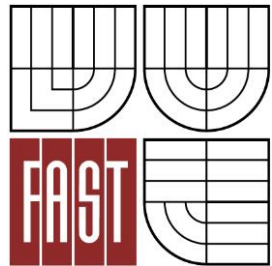




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

ZATOPENÍ NÍZKÝCH PRAVOÚHLÝCH PŘELIVŮ SE ŠIROKOU KORUNOU

SUBMERGENCE OF LOW RECTANGULAR SHARP-EDGED BROAD-CRESTED WEIRS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAKUB MAJOR

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ZBYNĚK ZACHOVAL, Ph.D.

BRNO2015

Abstrakt

Diplomová práce pojednává o zatopení nízkých pravoúhlých přelivů se širokou korunou. Z měření úrovní hladin před a za přelivem při různých průtokových stavech a různých výškách přelivu, byly stanoveny hodnoty součinitele zatopení přelivu v závislosti na relativní výšce zatopení. Z nich byla stanovena rovnice součinitele zatopení. Změřené hodnoty byly porovnány s výsledky měření, které jsou uvedeny v odborné literatuře.

Klíčová slova

Přeliv se širokou korunou, součinitel průtoku, součinitel zatopení přelivu, nedokonalý přepad, energetická výška zatopení.

Abstract

This diploma thesis deals with submergence of low rectangular sharp-edged broad-crested weirs. From measurement of water levels in front of and behind of weir at different discharges and different weir heights, were determined values of submergence coefficient depending on relative height of submergence. From these values were determined the equation of submergence coefficient. Measured values were compared which results measurements, which are given in professional literature.

Keywords

Broad-crested weir, discharge coefficient, submergence coefficient, submerged flow, energy submergence height.

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Jakub Major. *Zatopení nízkých pravoúhlých přelivů se širokou korunou*. Brno, 2014. 65 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 zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 16. 1. 2015

.....
Jakub Major.....

Bc. Jakub Major

Poděkování:

V první řadě bych rád velmi poděkoval vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Zbyňku Zachovalovi Ph.D, za včasné a velmi užitečné rady a za čas strávený při konzultacích, Ing. Ladislavu Roušarovi za pomoc při měření, dále pracovníkům LVV a mé rodině za podporu při studiu.

OBSAH

1. ÚVOD	1
1.1 Dělení pravoúhlých přelivů	1
1.2 Vybrané požadavky na pravoúhlé přelivy se širokou korunou dle ČSN ISO 3846	3
2. CÍL A METODA	5
3. PŘEHLED PROVEDENÝCH VÝZKUMŮ	6
3.1 Pavlovskij	6
3.2 Villemonte	7
3.3 Berezinskij	9
3.4 Harrison	10
3.5 Skogerboe, Hyatt a Austin	14
3.6 Tim	16
3.7 Bos	18
3.8 Hager a Schwalt	19
3.9 ČSN ISO 3846	21
3.10 Zhodnocení provedených výzkumů	22
4. DOKONALÝ PŘEPAD	23
4.1 Stanovení průtoku přes přeliv se širokou korunou	23
4.2 Odvození rovnice průtoku z Bernoulliho rovnice	23
4.3 Součinitel průtoku	25
5. NEDOKONALÝ PŘEPAD	27
5.1 Rovnice průtoku při zatopeném přepadu	27
5.2 Mezní míra zatopení	28
5.3 Součinitel zatopení vztažený k mezní míře zatopení	28
5.4 Meze použití a platnost rovnic	29
6. EXPERIMENT	30
6.1 Měření	33
6.2 Zpracování	41
6.3 Vyhodnocení	46
7. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	49
7.1 Porovnání součinitele zatopení	49
7.2 Porovnání mezní míry zatopení	54

7.3	Porovnání průtoků	56
8.	ZÁVĚR A ZHODNOCENÍ	57
9.	SEZNAMY	59
9.1	SEZNAM VELIČIN.....	59
9.2	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	61
9.3	SEZNAM TABULEK	63
9.4	SEZNAM OBRÁZKŮ	64

1. ÚVOD

Přelivy se širokou korunou jsou ve vodohospodářské praxi často využívány za účelem nadržení vody nebo ke stanovení průtoku. Mohou být například použity jako nosná konstrukce pod vakové hradičí konstrukce

Jejich správná funkce je podmíněna znalostí měrné křivky přelivu, kterou lze určit experimentálně, nebo výpočtem. Protože experimentální určení je nákladné a u nových staveb prakticky nemožné, používá se výpočet, kde je zapotřebí znát parametry přelivu a hodnotu součinitele průtoku.

Hlavními výhodami přelivu se širokou korunou je jednoduchost jeho konstrukce a provedení, poměrně velký rozsah a přesnost měřených průtoků, měření pouze jedné úrovně hladiny a odolnost proti menšímu poškození. Mezi jeho nevýhody patří především nízká průtočnost z důvodu velkých ztrát nebo odtržení proudu za návodní hranou přelivu, které snižuje jeho životnost.

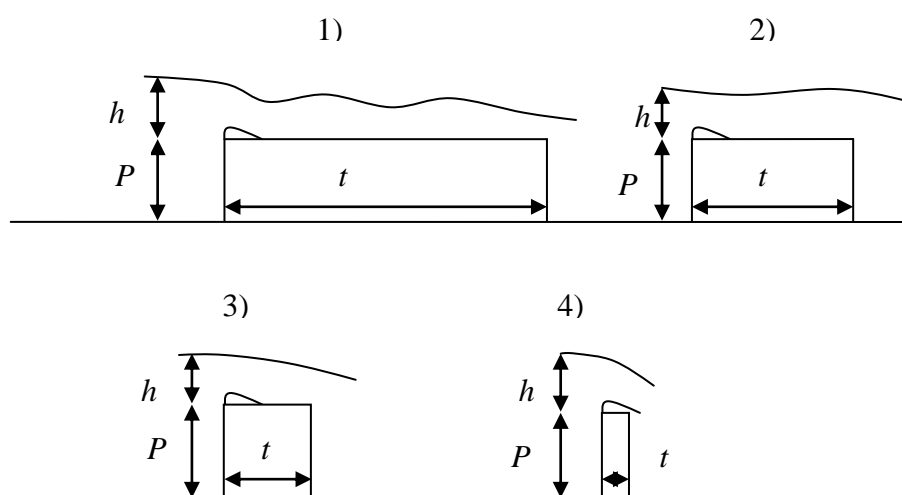
1.1 Dělení pravoúhlých přelivů

Pravoúhlé přelivy jsou určeny pravoúhlým příčným i podélným profilem s vodorovnou korunou.

