H_k. \quad (4.10)$$

Průtok ideální kapaliny přes přeliv se určí z rovnice spojitosti pro kritické proudění [23]

$$Q_i = A_k \cdot v_{ik} = b \cdot h_k \cdot (g \cdot h_k)^{1/2} = b \cdot g^{1/2} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot H_k\right)^{3/2} = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot b \cdot g^{1/2} \cdot H_k^{3/2}. \quad (4.11)$$

Součinitel průtoku C_D je dán poměrem mezi průtokem skutečné kapaliny Q a ideální kapaliny Q_i [23]

$$C_D = \frac{Q}{Q_i}. \quad (4.12)$$

Rovnice průtoku (srovnávací rovina je umístěna v úrovni koruny přelivu) je tedy vyjádřena jako [23]

$$Q = C_D \cdot Q_i = C_D \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot b \cdot H^{3/2}, \quad (4.13)$$

kde je H energetická přepadová výška.

4.1.2 Rovnice průtoku odvozená z Bernoulliho rovnice pro proudění reálné kapaliny

Pro reálnou kapalinu se Bernoulliho rovnice doplňuje o ztrátovou výšku h_z [23], jejíž hodnota závisí především na úpravě vtokové hrany (ostrá, zkosená, zaoblená) [13]

$$H = h + \frac{\alpha \cdot v^2}{2 \cdot g} + h_z = h_k + \frac{\alpha \cdot v_k^2}{2 \cdot g} + h_z = h_k + \frac{\alpha \cdot v_k^2}{2 \cdot g} + \xi \cdot \frac{v_k^2}{2 \cdot g}, \quad (4.14)$$

kde α je součinitel kinetické energie a ξ součinitel místních ztrát.

Zavedením součinitele rychlosti [23]

$$\varphi = \frac{1}{(\alpha + \xi)^{1/2}}, \quad (4.15)$$

se po úpravě Bernoulliho rovnice vyjádří kritická rychlost

$$v_k = \varphi \cdot [2 \cdot g \cdot (H - h_k)]^{1/2} \quad (4.16)$$

a pomocí rovnice spojitosti pro kritické proudění i přepadový průtok

$$Q = A_k \cdot v_k = \varphi \cdot b \cdot h_k \cdot [2 \cdot g \cdot (H - h_k)]^{1/2}. \quad (4.17)$$

Dosazením součinitele výškového zúžení [23]

$$\varepsilon_k = \frac{h_k}{H} \quad (4.18)$$

do rovnice (4.17) se získá

$$Q = \varphi \cdot b \cdot \varepsilon_k \cdot H \cdot [2 \cdot g \cdot (H - \varepsilon_k \cdot H)]^{1/2} = \varphi \cdot \varepsilon_k \cdot (1 - \varepsilon_k)^{1/2} \cdot b \cdot (2 \cdot g)^{1/2} \cdot H^{3/2}. \quad (4.19)$$

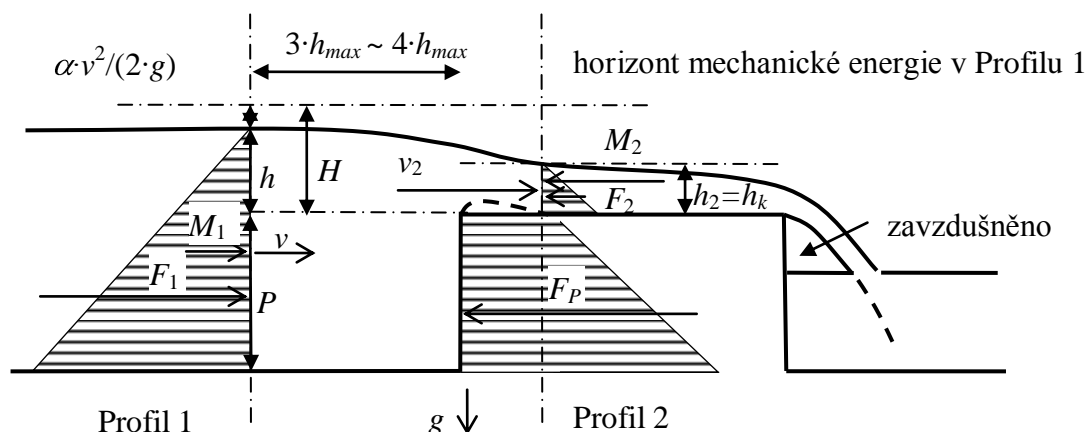
Za předpokladu [23]

$$C_D = \varphi \cdot \varepsilon_k \cdot (1 - \varepsilon_k)^{1/2}, \quad (4.20)$$

se obdrží rovnice průtoku

$$Q = C_D \cdot (2 \cdot g)^{1/2} \cdot b \cdot H^{3/2}. \quad (4.21)$$

4.2 Odvození z rovnice hybnosti



Obr. 4.3 Schéma přepadu přes pravouhý přeliv se širokou korunou [21]

Rovnice se obvykle odvozují pro případ proudění ideální kapaliny. Ve vymezeném kontrolním objemu (Profily 1 a 2), platí [21] (Obr. 4.3)

$$F_1 + M_1 = F_p + F_2 + M_2, \quad (4.22)$$

kde F_1 a F_2 jsou vnější tlakové síly, F_p je vnější síla od návodního líce přelivu, M_1 a M_2 vyjadřují hybnost proudu v Profilu 1 a Profilu 2.

$$F_1 = \frac{\gamma}{2} \cdot (H + P)^2 \cdot b, \quad (4.23)$$

$$F_2 = \frac{\gamma}{2} \cdot (h_2)^2 \cdot b, \quad (4.24)$$

$$F_p = \frac{\gamma}{2} \cdot P \cdot [(2 \cdot H + P)] \cdot b = \frac{\gamma}{2} \cdot [(H + P)^2 - H^2] \cdot b, \quad (4.25)$$

$$M_1 = \frac{\gamma}{g} \cdot (Q_i \cdot v), \quad (4.26)$$

$$M_2 = \frac{\gamma}{g} \cdot (Q_i \cdot v_2), \quad (4.27)$$

kde H je energetická přepadová výška, P je výška přelivu, b je šířka přelivu, h_2 je výška vody nad korunou přelivu v Profilu 2, v a v_2 jsou průřezové rychlosti v Profilu 1 a Profilu 2, γ je měrná tíha vody vyjádřená jako

$$\gamma = \rho \cdot g, \quad (4.28)$$

kde ρ je hustota vody a g tíhové zrychlení.

Dosazením rovnic (4.23) až (4.27) do vztahu (4.22) se získá

$$\frac{g \cdot b}{2} \cdot (H + P)^2 + Q_i \cdot v = \frac{g \cdot b}{2} \cdot [(H + P)^2 - H^2] + \frac{g \cdot b}{2} \cdot h_2^2 + Q_i \cdot v_2. \quad (4.29)$$

Použitím rovnice spjitosti pro Profil 1 a Profil 2 [21]

$$v \cdot (h + P) \cdot b = v_2 \cdot h_2 \cdot b = Q_i, \quad (4.30)$$

v rovnici (4.29) a následnými úpravami se dostane vztah

$$(H + P)^2 - h_2^2 - (H + P)^2 + H^2 = \frac{2 \cdot Q_i^2}{g \cdot b^2} \cdot \left[\frac{1}{h_2} - \frac{1}{(H + P)} \right]^{-1}, \quad (4.31)$$

pro rovnici průtoku tedy

$$Q_i^2 = \frac{g \cdot b^2}{2} \cdot (H - h_2^2) \cdot \left[\frac{1}{h_2} - \frac{1}{(H + P)} \right]^{-1}. \quad (4.32)$$

Zavede-li se [23]

$$h_2 = h_k = \frac{2}{3} \cdot H, \quad (4.33)$$

postupnými úpravami se získá rovnice průtoku ve tvaru

$$Q_i^2 = \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \left(\frac{2}{3} \right)^2 \right] \cdot g \cdot b^2 \cdot H^2 \cdot \left[\frac{3}{2 \cdot H} - \frac{1}{(H + P)} \right]^{-1}. \quad (4.34)$$

Aplikací součinitele průtoku, jež vyjadřuje poměr mezi skutečným a ideálním průtokem [23]

$$\frac{Q}{Q_i} = C_D, \quad (4.35)$$

se obdrží

$$Q = C_D \cdot \left(\frac{5}{18} \right)^{1/2} \cdot g^{1/2} \cdot b \cdot H \cdot \left[\frac{3}{2 \cdot H} - \frac{1}{(H + P)} \right]^{-1/2}. \quad (4.36)$$

4.3 Odvození z rozměrové analýzy

Rozměrová analýza je metoda, pomocí které lze získat některé základní poznatky o zkoumaném ději za předpokladu, že tento děj lze vyjádřit rozměrově homogenní rovnicí obsahující proměnné, jež jej ovlivňují. Dosáhne se tak především určitého seskupení proměnných a také zmenšení jejich celkového počtu [4].

Uvažuje-li se, že lze u přepadu uplatnit Froudovo kritérium podobnosti, tedy podmínku dynamické podobnosti děje za výhradního působení tíhových sil a zanedbání vlivu působení povrchového napětí a tření, veličinami charakterizující přepad pak jsou [23]

$$f\{h, v, \rho, g, b, t, P\} = 0. \quad (4.37)$$

Aplikací např. Buckinghamovy metody rozměrové analýzy (π – teorém) lze tyto proměnné fyzikální veličiny převést na vztah se čtyřmi bezrozměrnými argumenty

$$F\left\{\frac{g \cdot h}{v^2}, \frac{b}{h}, \frac{t}{h}, \frac{P}{h}\right\} = 0. \quad (4.38)$$

Zapsáním prvního argumentu v upraveném tvaru [23]

$$Fr = \frac{v^2}{g \cdot h} = \frac{Q^2}{b^2 \cdot h^2 \cdot g \cdot h}, \quad (4.39)$$

lze vyjádřit rovnici pro výpočet průtoku Q jako

$$Q = C \cdot g^{1/2} \cdot b \cdot h^{3/2}, \quad (4.40)$$

kde vliv dalších argumentů charakterizuje součinitel průtoku

$$C = f_c \left\{ \frac{b}{h}, \frac{t}{h}, \frac{P}{h} \right\}. \quad (4.41)$$

4.4 Platnost a použitelnost rovnic

Všechny tři základní přístupy jsou použitelné, avšak rovnice jsou platné pouze za podmínek, pro které byly odvozeny. Jejich užití je tudíž omezeno vlivy, které byly zanedbány. Jedná se především o povrchové napětí a tření kapaliny.