Dle charakteru proudění na koruně přelivu s relativní tloušťkou přelivu h/t , kde h je přepadová výška a t je tloušťka přelivu, jsou pravoúhlé přelivy děleny do čtyř základních skupin, které jsou uvedeny v Tab. 1.1 a vyobrazeny na Obr. 1.1.

Tab. 1.1 Členění pravoúhlých přelivů dle relativní tloušťky a charakteru proudění

Označení	Relativní tloušťka h/t	Klasifikace přelivu	Charakter proudění
1	$0 \leq h/t \leq 0,1$	Přeliv s dlouhou korunou	Proudění je na přelivu podkritické, vznik příčných vln, někdy vznik vlnovitého vodního skoku, nelze využít pro měření průtoku.
2	$0,1 \leq h/t \leq 0,4$	Přeliv se širokou korunou	Proudění je v určitém úseku rovnoběžné s korunou přelivu.
3	$0,4 \leq h/t \leq 1,5$	Přeliv s krátkou korunou	Hladina je nad korunou přelivu zakřivena.
4	$h/t \geq 1,5$	Přeliv s ostrou hranou	Přepadový paprsek volně přepadá přes přeliv, hladina nad korunou je zcela zakřivena.

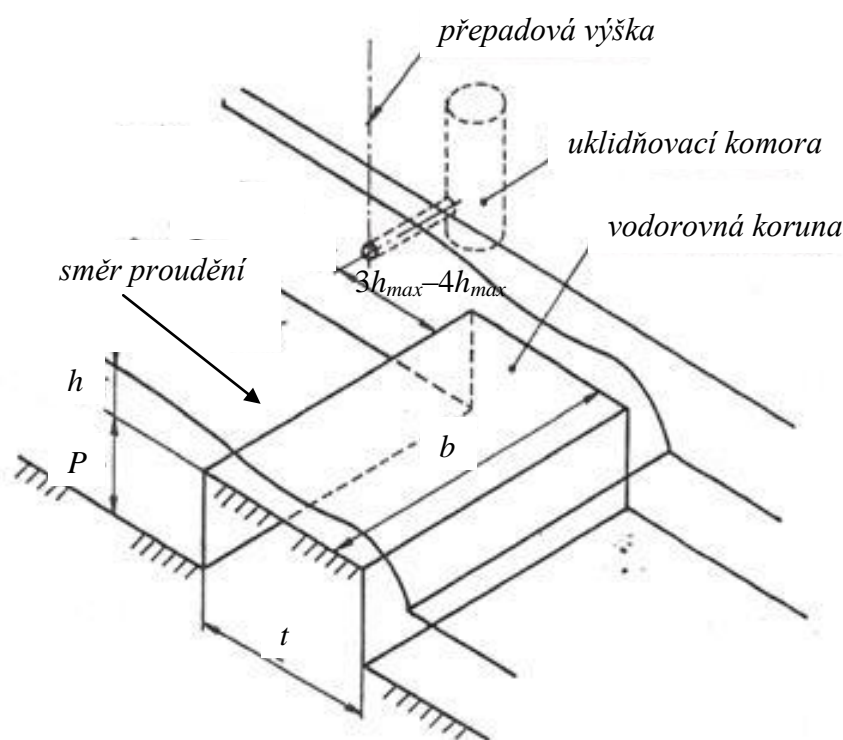


Obr. 1.1 Jednotlivé typy přelivů: 1) Přeliv s dlouhou korunou, 2) Přeliv se širokou korunou, 3) Přeliv s krátkou korunou, 4) Přeliv s ostrou hranou

Přelivy se dělí na přelivy s bočním zúžením a bez bočního zúžení. V práci je dále uvažováno s pravoúhlými přelivy se širokou korunou bez bočního zúžení.

1.2 Vybrané požadavky na pravoúhlé přelivy se širokou korunou dle ČSN ISO 3846

Šířka přelivu by měla být stejná jako šířka koryta, ve kterém je přeliv umístěn. Koruna musí být hladká, vodorovná a rovinná plocha. Návodní i povodní stěna přelivu musí být svislá a tím i kolmá ke dnu a stěnám koryta. Přítokové a odtokové stěny přelivu musí být hladké, svislé rovinné plochy. Proudění v přítokovém korytě by mělo být přibližně rovnoměrné a rozdělení rychlostí v příčném průřezu by mělo být co nejpravidelnější. V případě umělého přítokového koryta musí být koryto přímé o délce minimálně 5-ti násobku šířky hladiny. Zařízení pro měření přepadové výšky by mělo být umístěno ve vzdálenosti $3h_{max}$ – $4h_{max}$ nad přelivem a zařízení pro měření úrovně hladiny za přelivem při zatopeném režimu musí být ve vzdálenosti $10h_{max}$. Poměr přepadové výšky h a tloušťky t , neboli relativní tloušťka přelivu h/t , musí být v rozmezí $0,1 < h/t \leq 0,4$ [3].

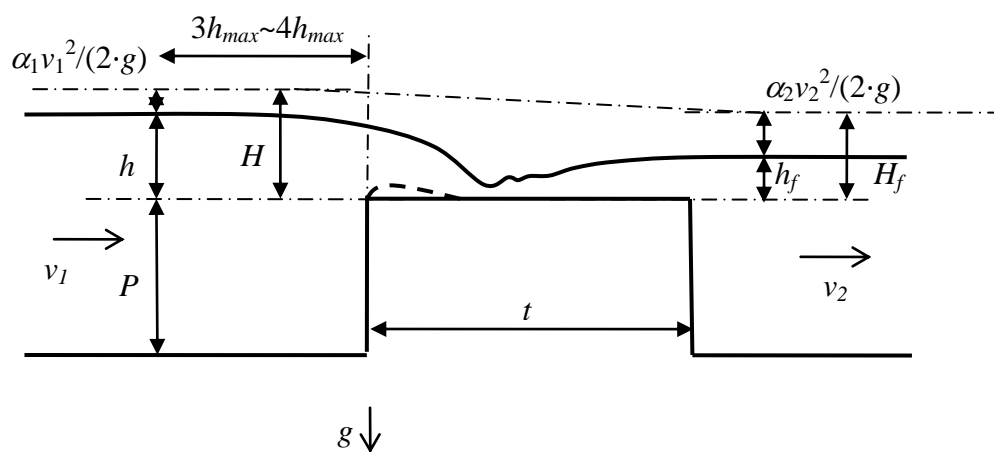


Obr. 1.2 Pravoúhlý přeliv se širokou korunou [3]

K dalším doporučeným podmínkám patří, že k eliminaci účinků povrchového napětí a viskozity by měla být šířka přelivu $b \geq 0,3$ m, výška přelivu $P \geq 0,15$ m,

minimální přepadová výška $h_{min} = 0,06$ m a doporučená drsnost povrchu by měla být podobná drsnosti válcovaného plechu.