5 SOUČINTEL PRŮTOKU

Pro stanovení průtoku přes širokou korunu je nejčastěji využívána rovnice odvozená z Bernoulliho rovnice pro kritické proudění ideální kapaliny (4.13) [5]. Vzhledem k tomu, že energetická výška H nemůže být měřena přímo, rovnice smí být vyjádřena pomocí měřené přepadové výšky h [6]

$$Q = C \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot b \cdot h^{3/2}, \quad (5.1)$$

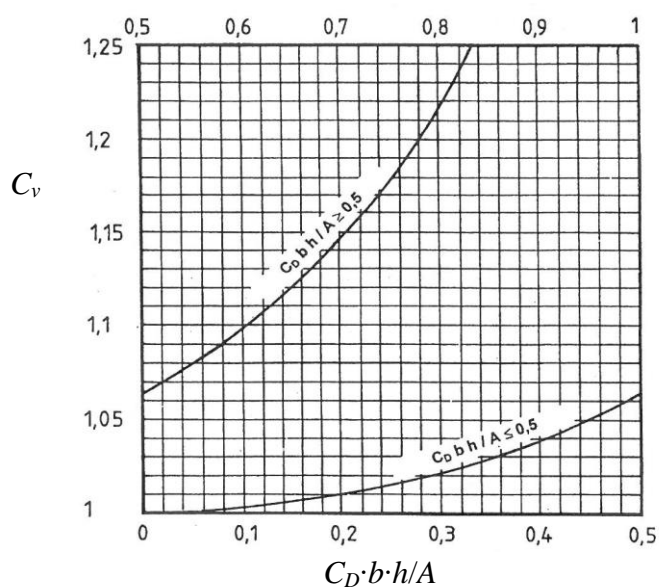
kde C je součinitel průtoku vztažený k měřené přepadové výšce a lze jej zapsat jako součin součinitele průtoku vztaženého k energetické přepadové výšce C_D a bezrozměrného součinitele C_v vyjadřujícího vliv přítokové rychlosti

$$C = C_D \cdot C_v. \quad (5.2)$$

Pro obdélníkový profil platí

$$C_v = \left[\frac{H}{h}\right]^{3/2}, \quad (5.3)$$

přičemž hodnoty C_v mohou být vyčteny z grafu (Obr. 5.1), kde A je průtočný průřez v přítokovém korytě v měrném profilu při dané hladině vody [6].



Obr. 5.1 Součinitel přítokové rychlosti C_v [6]

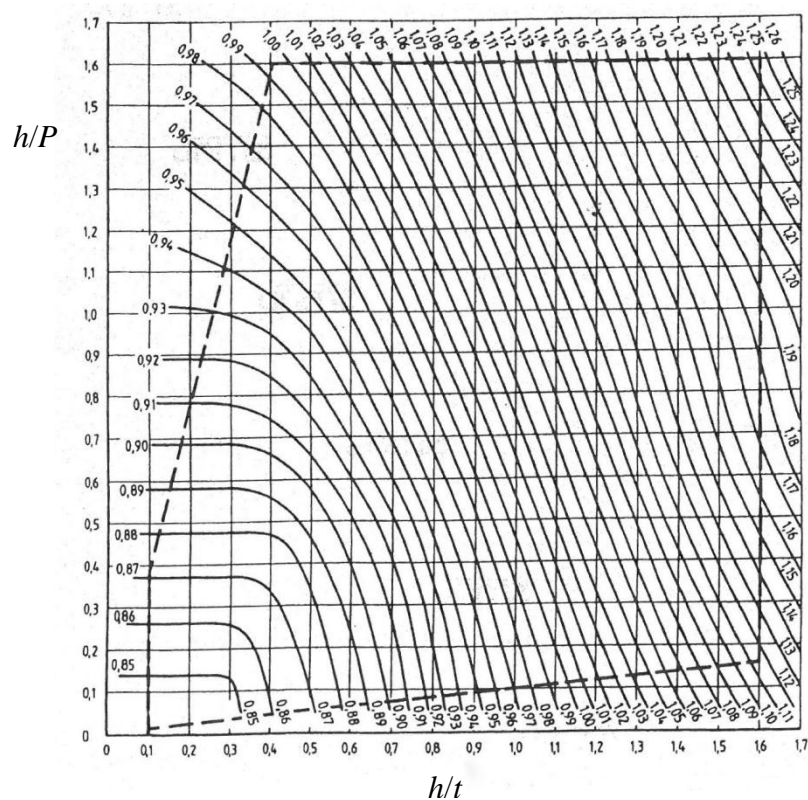
5.1 Stanovení součinitele průtoku

Konstantní hodnota součinitele průtoku v závislosti na relativní výšce a relativní šířce přelivu je autory udávána různě. To samé platí i pro meze její použitelnosti (Tab. 4).

Tab. 4 Konstantní hodnota součinitele průtoku a meze platnosti

Autor	h/t	h/P respektive $h/(h+P)$	Souč. průtoku
Norma ČSN 3846 [5]	$0,1 \leq h/t \leq 0,3$	$h/P < 0,15$	$C = 0,850$
Sreetharan [20]	$0,08 < h/t < 0,4$	$0,15 < h/P < 0,55$	$C = 0,865$
Bos [3]	$0,08 < h/t \leq 0,33$	$h/(h+P) \leq 0,35$	$C_D = 0,848$
Singer [19]	$0,08 \leq h/t \leq 0,33$	$0,18 \leq h/(h+P) \leq 0,36$	$C_D = 0,8477$

Překročení těchto mezí má vliv na změnu součinitele průtoku. Dle normy [5] při relativní výšce přelivu $h/P > 0,15$ dochází v pozorované oblasti ($0,1 < h/t \leq 0,4$ a $h/P \leq 1,6$) k nárůstu součinitele průtoku vztaheného k přepadové výšce až na hodnotu $C = 0,994$ (Tab. 5), (Obr. 5.2). Mezilehlé hodnoty C mohou být získány lineární interpolací.

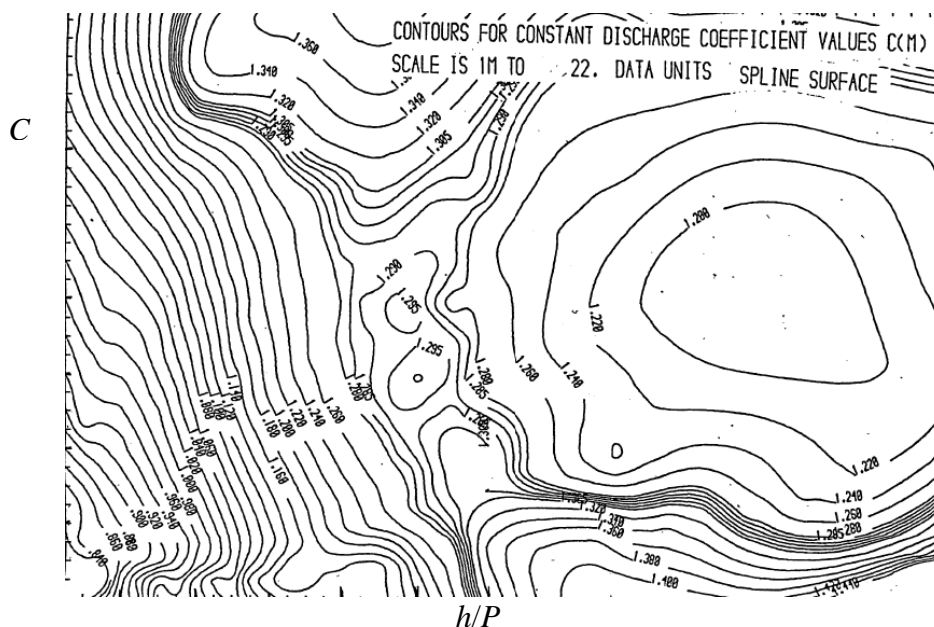


Obr. 5.2 Součinitel průtoku C v závislosti na h/t a h/P [5]

Tab. 5 Součinitel průtoku přelivu se širokou korunou, vztažený k přepadové výšce [5]

	h/t			
h/P	0,1	0,2	0,3	0,4
0,1	0,850	0,850	0,850	0,861
0,2	0,855	0,855	0,855	0,864
0,3	0,864	0,864	0,864	0,868
0,4	0,873	0,873	0,873	0,874
0,5	0,882	0,882	0,882	0,883
0,6	0,892	0,892	0,892	0,894
0,7	0,901	0,901	0,901	0,906
0,8	0,911	0,911	0,912	0,916
0,9	0,921	0,921	0,922	0,926
1,0	0,929	0,929	0,931	0,936
1,1	0,935	0,937	0,940	0,946
1,2	0,941	0,944	0,949	0,956
1,3	0,946	0,951	0,957	0,966
1,4	0,953	0,959	0,967	0,975
1,5	0,961	0,968	0,975	0,984
1,6	0,972	0,978	0,985	0,994

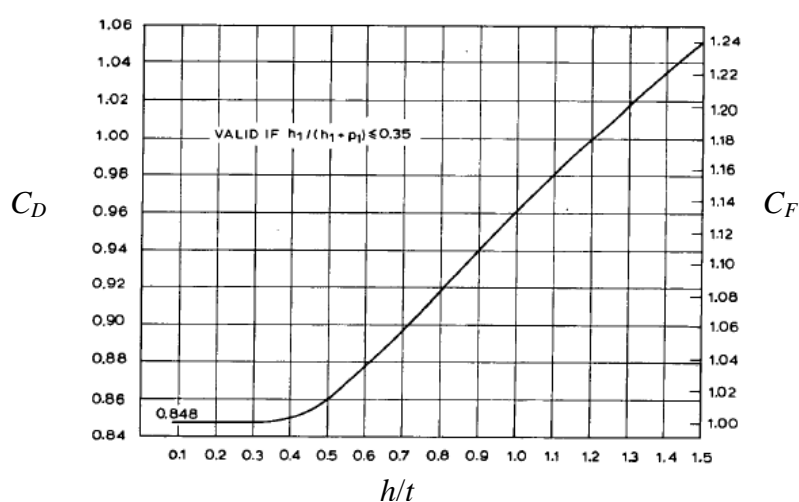
Sreetharan vyjadřuje závislost C na h/P a h/t graficky pomocí izolinií v rozsahu $h/P \leq 4$ a $h/t \leq 6$ (Obr. 5.3) [20], tedy i mimo rozsah přelivů se širokou korunou [8].



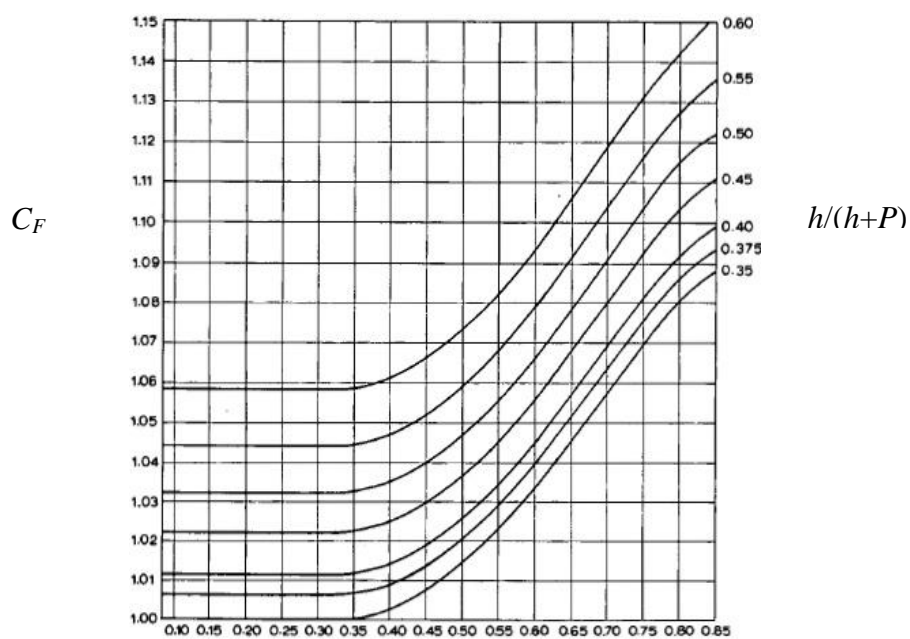
Obr. 5.3 Mapa izolinií hodnot součinitel průtoku C [20]

Bos [3] vychází z výsledků měření Singera [19]. Při překročení mezí v Tab. 4 tyto autoři využívají k určení součinitele průtoku vztáženého k energetické přepadové výšce C_D opravný součinitel C_F .

Dle Bose jsou (pomocí hodnot opravného součinitele C_F) přepočítané hodnoty součinitele průtoku C_D v rozsahu $h/(h+P) \leq 0,35$ a $0,08 < h/t < 1,5$ graficky vyjádřeny na Obr. 5.4 [8]. Hodnoty C_F v rozmezí $0,35 < h/(h+P) < 0,6$ a $0,08 < h/t < 0,85$ zobrazuje graf na Obr. 5.5 [3]. Oba grafy platí i mimo rozsah přelivů se širokou korunou [8].



Obr. 5.4 Opravný součinitel C_F pro přepad přes přeliv pravoúhlého průřezu [3]



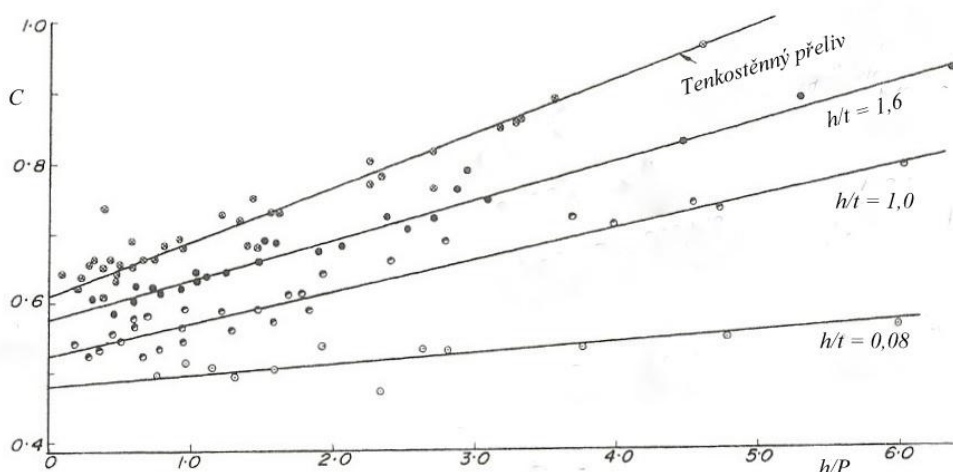
Obr. 5.5 Opravný součinitel C_F pro přepad přes nízký přeliv pravoúhlého průřezu [3]

Dále byla pro výpočet součinitele průtoku zavedena řada rovnic.

Rao a Shukla [17] vyjádřili na základě měření vztah pro výpočet C v závislosti na relativní výšce h/P a relativní tloušťce přelivu h/t pro vybrané typy přelivů s pravoúhlým průřezem (Tab. 6). Graficky jsou výsledky měření i daná závislost znázorněny na Obr. 5.6.

Tab. 6 Součinitel průtoku C na koruně přelivu pravoúhlého průřezu [17]

h/t	C
0,08	$0,482 + 0,02 \cdot (h/P)$
1,00	$0,527 + 0,049 \cdot (h/P)$
1,60	$0,578 + 0,061 \cdot (h/P)$
> 1,60	$0,611 + 0,08 \cdot (h/P)$



Obr. 5.6 Součinitel průtoku C přelivu s pravoúhlým průřezem [17]

Pro přelivy se širokou korunou Doeringsfeld a Barker [1] doporučují zjednodušenou rovnici odvozenou z hybnosti proudu

$$C = \frac{9}{8} \cdot \left[\frac{P+h}{2 \cdot (P+H) - h} \right]^{1/2} = \frac{9}{8} \cdot \left\{ \frac{1+(h/P)}{2 \cdot [1+(h/P)] - (h/P)} \right\}^{1/2} \quad (5.4)$$

Ramamurthy [1] uvádí vztah

$$C = \left\{ \frac{12}{16} \cdot \frac{(h+P)^2 - \left(\frac{h_2}{h}\right) - K_p \cdot \left[\left(\frac{2 \cdot h + P}{h}\right) \cdot \frac{P}{h} \right]}{\frac{h}{h_2} - \left(\frac{h}{h+P}\right)} \right\}^{1/2}, \quad (5.5)$$

kde h_2 je výška paralelního proudu a K_p tlakový koeficient.

K dispozici jsou také rovnice, kde hodnota součinitele průtoku závisí pouze na relativní tloušťce přelivu, vyjádřené jako poměr přepadové výšky h nebo energetické přepadové výšky H a tloušťky přelivu t .

Govida Rayo a Muralidhar doporučují pro přelivy se širokou korunou rovnicí [1]

$$C = 0,913 + 0,049 \cdot (h/t). \quad (5.6)$$

Hager a Schwalt udávají vztah [9]

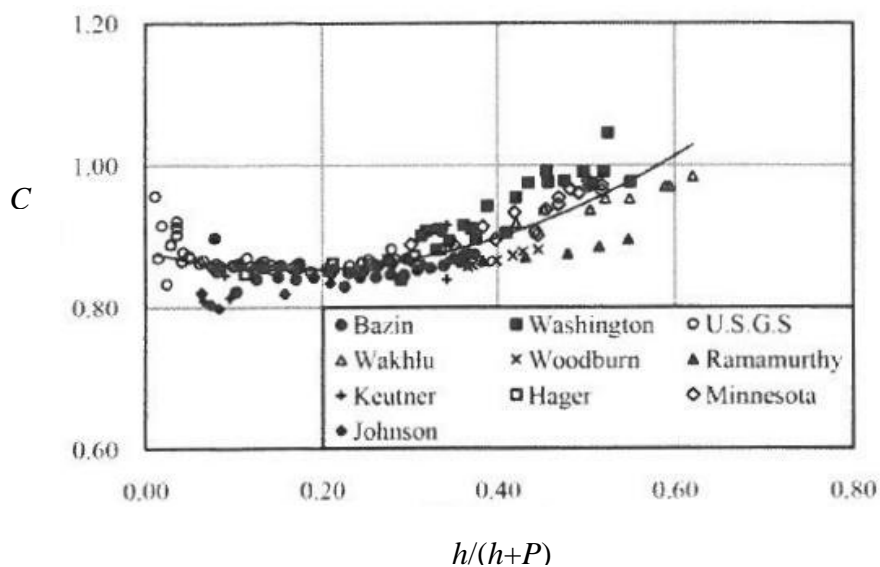
$$C_D = 0,326 \cdot [1 - (2/9)]^{-1} \cdot \left[1 - \frac{(2/9)}{1 + (H/t)^4} \right]. \quad (5.7)$$

Z měření stanovených hodnot součinitele průtoku (Obr. 5.7) vyvodili Azimi a Rajaratnam závislost [1]

$$C = 0,873 \cdot \left(\frac{h}{h+P}\right)^2 - 0,3 \cdot \left(\frac{h}{h+P}\right) + 0,878. \quad (5.8)$$

Po eliminaci dle jejich soudu irelevantních dat rovnicí dále upravili na tvar [1]

$$C = 0,95 \cdot \left(\frac{h}{h+P}\right)^2 - 0,38 \cdot \left(\frac{h}{h+P}\right) + 0,89. \quad (5.9)$$



Obr. 5.7 Měření stanovené hodnoty součinitele průtoku [1]

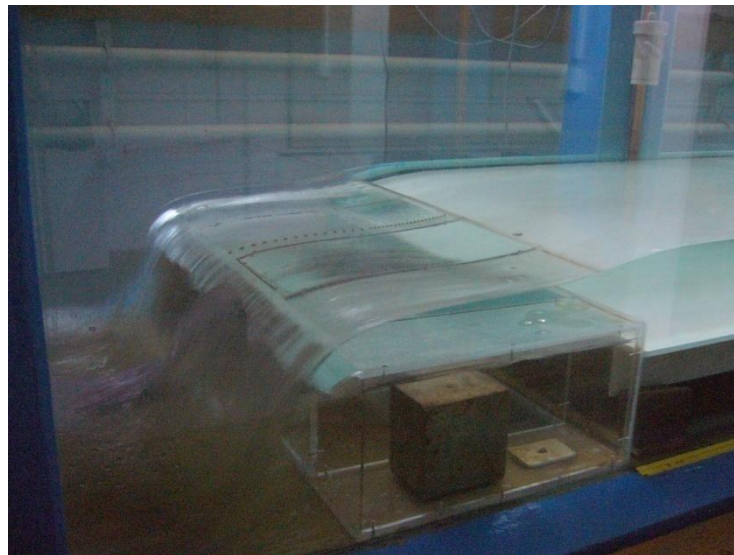
Hodnoty součinitele průtoku lze tedy stanovit mnoha způsoby. Rozptyl těchto hodnot je však relativně velký, proto bylo za účelem zjištění vhodnosti výše uvedených doporučených hodnot, grafických vyjádření a rovnic, provedeno vlastní měření.

6 EXPERIMENT

Experiment byl proveden v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně.

Přeliv pravoúhlého průřezu se širokou korunou o šířce $b = 1,003$ m a tloušťce $t = 0,500$ m (Obr. 6.1) byl umístěn ve žlabu o rozměrech 12 m x 1 m x 1 m s bočními stěnami ze skla a se dnem z betonu (Obr. 6.2). Výška přelivu P byla pro jednotlivé měřené stavy 0,250 m, 0,151 m, 0,103 m, 0,077 m a 0,052 m.

Průtok vody Q byl stanoven měřením úrovně hladiny v měrné nádrži osazené kalibrovaným Thomsonovým přelivem. Hodnoty se pohybovaly v rozsahu 0,025 m³/s až 0,130 m³/s a byly řízeny pomocí měniče frekvence otáček motoru čerpadel.



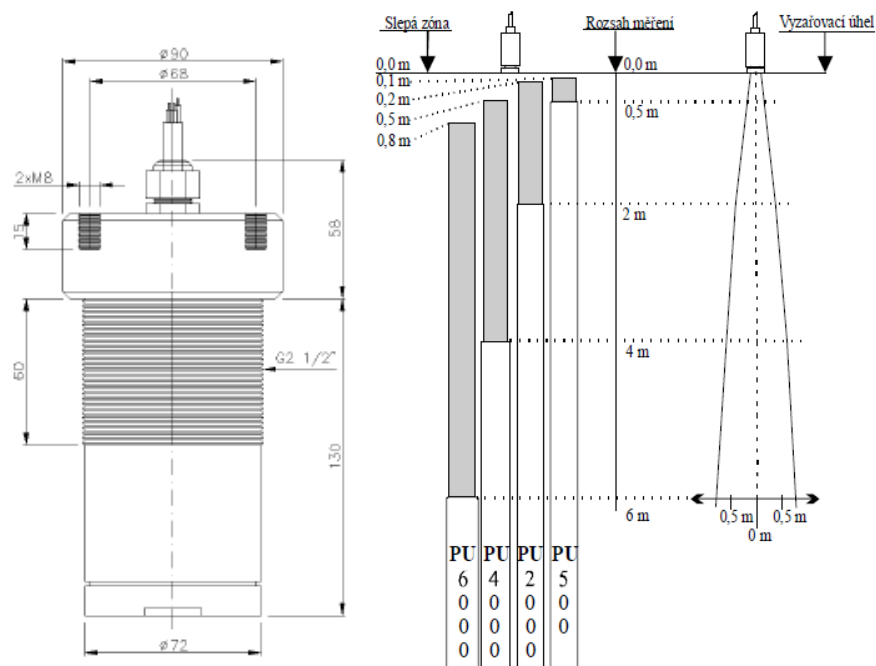
Obr. 6.1 Přeliv pravoúhlého průřezu se širokou korunou a ostrou návodní hranou



Obr. 6.2 Žlab

6.1 Měření

Úroveň hladiny vody ve žlabu byla měřena pomocí dvou ultrazvukových sond PU 500, které jsou určeny pro bezkontaktní měření vzdálenosti hladiny fyzikálních látek v otevřených i uzavřených profilech v rozsahu 0 mm až 400 mm [7]. Sonda č. 1 byla spolu s hrotovým měřidlem umístěna ve vzdálenosti $3 \cdot h$ až $4 \cdot h$ od návodního líce přelivu. Sonda č. 2 sloužila pouze pro kontrolu měřených dat a výsledky jejího měření se při výpočtu součinitele průtoku C_s nevyhodnocovaly. Při montáži sond bylo zapotřebí brát zřetel na vyzařovací úhel (10°) i slepou zónu, jež se v případě PU 500 nachází do vzdálenosti 0,1 m od čidla sondy (Obr. 6.3) [7].