Ke stanovení součinitele průtoku pravoúhlých přelivů se širokou korunou lze použít normu ČSN ISO 3846 v podmínkách dokonalého i nedokonalého přepadu.



Obr. 1.3 Zatopený pravoúhlý přeliv se širokou korunou

2. CÍL A METODA

Cílem práce bylo pro pravoúhlý přeliv se širokou korunou provést vyjádření součinitele zatopení a stanovit mezní míru zatopení přelivu v závislosti na relativní výšce zatopení.

Ke splnění cíle byla vzhledem k požadavkům na přesnost stanovení zvolena metoda experimentálního výzkumu.

Postup řešení sestával z určení průtoku, přepadové výšky a výšky zatopení při různých výškách přelivu a při různých průtokových stavech. Následně byla určena energetická přepadová výška, energetická výška zatopení a mezní hodnota energetické výšky zatopení. Z těchto hodnot byl sestaven vztah pro určení součinitele zatopení. Experiment byl proveden ve žlabu o délce 10 m a šířce 1 m, aby byly splněny požadavky ČSN ISO 3846. Měření úrovně hladiny bylo provedeno pomocí hrotového měřidla a duplicitně pro ověření ultrazvukovými sondami, aby byla zaručena dostatečná přesnost měření a odstraněny náhodné chyby. Průtok byl stanoven objemovou metodou kalibrovaným ostrohranným trojúhelníkovým přelivem.

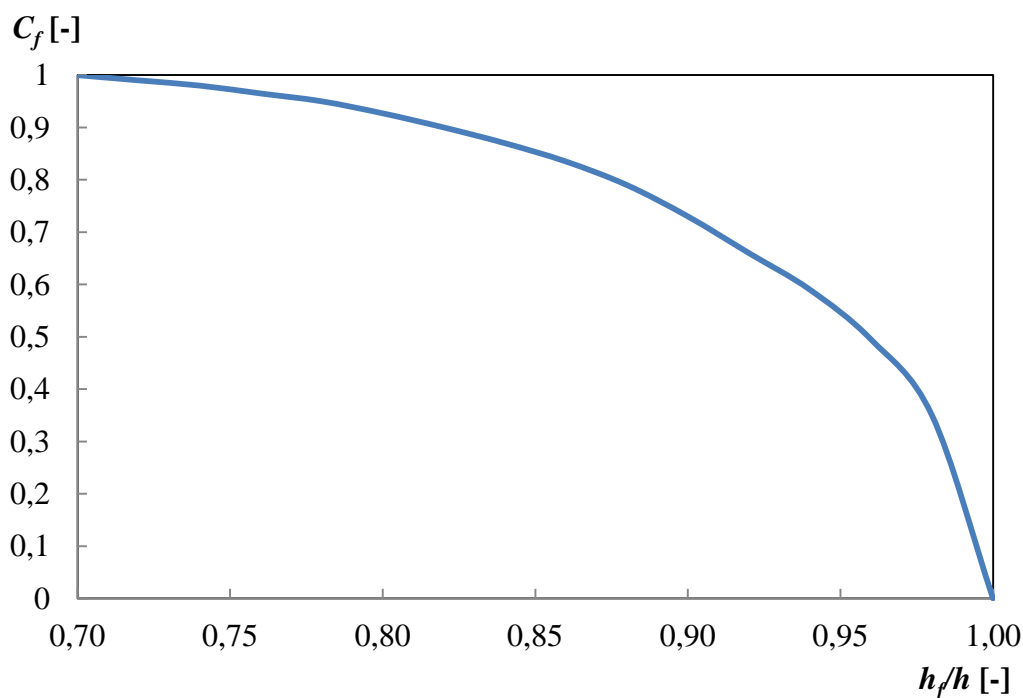
3. PŘEHLED PROVEDENÝCH VÝZKUMŮ

V kapitole jsou uvedeny předchozí výzkumy některých autorů. Výzkumy vlivu zatopení byly prováděny na různých typech přelivů a za různých podmínek, které jsou zde ve stručnosti popsány. Výzkumy jsou chronologicky uspořádány. Z důvodu jednotného označení veličin v celé práci zde není použito originálního značení veličin jednotlivých autorů.

3.1 Pavlovskij

Pavlovskij roku 1937 [1] uvádí závislost součinitele zatopení C_f na poměru zatopení h_f/h . Hodnotu poměru zatopení uvádí v rozmezí $0,70 \leq h_f/h \leq 1,00$ a součinitel zatopení $0,0 \leq C_f \leq 1,0$ (Obr. 3.1), (Tab. 3.1). Pavlovskij vyjádřil součinitel zatopení C_f jako poměr průtoku při nedokonalém přepadu Q_f k průtoku při dokonalém přepadu Q

$$C_f = \frac{Q_f}{Q}. \quad (3.1)$$



Obr. 3.1 Průběh součinitele zatopení C_f dle Pavlovského [1]

Tab. 3.1 Hodnoty součinitele zatopení C_f dle Pavlovského [1]

h_f/h [-]	0,70	0,72	0,74	0,76	0,78	0,80	0,82	0,84
C_f [-]	1,00	0,99	0,98	0,97	0,95	0,93	0,91	0,87
h_f/h [-]	0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	1,00
C_f [-]	0,83	0,79	0,73	0,66	0,59	0,49	0,35	0,00

3.2 Villemonte

V roce 1947 Villemonte provedl experiment na několika typech přelivů, na kterých zkoumal nedokonalý přepad a provedl teoretické odvození součinitele zatopení pro ostrohranné přelivy. Villemonte vyjádřil součinitel zatopení C_f rovnicí (3.1). Jeho přístup vycházel z předpokladu, že v případě zatopeného přelivu je skutečný průtok přes přeliv Q_f rozdílem průtoků při dokonalém přepadu v jednom směru Q a v opačném směru Q_d [12]

$$Q_f = Q - Q_d \quad (3.2)$$

Vztah (3.2) je možné vyjádřit rovnicí

$$C_f = 1 - \frac{Q_d}{Q}, \quad (3.3)$$

Po dosazení rovnice průtoku v obecném tvaru

$$Q = C \cdot g^{1/2} \cdot b \cdot h^n \quad (3.4)$$

do rovnice (3.3) a doplnění součiniteli se se získá rovnice

$$C_f = k \cdot \left(1 - \frac{Q_d}{Q}\right)^m = k \cdot \left(1 - \frac{C_d \cdot h_f^n}{C \cdot h^n}\right)^m, \quad (3.5)$$

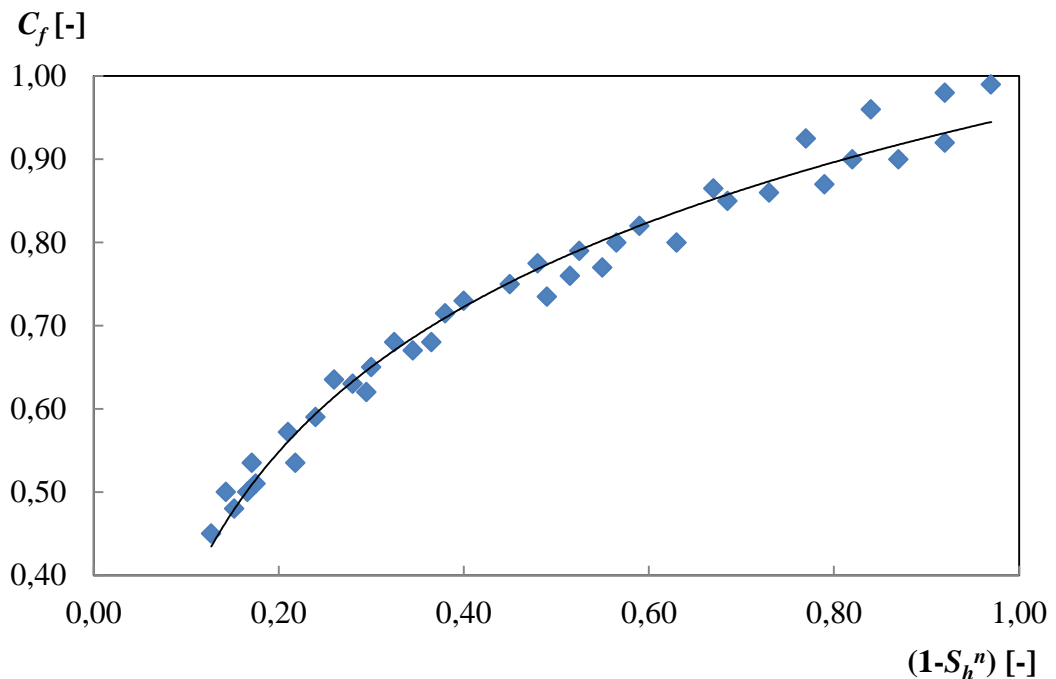
kde k a m jsou konstanty určené z měřených dat a C a C_d jsou součinitele průtoku a n je exponent obsažený v rovnici průtoku při dokonalém přepadu [12]. Vztah (3.5) je možné v případě $C_d = C$ upravit na

$$C_f = k \cdot \left(1 - S_h^n\right)^m, \quad (3.6)$$

kde S_h je [12]

$$S_h = \frac{h_f}{h}. \quad (3.7)$$

Určení konstant k a m bylo provedeno experimentálním výzkumem, konstanty byly o hodnotách $k = 1,0$ a $m = 0,385$. Experiment byl provedený na sedmi různých typech přelivů. Jeden z přelivů byl ostrohranný pravoúhlého příčného průřezu o šířce $b = 0,91$ m a výšce $P = 0,61$ m v celé jeho šířce. Tento přeliv byl umístěný ve žlabu o stejné šířce. Experiment byl provedený při $0,1 \leq P/h \leq 0,9$. Součinitel zatopení C_f je vyjádřený v závislosti na veličině $1-S_h^n$ (Obr. 3.2), (Tab. 3.2) pro ostrohranný přeliv, kde exponent n má pro pravoúhlý přeliv hodnotu 1,5. Villemontem stanovené hodnoty součinitele zatopení jsou vyneseny jako body, které jsou proloženy logaritmickou křivkou (Obr. 3.2).



Obr. 3.2 Průběh součinitele zatopení C_f dle Villemonteho [12]

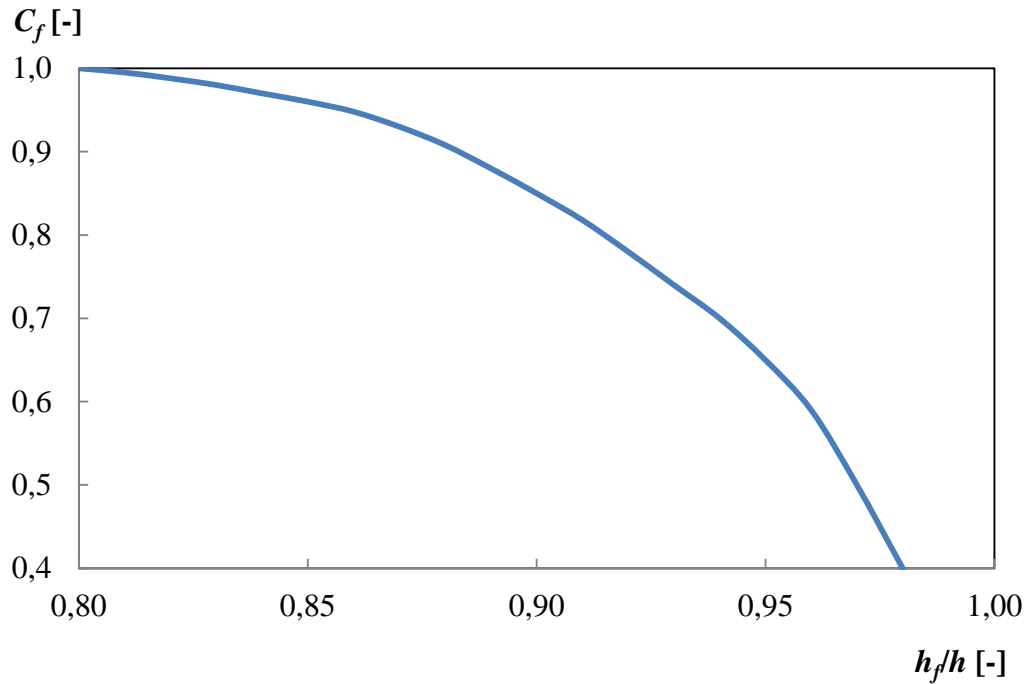
Tab. 3.2 Změřené hodnoty součinitele zatopení C_f dle Villemonteho [12]

$1-S_h^n$ [-]	C_f [-]	$1-S_h^n$ [-]	C_f [-]
---------------	-----------	---------------	-----------