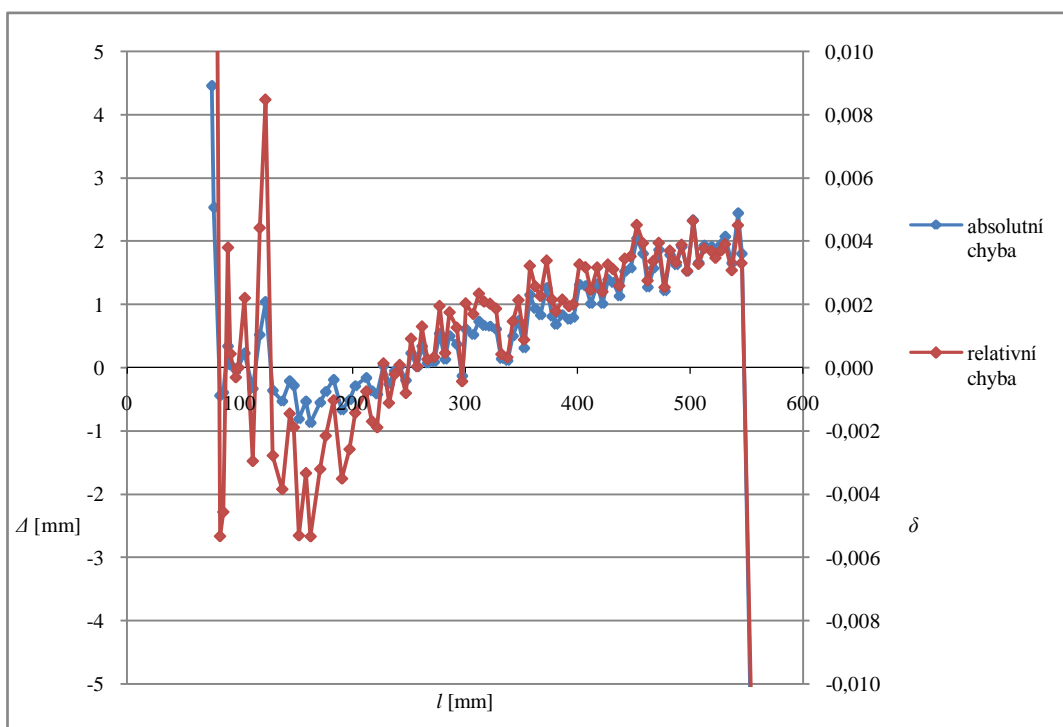
Obr. 6.3 Rozměry a rozsah měření kompaktních ultrazvukových sond PU [7]

6.1.1 Ověření sond

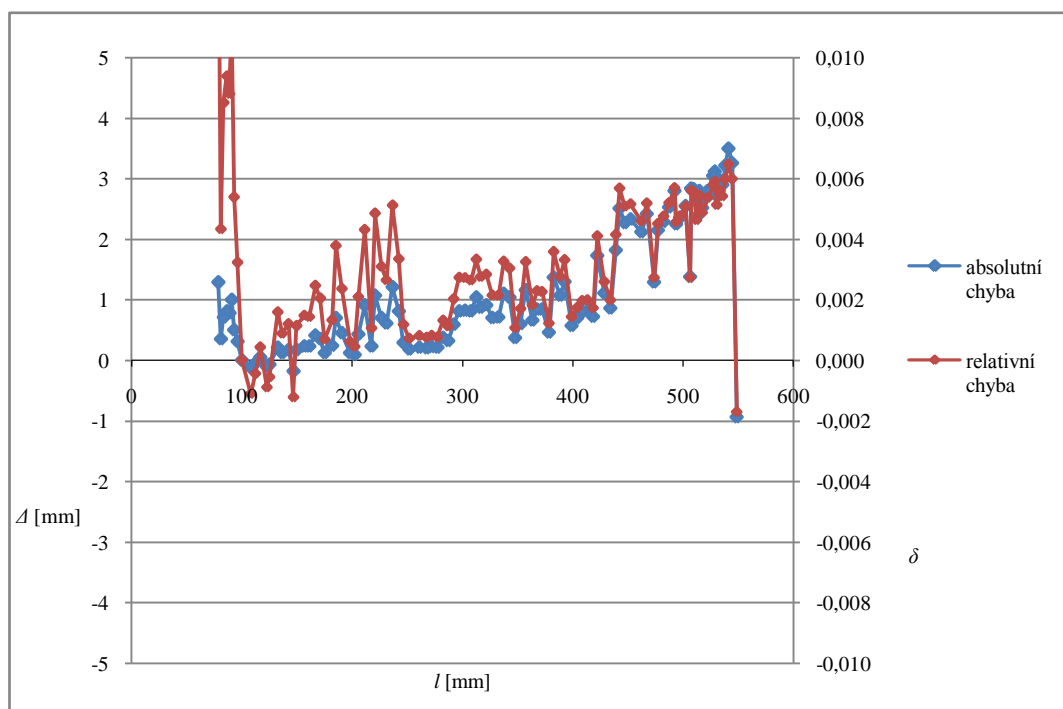
Před samotným měřením bylo zapotřebí ověřit přesnost dat, které sondy poskytují. Prvním krokem bylo vzájemné porovnání hodnot měřených digitálním posuvným délkovým měřidlem a jednotlivými sondami (Obr. 6. 4) v celém rozsahu měření PU 500 udávaném výrobcem a následný výpočet absolutní a relativní chyby (Obr. 6.5), (Obr. 6.6).



Obr. 6.4 Princip porovnávání měřených hodnot digitálního posuvného délkového měřidla a jednotlivých sond



Obr. 6.5 Absolutní a relativní chyba měření sondy č. 1

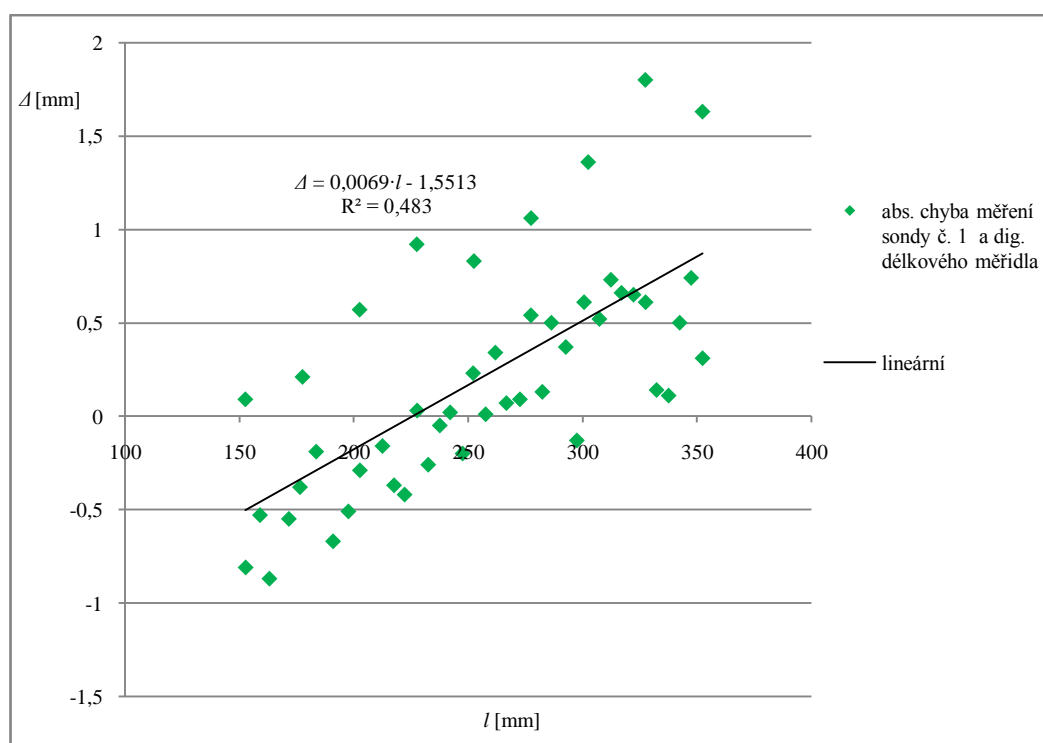


Obr. 6.6 Absolutní a relativní chyba měření sondy č. 2

Jak již bylo výše zmíněno, k vyhodnocování výsledků měření sloužila pouze sonda č. 1. Za reprezentativní výsledky měření byly v tomto případě uvažovány hodnoty od 150 mm do 350 mm, což byl rozsah měření úrovně hladiny. V tomto rozmezí byl aproximací lineární funkcí absolutní chyby měření digitálního délkového měřidla a sondy č. 1 stanovena opravná funkce

$$\Delta = 0,0069 \cdot l - 1,5513, \quad (6.1)$$

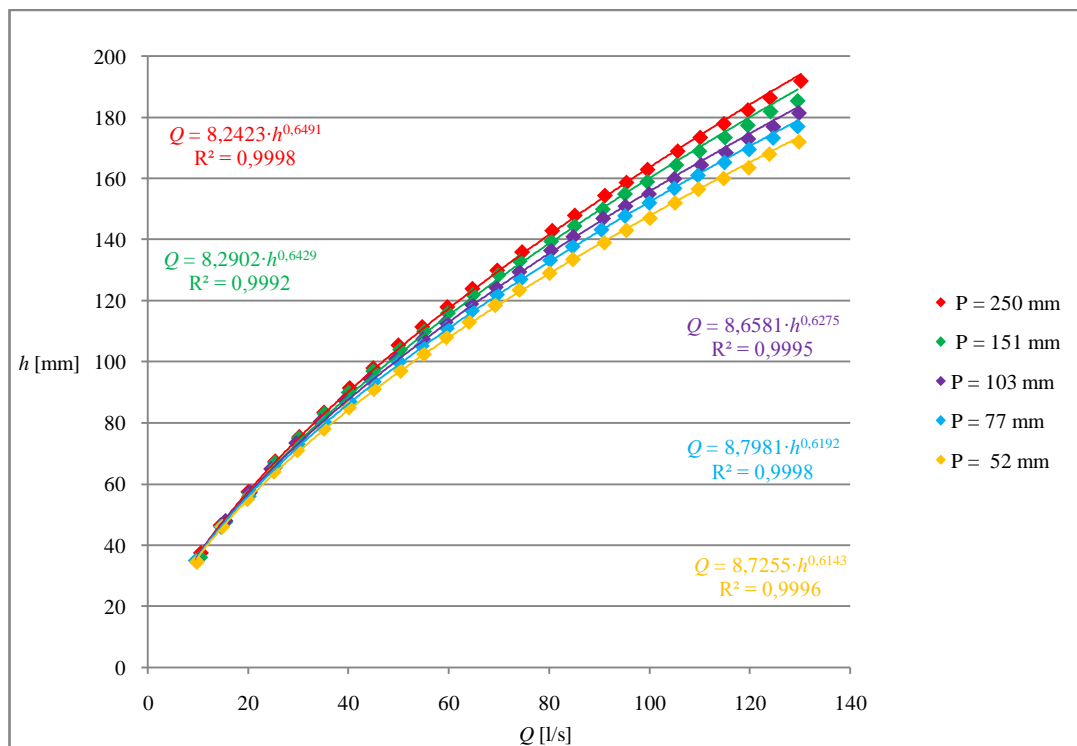
s koeficientem determinace $R^2 = 0,483$ (Obr. 6.7).