0,97	0,99	0,30	0,62
0,92	0,98	0,33	0,68
0,84	0,96	0,37	0,68
0,77	0,93	0,35	0,67
0,67	0,87	0,38	0,72
0,53	0,79	0,45	0,75
0,40	0,73	0,48	0,78
0,28	0,63	0,49	0,74
0,15	0,48	0,57	0,80
0,13	0,45	0,63	0,80
0,14	0,50	0,59	0,82
0,17	0,50	0,52	0,76
0,18	0,51	0,55	0,77
0,17	0,54	0,73	0,86
0,22	0,54	0,79	0,87
0,21	0,57	0,69	0,85
0,24	0,59	0,87	0,90
0,26	0,64	0,92	0,92
0,30	0,65	0,82	0,90

3.3 Berezinskij

Autor roku 1950 [1] uvedl, že zatopení pravoúhlého přelivu se širokou korunou nastane, jestliže $h_l \geq h_k$ a $h_f/H \geq 0,8$ nebo $h_f/h_k \geq 1,3$, kde h_l je hloubka proudu na koruně přelivu. Jeho experimenty byly provedeny na přelivu o výšce $P = 0,200$ m, tloušťce $t = 0,500$ m. Součinitel zatopení C_f vyjádřil v závislosti na poměru h_f/h (Obr. 3.3).



Obr. 3.3 Průběh součinitele zatopení C_f dle Berezinského [1]

Tab. 3.3 Hodnoty součinitele zatopení C_f dle Berezinského [1]

h_f/h [-]	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89
C_f [-]	1,00	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93	0,90	0,87
h_f/h [-]	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	
C_f [-]	0,84	0,82	0,78	0,74	0,70	0,65	0,59	0,50	0,40	

3.4 Harrison

Harrison v roce 1967 [6] analyticky odvodil mezní míru zatopení S_{hc} a S_{Hc} v závislosti na poměru H/P . Míru zatopení vyjadřuje jako S_h a S_H , kde

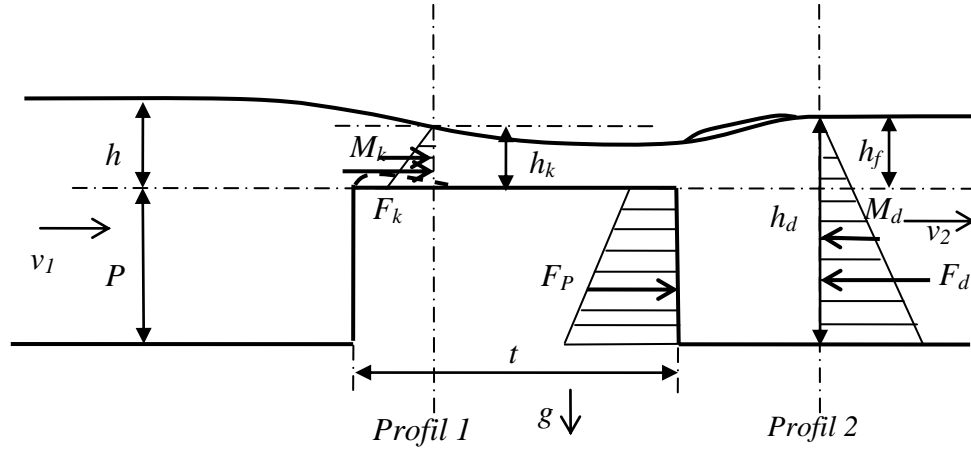
$$S_h = \frac{h_f}{h}, \quad (3.8)$$

$$S_H = \frac{H_f}{H}. \quad (3.9)$$

Odvození provedl za předpokladu vzniku kritického paralelního proudění s hloubkou h_k na koruně přelivu. Pro daný případ lze specifický průtok zapsat

$$q = g^{1/2} \cdot h_k^{3/2} = v_d \cdot h_d, \quad (3.10)$$

kde h_d je hloubka vody v odtokovém korytě při mezní míře zatopení.



Obr. 3.4 Schéma přepadu přes přeliv se širokou korunou pro Harrisonovo odvození mezní míry zatopení [6]

Rovnice hybnosti mezi dvěma stejnými úseky (Obr. 3.4) je

$$F_k + F_p + M_k = F_d + M_d, \quad (3.11)$$

kde F_k a F_d jsou vnější tlakové síly, F_p je vnější tlaková síla od povodního líce přelivu a M_k M_d je hybnost proudu v profilech 1 a 2 [9],

$$F_k = g \cdot \rho \cdot b \cdot \frac{h_k^2}{2}, \quad (3.12)$$

$$F_p = g \cdot \rho \cdot b \cdot P \cdot \left(h_k + \frac{P}{2} \right), \quad (3.13)$$

$$F_d = g \cdot \rho \cdot b \cdot \frac{h_d^2}{2}, \quad (3.14)$$

$$M_k = \rho \cdot Q \cdot v_k, \quad (3.15)$$

$$M_d = \rho \cdot Q \cdot v_2. \quad (3.16)$$

Po dosazení rovnic (3.12) až (3.16) do (3.11) a úpravě je

$$\frac{1}{2} \cdot g \cdot \rho \cdot h_k^2 + g \cdot \rho \cdot P \cdot \left(h_k + \frac{P}{2} \right) - \frac{1}{2} \cdot g \cdot \rho \cdot h_d^2 = \rho \cdot q \cdot \left[v_2 - g^{1/2} \cdot h_k^{1/2} \right]. \quad (3.17)$$

Dosazením rovnice (3.10) do (3.17) dojde ke zjednodušení

$$\left(\frac{P}{h_k} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{P}{h_k} \right) - \left[\left(\frac{h_d}{h_k} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{h_k}{h_d} \right) - 3 \right] = 0, \quad (3.18)$$

převedením je získána rovnice

$$\frac{P}{h_k} = \sqrt{(1-f)} - 1, \quad (3.19)$$

kde

$$f = \left(\frac{h_d}{h_k} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{h_k}{h_d} \right) - 3. \quad (3.20)$$

Při zanedbání třecích sil a při

$$H = \frac{3}{2} \cdot h_k, \quad (3.21)$$

$$H_d = h_d - P + \frac{v_2^2}{2 \cdot g}, \quad (3.22)$$

lze použitím rovnic (3.9) a (3.10) a po úpravě vyjádřit vztah pro energetickou mezní míru zatopení

$$S_{Hc} = \frac{2}{3} \cdot \left[\frac{h_d}{h_k} - \frac{P}{h_k} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h_k}{h_d} \right)^2 \right]. \quad (3.23)$$

Podobně, při zanedbání třecích sil, pro přepadovou výšku

$$h = \frac{3}{2} \cdot h_k - \frac{q^2}{2 \cdot g \cdot (h+P)^2} \quad (3.24)$$

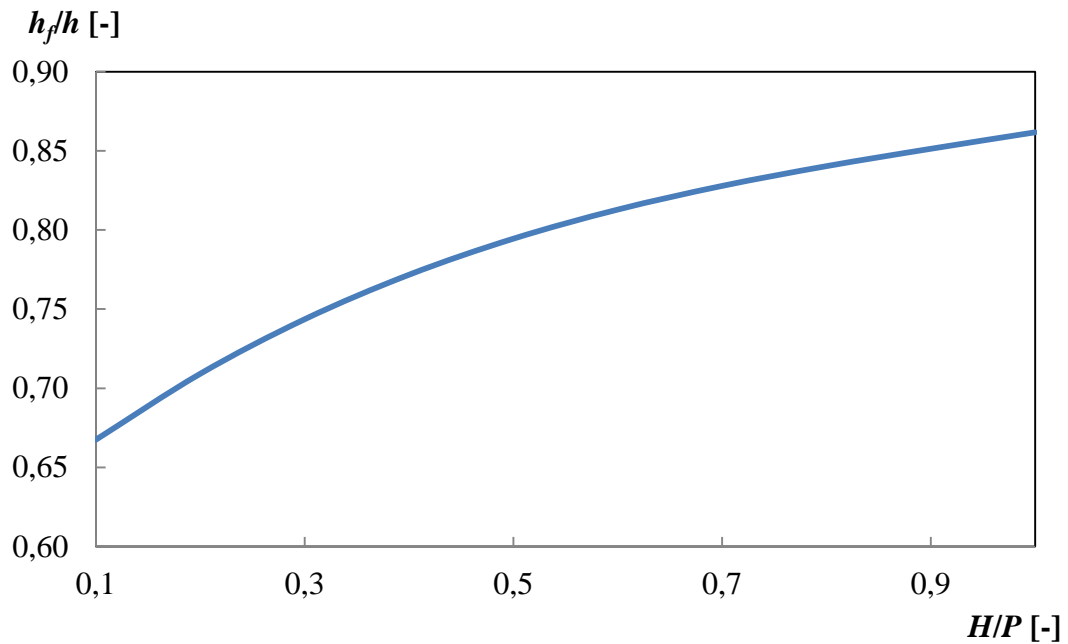
a po úpravě

$$\frac{h}{h_k} = \frac{3}{2} - \frac{1}{2 \cdot \left[\left(\frac{h}{h_k} \right) + \left(\frac{P}{h_k} \right) \right]^2}, \quad (3.25)$$

dosazením $h_f = h_d - P$ do rovnice (3.8) je vyjádřený vztah pro mezní míru zatopení

$$S_{hc} = \frac{\left(\frac{h_d}{h_k} \right) \cdot \left(\frac{P}{h_k} \right)}{\left(\frac{h}{h_k} \right)}. \quad (3.26)$$

Pro vyhodnocení dat naměřených při experimentu autorem práce bylo použito Harrisonova odvození.



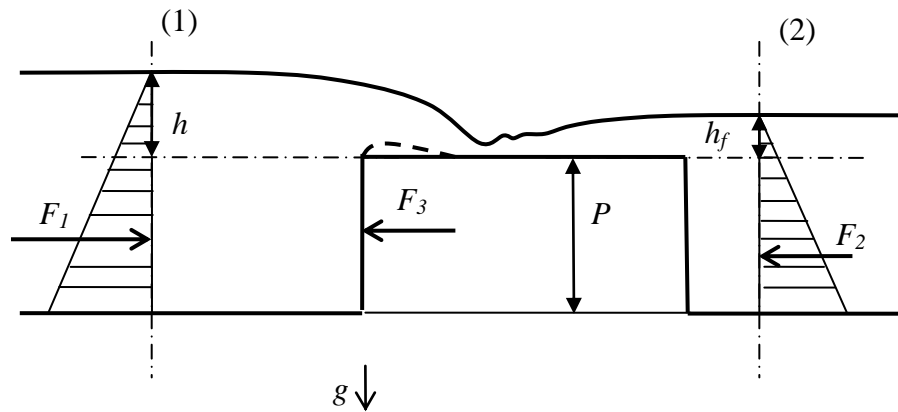
Obr. 3.5 Průběh h_f/h v závislosti na H/P dle Harrisona [6]

Tab. 3.4 Hodnoty h_f/h v závislosti na H/P dle Harrisona [6]

H/P [-]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
h_f/h [-]	0,709	0,744	0,772	0,794	0,813	0,828	0,840	0,851	0,862	0,872

3.5 Skogerboe, Hyatt a Austin

Autoři Skogerboe, Hyatt a Austin publikovali v roce 1967 [10] závislost průtoku při přepadu přes zatopený přeliv se širokou korunou na parametru h_f/h a P/h . Jejich závislost je odvozena z aplikace rovnice hybnosti. Metoda vychází z objemu kapaliny vymezeného profily (1) a (2), povrchem přelivu a vodní hladinou, který působí na přeliv (Obr. 3.6). Odvození může být provedeno pomocí obecné nebo zjednodušené analýzy, dále je popsána pouze obecná analýza [10].



Obr. 3.6 Vymezený objem kapaliny přelivu se širokou korunou [10]

Síla vyvinutá přelivem, která působí na tekutinu na návodním líci, je označena jako F_u , a síla působící na povodním líci je označena jako F_p . Za předpokladu, že tlak působící na návodní líc přelivu je tlak hydrostatický způsobený vodní hladinou v profilu (1), a že tlak působící na povodní líc přelivu je tlak hydrostatický způsobený vodní hladinou v profilu (2), jsou síly F_u a F_d [10]

$$F_u = g \cdot \rho \cdot P \cdot \left(h + \frac{P}{2} \right), \quad (3.27)$$

$$F_p = g \cdot \rho \cdot P \cdot \left(h_f + \frac{P}{2} \right). \quad (3.28)$$

Jejich výslednice je

$$F_3 = F_u - F_p = g \cdot \rho \cdot P \cdot \left(h + \frac{P}{2} \right) - g \cdot \rho \cdot P \cdot \left(h_f + \frac{P}{2} \right) = g \cdot \rho \cdot P \cdot (h - h_f). \quad (3.29)$$