Obr. 6.7 Opravná funkce sondy č. 1

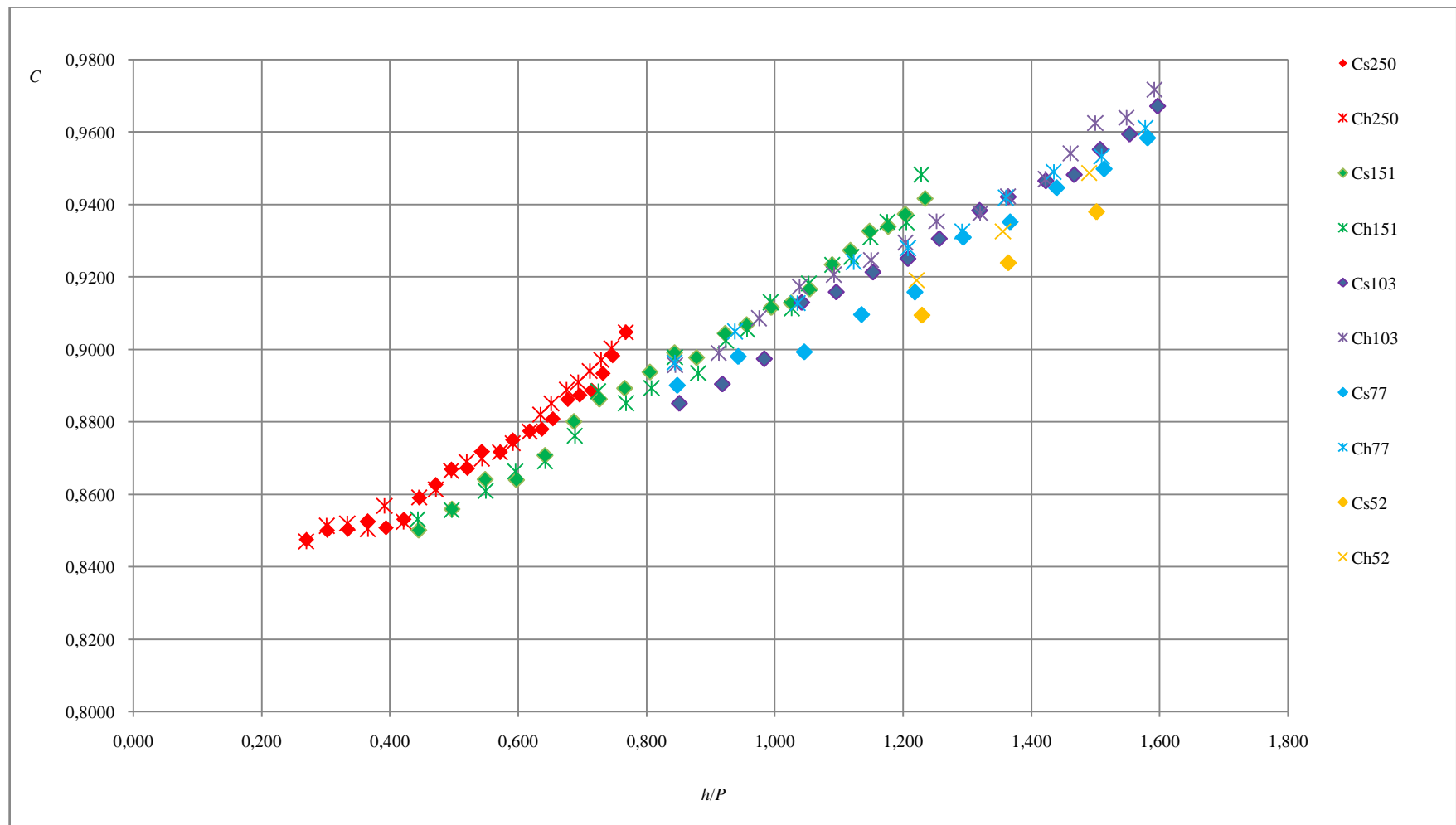
6.2 Zpracování dat

Souběžně se zaznamenáváním hodnot úrovně hladiny poskytnutými sondou č. 1 při různých průtokových stavech i výškách přelivu, byly tyto hodnoty zjišťovány pomocí hrotového měřidla a následně vytvořeny měrné křivky jednotlivých přelivů (Obr. 6.8).



Obr. 6.8 Měrné křivky jednotlivých přelivů

Z rozdílu změřené úrovně hladiny před přelivem (pomocí sondy č. 1 a hrotového měřidla) a změřené úrovně koruny přelivu byla stanovena přepadová výška h . Dle rovnice (5.1) byly pro dané výšky přelivu P vypočítány součinitelé průtoku C_s a C_h (Tab. 7) až (Tab. 11). Grafické zobrazení jejich závislosti na h/P v celém rozsahu měření dokumentuje Obr. 6.9.



Obr. 6.9 Součinitel průtoku C v závislosti na relativní výšce přelivu h/P

Tab. 7 Výsledky měření, $P = 0,250$ m

Číslo měření	Průtok Q [m ³ /s]	Přepadová výška (hrot) h_h [m]	Relativní výška přelivu (hrot) h_h/P	Součinitel průtoku (hrot) C_{h250}	Přepadová výška (sonda) h_s [m]	Relativní výška přelivu (sonda) h_s/P	Součinitel průtoku (sonda) C_{s250}	Relativní tloušťka přelivu h_s/t
1	0,0254	0,068	0,270	0,8470	0,067	0,270	0,8475	0,135
2	0,0302	0,076	0,302	0,8513	0,076	0,302	0,8501	0,151
3	0,0352	0,084	0,334	0,8519	0,084	0,334	0,8504	0,167
4	0,0403	0,092	0,366	0,8504	0,091	0,365	0,8527	0,183
5	0,0450	0,098	0,392	0,8568	0,098	0,394	0,8508	0,197
6	0,0500	0,106	0,422	0,8524	0,105	0,422	0,8531	0,211
7	0,0547	0,112	0,446	0,8592	0,112	0,446	0,8590	0,223
8	0,0597	0,118	0,472	0,8613	0,118	0,471	0,8627	0,236
9	0,0647	0,124	0,496	0,8665	0,124	0,496	0,8669	0,248
10	0,0697	0,130	0,520	0,8690	0,130	0,521	0,8672	0,260
11	0,0746	0,136	0,544	0,8698	0,136	0,543	0,8718	0,272
12	0,0806	0,143	0,572	0,8716	0,143	0,572	0,8717	0,286
13	0,0851	0,148	0,592	0,8741	0,148	0,592	0,8750	0,296
14	0,0911	0,155	0,618	0,8773	0,154	0,618	0,8775	0,309
15	0,0954	0,159	0,635	0,8820	0,159	0,637	0,8780	0,318
16	0,0996	0,163	0,652	0,8851	0,164	0,654	0,8808	0,327
17	0,1056	0,169	0,676	0,8889	0,169	0,677	0,8862	0,339
18	0,1101	0,174	0,694	0,8909	0,174	0,696	0,8874	0,348
19	0,1148	0,178	0,712	0,8940	0,179	0,715	0,8887	0,357
20	0,1196	0,183	0,730	0,8971	0,183	0,732	0,8933	0,366
21	0,1240	0,187	0,746	0,9003	0,187	0,747	0,8982	0,374
22	0,1302	0,192	0,768	0,9047	0,192	0,768	0,9048	0,384

Tab. 8 Výsledky měření, $P = 0,151$ m

Číslo měření	Průtok Q [m ³ /s]	Přepadová výška (hrot) h_h [m]	Relativní výška přelivu (hrot) h_h/P	Součinitel průtoku (hrot) C_{h151}	Přepadová výška (sonda) h_s [m]	Relativní výška přelivu (sonda) h_s/P	Součinitel průtoku (sonda) C_{s151}	Relativní tloušťka přelivu h_s/t
1	0,0253	0,067	0,444	0,8531	0,067	0,445	0,8501	0,134
2	0,0301	0,075	0,497	0,8556	0,075	0,497	0,8559	0,150
3	0,0352	0,083	0,550	0,8608	0,083	0,548	0,8641	0,166
4	0,0400	0,090	0,596	0,8664	0,090	0,597	0,8639	0,180
5	0,0449	0,097	0,642	0,8691	0,097	0,642	0,8707	0,194
6	0,0503	0,104	0,689	0,8762	0,104	0,687	0,8801	0,207
7	0,0551	0,110	0,725	0,8885	0,110	0,726	0,8863	0,219
8	0,0598	0,116	0,768	0,8851	0,116	0,766	0,8893	0,231
9	0,0648	0,122	0,808	0,8893	0,122	0,805	0,8937	0,243
10	0,0699	0,128	0,844	0,8979	0,127	0,844	0,8991	0,255
11	0,0741	0,133	0,881	0,8934	0,133	0,878	0,8977	0,265
12	0,0804	0,140	0,924	0,9024	0,139	0,922	0,9044	0,279
13	0,0851	0,145	0,957	0,9055	0,144	0,956	0,9068	0,289
14	0,0907	0,150	0,993	0,9130	0,150	0,994	0,9116	0,300
15	0,0951	0,155	1,026	0,9113	0,155	1,025	0,9128	0,310
16	0,0996	0,159	1,053	0,9182	0,159	1,054	0,9166	0,318
17	0,1054	0,165	1,089	0,9234	0,165	1,089	0,9234	0,329
18	0,1100	0,169	1,119	0,9255	0,169	1,118	0,9273	0,338
19	0,1151	0,174	1,149	0,9310	0,173	1,148	0,9326	0,347
20	0,1196	0,178	1,175	0,9353	0,178	1,177	0,9339	0,355
21	0,1242	0,182	1,205	0,9351	0,182	1,203	0,9374	0,363
22	0,1296	0,186	1,228	0,9483	0,186	1,234	0,9416	0,373