Síly působící na vymezený objem v profilech (1) a (2) vlivem působení hydrostatického tlaku (Obr. 3.6), jsou [10]

$$F_1 = g \cdot \rho \cdot \frac{(h + P)^2}{2}, \quad (3.30)$$

$$F_2 = g \cdot \rho \cdot \frac{(h_f + P)^2}{2}. \quad (3.31)$$

Při zanedbání třecích sil je suma sil v horizontálním směru [10]

$$\Sigma F_x = F_1 - F_2 - F_3 = g \cdot \rho \cdot \frac{(h + P)^2}{2} - g \cdot \rho \cdot \frac{(h_f + P)^2}{2} - g \cdot \rho \cdot P \cdot (h - h_f), \quad (3.32)$$

$$\Sigma F_x = \frac{g \cdot \rho \cdot (h^2 - h_f^2)}{2}. \quad (3.33)$$

Rovnice hybnosti

$$\Sigma F_x = q \cdot \rho \cdot (v_2 - v_1) \quad (3.34)$$

může pak být ve tvaru

$$\frac{g \cdot \rho \cdot (h^2 - h_f^2)}{2} = q \cdot \rho \cdot (v_2 - v_1). \quad (3.35)$$

Za předpokladu ustáleného proudění, rovnice

$$q = v_1 \cdot (h + P) = v_2 \cdot (h_f + P) \quad (3.36)$$

se vloží do rovnice (3.28) a po úpravě vznikne

$$\frac{g \cdot \rho \cdot (h^2 - h_f^2)}{2} = q \cdot \rho \cdot \left(\frac{q}{h_f + P} - \frac{q}{h + P} \right) \quad (3.37)$$

a řešením pro specifický průtok q , je obdržena rovnice

$$q = \left(\frac{g}{2} \right)^{1/2} \cdot \sqrt{(h + h_f) \cdot (h + P) \cdot (h_f + P)}. \quad (3.38)$$

Vynásobením čitatele a jmenovatele v rovnici (3.32) členem $(h - h_f)^{3/2}$ je získána

$$q = \frac{\left(\frac{g}{2}\right)^{1/2} \cdot (h - h_f)^{3/2}}{\sqrt{\frac{(h - h_f)^3}{(h + h_f) \cdot (h + P) \cdot (h_f + P)}}} \quad (3.39)$$

a následnou úpravou lze získat rovnici

$$q = \frac{\left(\frac{g}{2}\right)^{1/2} \cdot (h - h_f)^{3/2}}{\sqrt{\frac{\left(1 - \frac{h_f}{h}\right)^3 \cdot h^3}{(h + h_f) \cdot (h + P) \cdot (h_f + P)}}}, \quad (3.40)$$

kde h_f/h je vyjádřeno jako S_h

$$q = \frac{\left(\frac{g}{2}\right)^{1/2} \cdot (h - h_f)^{3/2}}{\sqrt{\frac{(1 - S_h)^3}{(1 + S_h) \cdot \left(S_h + \frac{P}{h}\right) \cdot \left(1 + \frac{P}{h}\right)}}}. \quad (3.41)$$

V případě, že $P = 0$, má rovnice (3.41) tvar

$$q = \frac{\left(\frac{g}{2}\right)^{1/2} \cdot (h - h_f)^{3/2}}{\sqrt{\frac{(1 - S_h)^3}{S_h \cdot (1 + S_h)}}}. \quad (3.42)$$

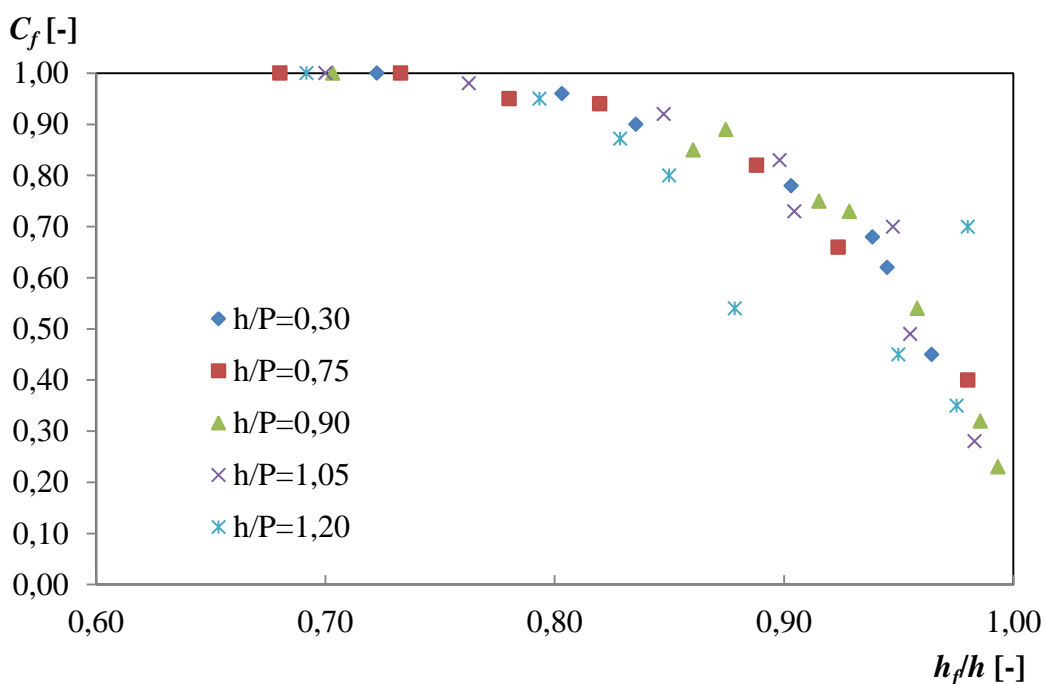
Pro výpočet průtoku Q se použije rovnice

$$Q = q \cdot b. \quad (3.43)$$

3.6 Tim

Tim v roce 1986 [11] publikoval výzkum na přelivu se širokou korunou vyrobeného z plexiskla o výšce $P = 0,102$ m, tloušťce $t = 0,305$ m a šířce $b = 0,254$ m, jak se zaoblenou návodní hranou, tak s ostrou návodní hranou. Šířka koryta byla stejná jako šířka přelivu. Výzkum byl proveden v rozsahu $0,25 \leq h/P \leq 1,2$.

Tim pro zatopený přeliv se širokou korunou použil vztah (3.1). Hodnoty stanovené Timem jsou uvedeny v Tab. 3.5 a zobrazeny na Obr. 3.7.