Tab. 9 Výsledky měření, $P = 0,103 \text{ m}$

Číslo měření	Průtok $Q \text{ [m}^3/\text{s]}$	Přepadová výška (hrot) $h_h \text{ [m]}$	Relativní výška přelivu (hrot) h_h/P	Součinitel průtoku (hrot) C_{h103}	Přepadová výška (sonda) $h_s \text{ [m]}$	Relativní výška přelivu (sonda) h_s/P	Součinitel průtoku (sonda) C_{s103}	Relativní tloušťka přelivu h_s/t
1	0,0246	0,065	0,626	0,8782	0,065	0,632	0,8672	0,130
2	0,0296	0,073	0,709	0,8776	0,073	0,711	0,8728	0,147
3	0,0345	0,080	0,777	0,8903	0,081	0,784	0,8777	0,162
4	0,0393	0,087	0,845	0,8956	0,088	0,851	0,8851	0,175
5	0,0443	0,094	0,913	0,8989	0,095	0,918	0,8904	0,189
6	0,0495	0,101	0,976	0,9086	0,101	0,984	0,8974	0,203
7	0,0549	0,107	1,039	0,9173	0,107	1,042	0,9129	0,215
8	0,0594	0,113	1,092	0,9206	0,113	1,096	0,9158	0,226
9	0,0645	0,119	1,150	0,9247	0,119	1,153	0,9213	0,238
10	0,0694	0,124	1,204	0,9295	0,124	1,208	0,9250	0,249
11	0,0741	0,129	1,252	0,9353	0,129	1,257	0,9306	0,259
12	0,0804	0,136	1,320	0,9375	0,136	1,320	0,9383	0,272
13	0,0849	0,141	1,364	0,9422	0,141	1,364	0,9421	0,281
14	0,0908	0,147	1,422	0,9470	0,147	1,423	0,9465	0,293
15	0,0953	0,151	1,461	0,9540	0,151	1,467	0,9482	0,302
16	0,1000	0,155	1,500	0,9625	0,155	1,508	0,9552	0,311
17	0,1050	0,160	1,549	0,9639	0,160	1,553	0,9594	0,320
18	0,1104	0,164	1,592	0,9716	0,165	1,597	0,9672	0,329

Tab. 10 Výsledky měření, $P = 0,077 \text{ m}$

Číslo měření	Průtok $Q \text{ [m}^3/\text{s]}$	Přepadová výška (hrot) $h_h \text{ [m]}$	Relativní výška přelivu (hrot) h_h/P	Součinitel průtoku (hrot) C_{h77}	Přepadová výška (sonda) $h_s \text{ [m]}$	Relativní výška přelivu (sonda) h_s/P	Součinitel průtoku (sonda) C_{s77}	Relativní tloušťka přelivu h_s/t
1	0,0254	0,065	0,844	0,8963	0,065	0,848	0,8901	0,131
2	0,0301	0,072	0,938	0,9049	0,073	0,943	0,8980	0,145
3	0,0352	0,080	1,036	0,9127	0,081	1,046	0,8993	0,161
4	0,0402	0,087	1,123	0,9241	0,087	1,135	0,9096	0,175
5	0,0450	0,093	1,208	0,9279	0,094	1,218	0,9158	0,188
6	0,0501	0,100	1,292	0,9325	0,100	1,294	0,9309	0,199
7	0,0546	0,105	1,360	0,9418	0,105	1,367	0,9352	0,210
8	0,0596	0,111	1,435	0,9489	0,111	1,439	0,9446	0,222
9	0,0646	0,116	1,510	0,9531	0,117	1,513	0,9498	0,233
10	0,0696	0,122	1,578	0,9611	0,122	1,581	0,9584	0,243

Tab. 11 Výsledky měření, $P = 0,052 \text{ m}$

Číslo měření	Průtok $Q \text{ [m}^3/\text{s]}$	Přepadová výška (hrot) $h_h \text{ [m]}$	Relativní výška přelivu (hrot) h_h/P	Součinitel průtoku (hrot) C_{h52}	Přepadová výška (sonda) $h_s \text{ [m]}$	Relativní výška přelivu (sonda) h_s/P	Součinitel průtoku (sonda) C_{s52}	Relativní tloušťka přelivu h_s/t
1	0,0252	0,064	1,221	0,9191	0,064	1,230	0,9095	0,128
2	0,0299	0,071	1,356	0,9325	0,071	1,364	0,9239	0,142
3	0,0350	0,078	1,490	0,9487	0,078	1,502	0,9379	0,156

7 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ S JINÝMI AUTORY, VYHODNOCENÍ

K porovnání výsledků měření sondy č. 1 a hrotového měřidla (Tab. 7) až (Tab. 11) byly použity hodnoty doporučené normou ČSN ISO 3846 [5] (Tab. 13), vztahy (Tab. 13), grafické vyjádření (Tab. 13) a výsledky měření jiných autorů (Tab. 12). Hodnoty součinitele průtoku C (ze všech výše zmíněných tabulek) byly v závislosti na relativní výšce přelivu h/P vyneseny do grafu (Obr. 7.1).

Tab. 12 znázorňuje výsledky měření, které udávají (pro přehlednost uvedené dle jména autora a roku vydání) :

- Tim (1986) [21].
- Bazin (1898) provedl měření v rozsahu $0,03 \leq h/t \leq 1,98$ a $0,07 \leq h/P \leq 0,60$. Minimální přepadová výška $h_{min} = 0,055$ m. Minimální hodnota součinitele průtoku $C = 0,729$, maximální hodnota $C = 1,201$ [11].
- Cornell University (1899). Měřením byly určeny hodnoty součinitele průtoku C v rozsahu 0,726 až 1,200 pro přelivy s relativní tloušťkou $0,01 \leq h/t \leq 4,15$ a relativní výškou $0,01 \leq h/P \leq 1,11$ [11].
- Zachoval a Roušar (2011) stanovili hodnoty součinitele průtoku C měřením úrovně hladiny před přelivem při různých průtocích vody Q pomocí hrotového měřidla. Třetí zóna odtržení byla zavzdušněna. Na základě změřených dat v mezích $0,07 \leq h/t \leq 0,38$ a $0,15 \leq h/P \leq 0,76$ odvodili tito autoři vztah pro výpočet C , avšak vzhledem k relativně malému množství měření (24) a relativně úzkému rozsahu platnosti přednostně doporučují rovnici uváděnou autory Azimi a Rajaratnam (5.9) [1].

Tab. 12 Hodnoty součinitele průtoku v závislosti na h/P , stanovené měřením jednotlivých autorů

Tim, 1986		Bazin, 1898			Cornell University, 1899			Zachoval, Roušar, 2011	
h/P	C	h/P	C	h/t	h/P	C	h/t	h/P	C
0,25	0,8470	0,11	0,8226	0,107	0,04	0,8644	0,296	0,15	0,8411
0,3	0,8460	0,29	0,8290	0,109	0,03	0,8882	0,200	0,23	0,8398
0,45	0,8590	0,32	0,8420	0,121	0,02	0,9152	0,128	0,30	0,8482
0,6	0,8630	0,36	0,8376	0,133	0,09	0,8509	0,167	0,36	0,8547
0,75	0,8690	0,14	0,8390	0,134	0,11	0,8576	0,211	0,52	0,8810
0,9	0,8780	0,39	0,8454	0,145	0,08	0,8585	0,155	0,64	0,9080
1,05	0,8880	0,42	0,8452	0,156	0,07	0,8617	0,125	0,76	0,9171
1,2	0,8890	0,08	0,8544	0,158	0,18	0,8577	0,340	0,24	0,8514
		0,18	0,8420	0,165	0,14	0,8542	0,270	0,28	0,8554
		0,45	0,8517	0,167	0,05	0,8717	0,100	0,32	0,8524
		0,48	0,8549	0,180	0,04	0,9211	0,131	0,37	0,8498
		0,51	0,8582	0,192	0,11	0,8591	0,388	0,40	0,8625
		0,20	0,8387	0,192	0,09	0,8613	0,306	0,45	0,8560
		0,54	0,8678	0,203	0,07	0,8658	0,247	0,72	0,9140
		0,56	0,8711	0,212	0,05	0,8694	0,190	0,30	0,8482
		0,58	0,8743	0,217	0,04	0,8778	0,158	0,52	0,8709
		0,12	0,8616	0,220	0,13	0,8692	0,118	0,65	0,8996
		0,23	0,8418	0,221	0,15	0,8647	0,141	0,76	0,9135
		0,60	0,8742	0,224	0,20	0,8550	0,183	0,14	0,8587
		0,27	0,8484	0,251	0,23	0,8503	0,211	0,30	0,8567
		0,15	0,8613	0,276	0,27	0,8511	0,248	0,36	0,8690
		0,30	0,8485	0,281	0,30	0,8590	0,277	0,52	0,8862
		0,33	0,8517	0,309	0,34	0,8667	0,311	0,64	0,9122
		0,36	0,8581	0,337	0,39	0,8812	0,356	0,76	0,9207
		0,18	0,8583	0,337	0,17	0,8526	0,116		
		0,39	0,8614	0,366	0,21	0,8581	0,145		
		0,21	0,8613	0,394	0,26	0,8501	0,180		
		0,42	0,8678	0,395	0,33	0,8625	0,225		
					0,39	0,8680	0,272		
					0,09	0,8583	0,116		
					0,11	0,8594	0,139		
					0,13	0,8575	0,168		
					0,16	0,8596	0,207		
					0,21	0,8534	0,258		
					0,27	0,8541	0,341		

Tab. 13 zobrazuje hodnoty součinitele průtoku dle:

- 1) Normy ČSN ISO 3846 *Měření průtoku v otevřených korytech pomocí měrných přelivů a žlabů: Měrné přelivy pravoúhlého průřezu se širokou korunou*. Norma uvádí hodnoty součinitele průtoku C v závislosti na poměrech h/t a h/P v mezích $0,10 \leq h/t \leq 1,80$ a $0,10 \leq h/P \leq 1,60$ [5].
- 2) Vztahů, které vyvodili autoři:
 - Rao, Mulidhar (1963). Hodnota součinitele průtoku C závisí na poměru h/t (5.6) [1].
 - Hager (1986) počítá součinitel průtoku vztažený k energetické přepadové výšce H (5.7) [9], jež je přibližně rovna přepadové výšce h pouze u vysokých přelivů. Tato skutečnost je proto v Tab. 12 zahrnuta.
 - Doeringseld, Barker (1941). V rovnici odvozené z hybnosti proudu (5.4) je počítáno s relativní výškou přelivu vyjádřenou poměrem h/P [1].
 - Azimi, Rajaratnam (2009a, 2009b). Součinitel průtoku je z rovnic (5.8), (5.9) vypočítán v závislosti na $h/(h+P)$ [1].
- 3) Grafického vyjádření:
 - Sreetharan (1998) vyjadřuje závislost součinitele průtoku C na h/P a h/t izoliniemi v rozsahu $h/P \leq 4$ a $h/t \leq 6$. Na základě měření, která uvádí ve své disertační práci, dále stanovil konstantní hodnotu $C = 0,865$ pro $0,08 < h/t < 0,40$ a $0,15 < h/P < 0,55$ [20].
 - Singer (1964) a Bos (1989) zavedli opravný součinitel C_F v mezích platnosti $h/(h+P) \leq 0,35$ a $0,08 < h/t < 1,50$ pro přelivy nízké a $0,35 < h/(h+P) < 0,60$ a $0,05 < h/t < 0,85$ pro přelivy vysoké [3].

V grafu (Obr 7.1) i tabulkách (Tab. 7) až (Tab. 13) jsou uvedeny pouze hodnoty součinitele průtoku C vyhovující limitům normy ČSN ISO 3846 [5], tedy $0,1 < h/t \leq 0,4$; $h/P \leq 1,6$ a $h_{min} = 0,06$ m.

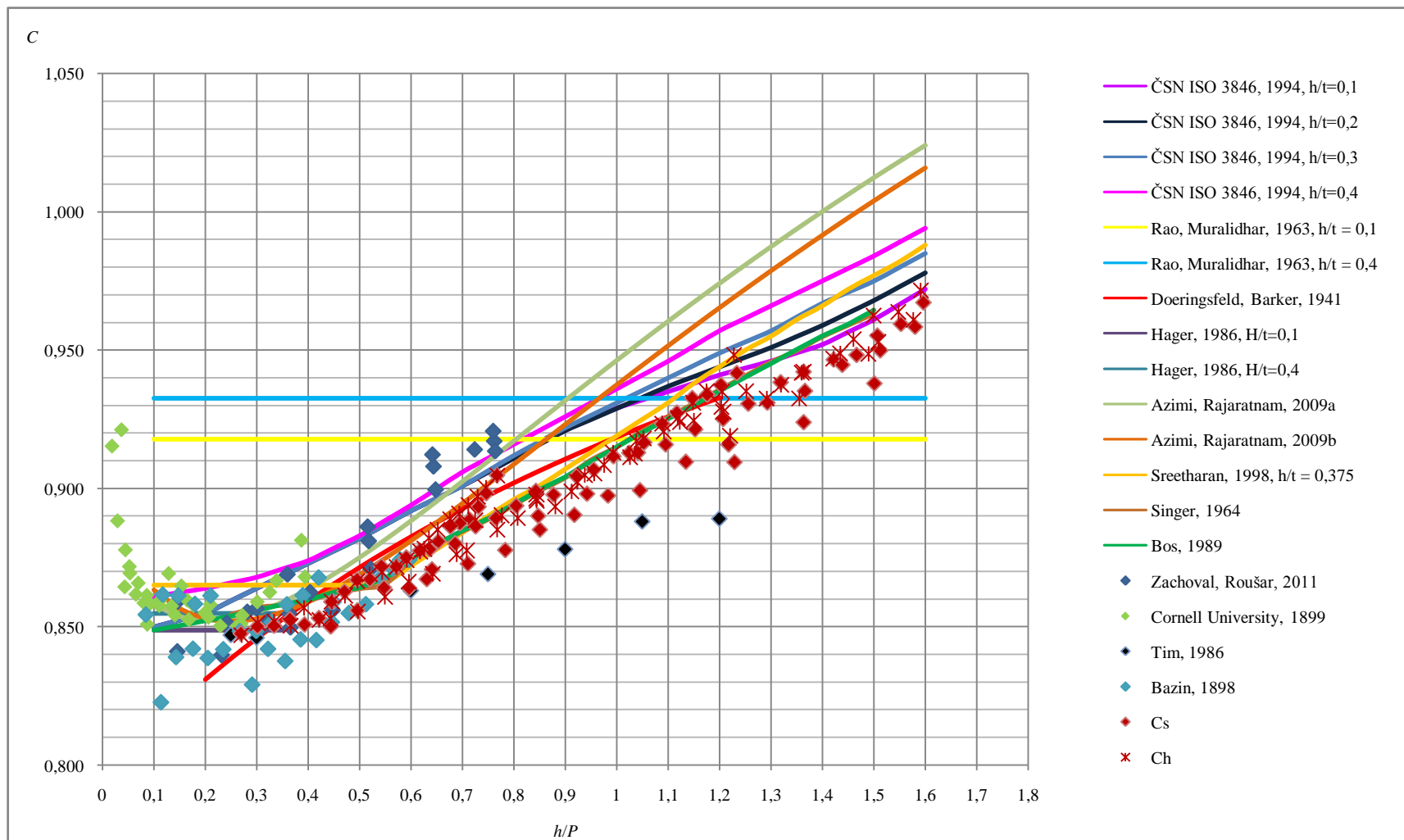
Tab. 13 Hodnoty součinitele průtoku v závislosti na h/P dle normy, vztahů a grafických vyjádření, které odvodili jednotliví autoři

h/P	1	1	1	1	2	2	3	4	4	5	6	7	8	9
	$h/t = 0,1$	$h/t = 0,2$	$h/t = 0,3$	$h/t = 0,4$	$h/t = 0,1$	$h/t = 0,4$	$h/t = 0,375$	$H/t = 0,1$	$H/t = 0,4$					
0,1	0,8500	0,8500	0,8500	0,8610	0,9179	0,9326	0,8650	0,8487	0,8548	0,8579	0,8633			0,8488
0,15	0,8525	0,8525	0,8525	0,8625	0,9179	0,9326	0,8650	0,8487	0,8548	0,8537	0,8566			0,8505
0,2	0,8550	0,8550	0,8550	0,8640	0,9179	0,9326	0,8650	0,8487	0,8548	0,8523	0,8531	0,8309		0,8522
0,25	0,8595	0,8595	0,8595	0,8660	0,9179	0,9326	0,8650	0,8487	0,8548	0,8529	0,8520	0,8385	0,8545	0,8539
0,3	0,8640	0,8640	0,8640	0,8680	0,9179	0,9326	0,8650	0,8487	0,8548	0,8553	0,8529	0,8458	0,8570	0,8561
0,35	0,8685	0,8685	0,8685	0,8710	0,9179	0,9326	0,8650	0,8487	0,8548	0,8589	0,8553	0,8527	0,8579	0,8582
0,4	0,8730	0,8730	0,8730	0,8740	0,9179	0,9326	0,8650			0,8636	0,8590	0,8592	0,8596	0,8599
0,45	0,8775	0,8775	0,8775	0,8785	0,9179	0,9326	0,8650			0,8690	0,8636	0,8655	0,8621	0,8624
0,5	0,8820	0,8820	0,8820	0,8830	0,9179	0,9326	0,8650			0,8750	0,8689	0,8714	0,8638	0,8641
0,55	0,8870	0,8870	0,8870	0,8885	0,9179	0,9326	0,8660			0,8815	0,8748	0,8771	0,8655	0,8675
0,6	0,8920	0,8920	0,8920	0,8940	0,9179	0,9326	0,8720			0,8883	0,8811	0,8825	0,8689	0,8709
0,65	0,8965	0,8965	0,8965	0,9000	0,9179	0,9326	0,8780			0,8953	0,8877	0,8877	0,8767	0,8770
0,7	0,9010	0,9010	0,9010	0,9060	0,9179	0,9326	0,8840			0,9025	0,8946	0,8927	0,8845	0,8848
0,75	0,9060	0,9060	0,9065	0,9110	0,9179	0,9326	0,8900			0,9098	0,9016	0,8974	0,8888	0,8891
0,8	0,9110	0,9110	0,9120	0,9160	0,9179	0,9326	0,8960			0,9171	0,9088	0,9020	0,8940	0,8944
0,85	0,9160	0,9160	0,9170	0,9210	0,9179	0,9326	0,9010			0,9245	0,9160	0,9064	0,8993	0,8996
0,9	0,9210	0,9210	0,9220	0,9260	0,9179	0,9326	0,9070			0,9318	0,9232	0,9106	0,9039	0,9043
0,95	0,9250	0,9250	0,9265	0,9310	0,9179	0,9326	0,9130			0,9390	0,9303	0,9147	0,9104	0,9098
1	0,9290	0,9290	0,9310	0,9360	0,9179	0,9326	0,9190			0,9463	0,9375	0,9186	0,9151	0,9150
1,05	0,9320	0,9330	0,9355	0,9410	0,9179	0,9326	0,9250			0,9534	0,9446	0,9223	0,9209	0,9203
1,1	0,9350	0,9370	0,9400	0,9460	0,9179	0,9326	0,9310			0,9604	0,9516	0,9259	0,9258	0,9253
1,15	0,9380	0,9405	0,9445	0,9515	0,9179	0,9326	0,9380			0,9673	0,9585	0,9294	0,9308	0,9302
1,2	0,9410	0,9440	0,9490	0,9570	0,9179	0,9326	0,9440			0,9741	0,9654	0,9328	0,9358	0,9352
1,25	0,9435	0,9475	0,9530	0,9615	0,9179	0,9326	0,9500			0,9808	0,9721		0,9408	0,9402

h/P	1 $h/t = 0,1$	1 $h/t = 0,2$	1 $h/t = 0,3$	1 $h/t = 0,4$	2 $h/t = 0,1$	2 $h/t = 0,4$	3 $h/t = 0,375$	4 $H/t = 0,1$	4 $H/t = 0,4$	5	6	7	8	9
1,3	0,9460	0,9510	0,9570	0,9660	0,9179	0,9326	0,9550			0,9873	0,9787		0,9458	0,9452
1,35	0,9490	0,9550	0,9620	0,9705	0,9179	0,9326	0,9610			0,9938	0,9852		0,9499	0,9502
1,4	0,9520	0,9590	0,9670	0,9750	0,9179	0,9326	0,9660			1,0001	0,9916		0,9549	0,9553
1,45	0,9565	0,9635	0,9710	0,9795	0,9179	0,9326	0,9720			1,0062	0,9979		0,9591	0,9594
1,5	0,9610	0,9680	0,9750	0,9840	0,9179	0,9326	0,9770			1,0123	1,0040		0,9632	0,9645
1,55	0,9665	0,9730	0,9800	0,9890	0,9179	0,9326	0,9820			1,0182	1,0100			
1,6	0,9720	0,9780	0,9850	0,9940	0,9179	0,9326	0,9880			1,0240	1,0159			

Vysvětlivky:

- 1** ČSN ISO 3846, 1994
- 2** Rao, Muralidhar, 1963
- 3** Sreetharan, 1998
- 4** Hager, 1986
- 5** Azimi, Rajaratnam, 2009a
- 6** Azimi, Rajaratnam, 2009b
- 7** Doeringsfeld, Barker, 1941
- 8** Singer, 1964
- 9** Bos, 1989



Obr. 7.1 Součinitel průtoku C v závislosti na relativní výšce přelivu h/P

Z grafu (Obr. 7.1) vyplývá, že součinitelé průtoku vycházející z vlastního měření C_s (sonda č. 1) a C_h (hrotové měřidlo) nejlépe odpovídají vyjádření, které pro nízké přelivy uvádějí autoři Bos [3] a Singer [19]. Za předpokladu, že

$$\frac{h}{h+P} = \frac{h/P}{1+h/P}, \quad (7.1)$$

je oblast nízkých přelivů definována dle Bose $0,54 < h/P \leq 1,5$ [3], dle Singera $0,56 < h/P \leq 1,5$ [19].

Součinitelé průtoku C_s a C_h se také relativně dobře shodují se závislostí uváděnou Sreetharanem [20], avšak pouze v rozmezí $0,52 \leq h/P \leq 0,70$. Mimo tyto meze jsou hodnoty C_s a C_h nižší, než zmíněný autor uvádí.

Přibližně konstantní hodnota součinitele průtoku $C_s = C_h = 0,850$ platí pro $h/P \leq 0,37$ (Obr. 7.1). Norma publikuje stejnou hodnotu jen v případě $h/P < 0,15$ [5]. Sreetharan doporučuje větší rozsah platnosti i vyšší hodnotu součinitele průtoku, tedy $0,15 < h/P < 0,55$ a $C = 0,865$ [20]. Bos i Singer uvádějí naopak hodnoty nižší. Bos udává konstantní hodnotu součinitele průtoku $C_D = 0,848$ pro $h/P \leq 0,54$ [3], Singer $C_D = 0,8477$ v mezích $0,22 \leq h/P \leq 0,56$ [19].

Proložení C_s a C_h polynommem druhého stupně byly pro výpočet součinitele průtoku vyvozeny vztahy

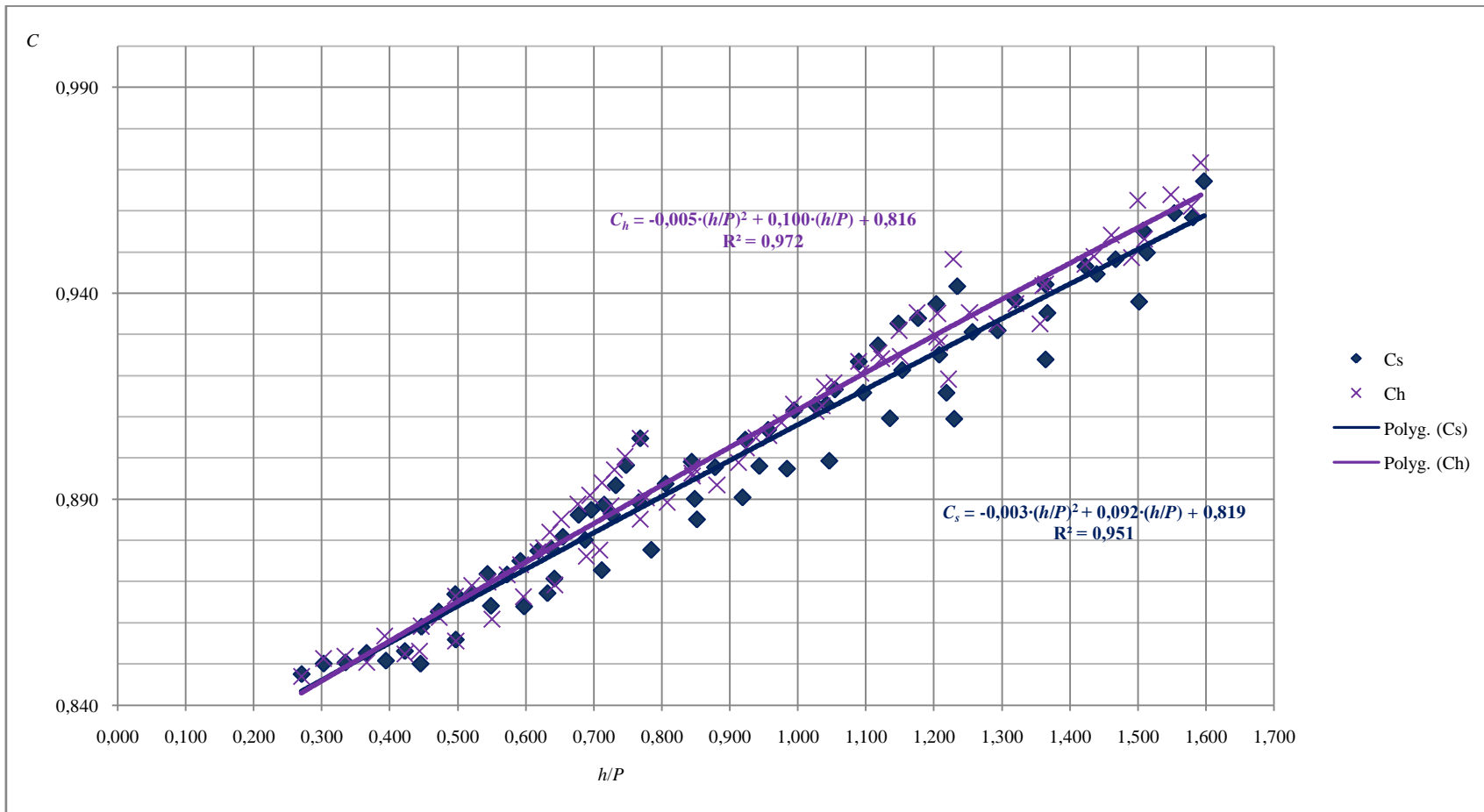
$$C_s = -0,003 \cdot \left(\frac{h}{P}\right)^2 + 0,092 \cdot \left(\frac{h}{P}\right) + 0,819, \quad (7.2)$$

s koeficientem determinace $R^2 = 0,951$ (Obr. 7.2) a

$$C_h = -0,005 \cdot \left(\frac{h}{P}\right)^2 + 0,100 \cdot \left(\frac{h}{P}\right) + 0,816, \quad (7.3)$$

s koeficientem determinace $R^2 = 0,972$ (Obr. 7.2).

Oba výše uvedené vztahy byly odvozeny z výsledků měření, jež bylo provedeno v rozsahu $0,27 \leq h/P \leq 1,60$; $0,1 < h/t \leq 0,4$ a $h_{min} = 0,06$ m (Tab. 7) až (Tab. 11).



Obr. 7.2 Vyhodnocení

8 ZÁVĚR A ZHODNOCENÍ

Celkem bylo provedeno 110 měření pro 22 průtokových stavů ($0,025 \text{ m}^3/\text{s}$ až $0,13 \text{ m}^3/\text{s}$) a 5 přelivů s jednotnou šířkou $b = 1,003 \text{ m}$, tloušťkou (délkou) $t = 0,500 \text{ m}$ a rozdílnou výškou P ($0,250 \text{ m}$, $0,151 \text{ m}$, $0,103 \text{ m}$, $0,077 \text{ m}$ a $0,052 \text{ m}$).

Průtok vody Q byl stanoven kalibrovaným Thomsonovým přelivem. Přepadová výška h byla určena z rozdílu úrovně hladiny, měřené v doporučené vzdálenosti před návodní stěnou přelivu ($3 \cdot h$ až $4 \cdot h$) [5] ultrazvukovou sondou a hrotovým měřidlem, a změřené úrovně koruny přelivu. Využitím rovnice

$$Q = C \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot b \cdot h^{3/2} \quad (5.1)$$

byly hodnoty součinitelů průtoku C_s a C_h vypočítány a následně vyneseny do grafů (Obr. 7.1), (Obr. 7.2) v závislosti na relativní výšce přelivu h/P .

Z Obr. 7.1, který znázorňuje porovnání výsledků vlastního měření s hodnotami udávanými jinými autory a normou ČSN ISO 3846 je patrné, že tyto výsledky nejlépe odpovídají vyjádření Bose [3] v rozsahu $0,54 < h/P \leq 1,18$ a Singera [8] v mezích $0,56 < h/P \leq 1,18$. Při větších hodnotách relativní výšky přelivu se hodnoty součinitele průtoku C_s liší až o 3,1 %, hodnoty C_h až o 2,0 %, než Bos a Singer uvádějí. Z tohoto důvodu byly pro výpočet součinitele průtoku vyvozeny nové vztahy (7.2), (7.3). Přednostně lze doporučit rovnici odvozenou z měření hrotovým měřidlem

$$C_h = -0,005 \cdot \left(\frac{h}{P}\right)^2 + 0,100 \cdot \left(\frac{h}{P}\right) + 0,816, \quad (7.3)$$

jež vystihuje hodnoty stanovené měřením o něco lépe, což dokazuje větší hodnota koeficientu determinace. Oblast nízkých přelivů a zároveň meze platnosti rovnice byly definovány jako $0,37 < h/P \leq 1,60$.

Dále byla určena konstantní hodnota součinitele průtoku pro vysoké přelivy $C_h = 0,850$ odpovídající doporučení normy ČSN ISO 3846 [5]. Mez použitelnosti byla oproti

normě, která udává konstantní hodnotu součinitele průtoku při relativní výšce přelivu $h/P < 0,15$, definována větší, tedy $h/P \leq 0,37$.

Při stanovování součinitele průtoku pro přeliv pravoúhlého průřezu se širokou korunou je nutné vždy dodržovat rozsah relativní tloušťky přelivu ($0,1 < h/t \leq 0,4$ [5]), jelikož má vliv na charakter proudění na koruně.

Z vyhodnocení měření bylo potvrzeno, že k eliminaci povrchového napětí a viskozity musí být dodržena minimální přepadová výška $h_{min} = 0,06$ m [5].

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] AZIMI A.H., RAJARATNAM N. *Discharge Characteristics of Weirs of Finite Crest Length*. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, 2009.
- [2] BOMBARDELLI, F. A., GARCIA, M. H., CAISLEY, M. E. *2-D and 3-D Numerical Simulation of Abrupt Transitions in Open-Channel Flows. Application to the design of canoe chutes*. Proc. 4th International Conference on Hydroinformatics, IAHR, Iowa City, IA, USA (in CD), 2000.
- [3] BOS, M. G. *Discharge measurement structures*. Third revised edition. Netherlands: ILRI, 1989.
- [4] ČÁBELKA, J., P. NOVÁK. *Hydrotechnický výzkum I: Modelový výzkum*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1964.
- [5] ČSN ISO 3846. *Měření průtoku v otevřených korytech pomocí měrných přelivů a žlabů: Měrné přelivy pravoúhlého průřezu se širokou korunou*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [6] ČSN ISO 4374. *Měření kapalin v otevřených korytech – Měrné přelivy se širokou korunou a zaoblenou vstupní hranou*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [7] *ELA BRNO: Měřidla pro vodárenství* [online]. [cit. 2012-12-16]. Dostupné z: <http://www.elabrno.cz/>
- [8] HAGER, W. *Discharge measurement structures*. Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne, 1986.
- [9] HAGER, W.H., SCHWALT, M. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering: Broad-crested weir*. Vol.120. ASCE, 1994.

- [10] HALL, G. W. *Analytical Determination of The Discharge Characteristics of Broad-crested Weirs Using Boundary Layer Theory*. Proc.Inst. civ. Eng., Vol. 22, pp. 177-190.
- [11] HORTON, R.E. *Weir experiments, Coefficients and Formulas*. Water Supply Paper 200, Geological Survey, U.S.Department of the Interior, Washington D.C, 1907.
- [12] JANDORA, J. *Hydraulika a hydrologie*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005. 188 s.
- [13] KOLÁŘ, V., PATOČKA, C., BÉM, J. *Hydraulika*. SNTL: Praha, 1983.
- [14] KOZUBKOVÁ, M. *Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX*. Ostrava: Vysoká škola Báňská – technická univerzita, 2008. 153 s.
- [15] OZDEMIR, E. C., HSU, T.J. *Study of komplex flows through SFWMD culvert structures by CFD modelling*. Report as of FY 2007 for 2006 FL146B: “Complex flows through culvert structures by CFD modeling”. 2007
- [16] PICKA, D. *Porovnání výstupů pomocí metody PIV a numerické simulace u rychlostního pole klapkového přelivu*, příspěvek na konferenci *Sborník anotací Juniorstav 2011*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2011
- [17] RAO, S. S., SHUKLA, M. K. *Characteristics of flow over weirs of finite crest width*. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, 1971.
- [18] SARKER, M. A., RHODES D. G. *3D Free Surface Model of Laboratory Channel With Rectangular Broad-Crested Weir*. Proceedings 28th IAHR Congress, Graz, Austria, 1999.
- [19] SINGER, J. *Square-edged broad-crested weir as a flow measurement device*. Water and Water Engineering, 1994.
- [20] SREETHARAN, M. *Discharge characteristics of rectangular profiled*. New York: ASCE, 1998.

- [21] TIM, U. S. *Characteristics of Some Hydraulic Structures Used for Flow Control and Measurement in Open Channels*. Canada, 1986.
- [22] ZACHOVAL, Z., ROUŠAR, L. *Součinitel průtoku pravoúhlého obdélníkového přelivu se širokou korunou*. In *Sympózium Hydrotechnikov Zborník príspevkov. prvné*. Bratislava, Slovenská technická univerzita v Bratislave. 2011. p. 214 - 222.
- [23] ZACHOVAL, Z.; ŠULC, J. *Rovnice stanovující průtok přes pravoúhlý obdélníkový přeliv se širokou korunou*. In *Sympózium Hydrotechnikov Zborník príspevkov*. Bratislava, Slovenská technická univerzita v Bratislave. 2011. p. 207 - 213.