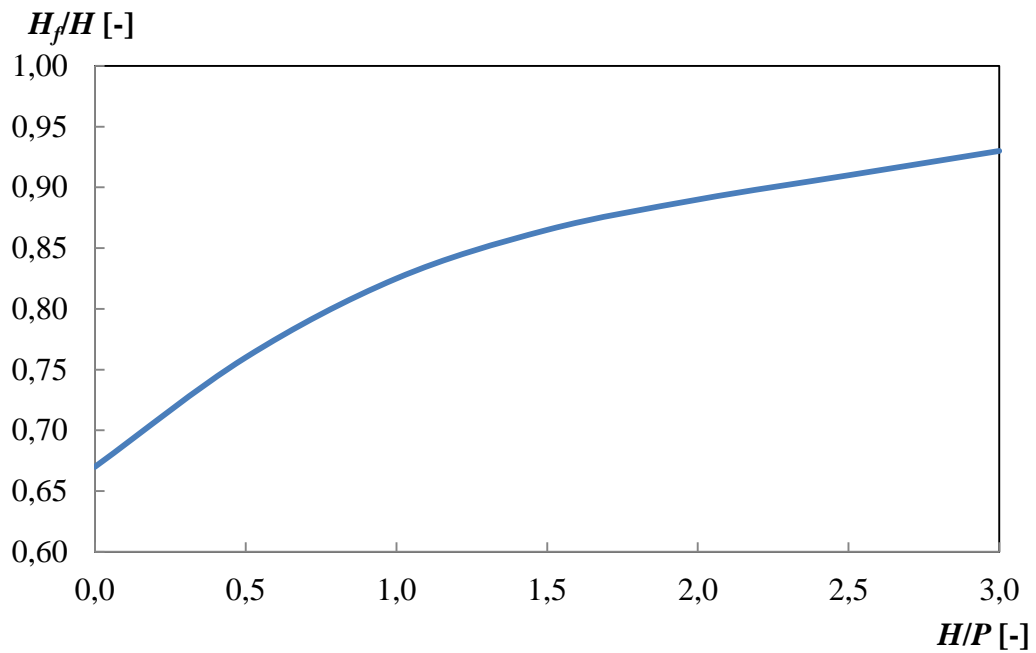
Obr. 3.7 Průběh součinitele zatopení C_f v závislosti na poměru zatopení h_f/h pro ostrou návodní hranu dle Tima [11]

Tab. 3.5 Hodnoty součinitele zatopení C_f v závislosti na poměru zatopení h_f/h pro ostrou návodní hranu dle Tima [11]

$h/P=0,30$		$h/P=0,75$		$h/P=0,90$		$h/P=1,05$		$h/P=1,20$	
h_f/h [-]	C_f [-]	h_f/h [-]	C_f [-]	h_f/h [-]	C_f [-]	h_f/h [-]	C_f [-]	h_f/h [-]	C_f [-]
0,72	1,00	0,68	1,00	0,70	1,00	0,70	1,00	0,69	1,00
0,80	0,96	0,73	1,00	0,86	0,85	0,76	0,98	0,79	0,95
0,84	0,90	0,78	0,95	0,87	0,89	0,85	0,92	0,83	0,87
0,90	0,78	0,82	0,94	0,92	0,75	0,90	0,83	0,85	0,80
0,94	0,68	0,89	0,82	0,93	0,73	0,90	0,73	0,88	0,54
0,95	0,62	0,92	0,66	0,96	0,54	0,95	0,70	0,95	0,45
0,96	0,45	0,98	0,40	0,99	0,32	0,96	0,49	0,98	0,35
				0,99	0,23	0,98	0,28	0,98	0,70

3.7 Bos

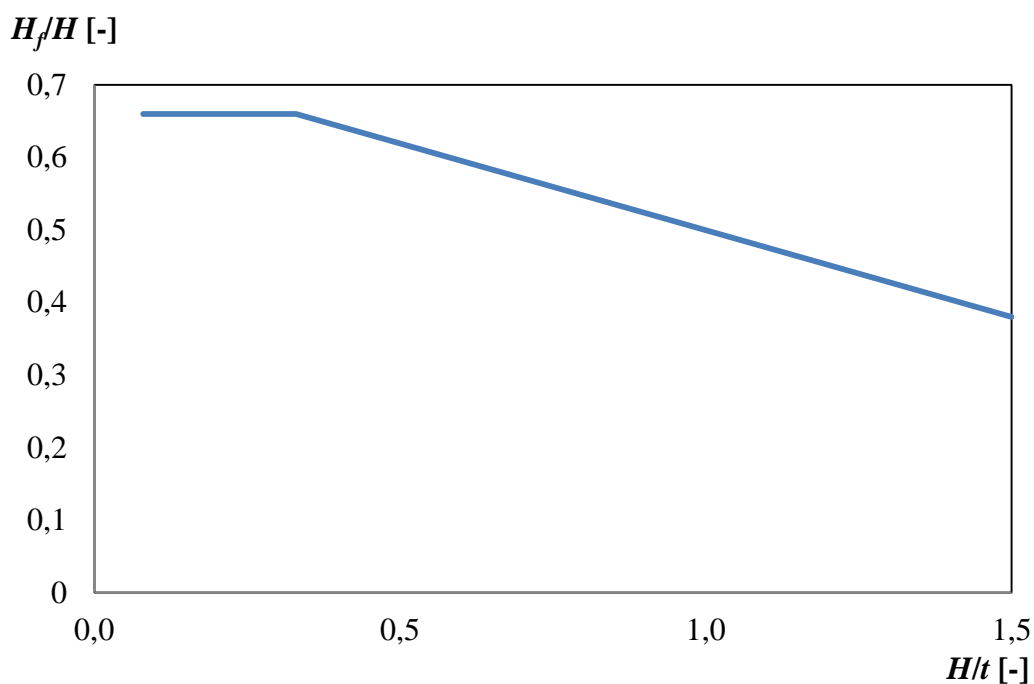
Bos roku 1989 [2] stanovil pro zaoblenou návodní hranu přelivu se širokou korunou závislost poměru zatopení H_f/H na poměru H/P (Obr. 3.8), (Tab. 3.6). Pro ostrou návodní hranu uvádí závislost poměru zatopení H_f/H na poměru H/t . Pokud je $0,08 \leq H/t \leq 0,33$, lze očekávat mezní míru zatopení o hodnotě 0,66. Pokud $H/t = 1,5$, tak je mezní míra zatopení přibližně 0,38. V případě, že $0,33 \leq H/t \leq 1,5$, lze hodnoty mezní míry zatopení lineárně interpolovat (Obr. 3.9), (Tab. 3.7).



Obr. 3.8 Průběh poměru H_f/H při mezní míře zatopení pro zaoblenou návodní hranu dle Bose [2]

Tab. 3.6 Hodnoty poměru H_f/H při mezní míře zatopení pro zaoblenou návodní hranu dle Bose [2]

H/P [-]	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
H_f/H [-]	0,67	0,76	0,825	0,865	0,89	0,91	0,93



Obr. 3.9 Průběh poměru H_f/H při mezní míře zatopení pro ostrou návodní hranu dle Bose [2]

Tab. 3.7 Hodnoty poměru H_f/H při mezní míře zatopení pro ostrou návodní hranu dle Bose [2]

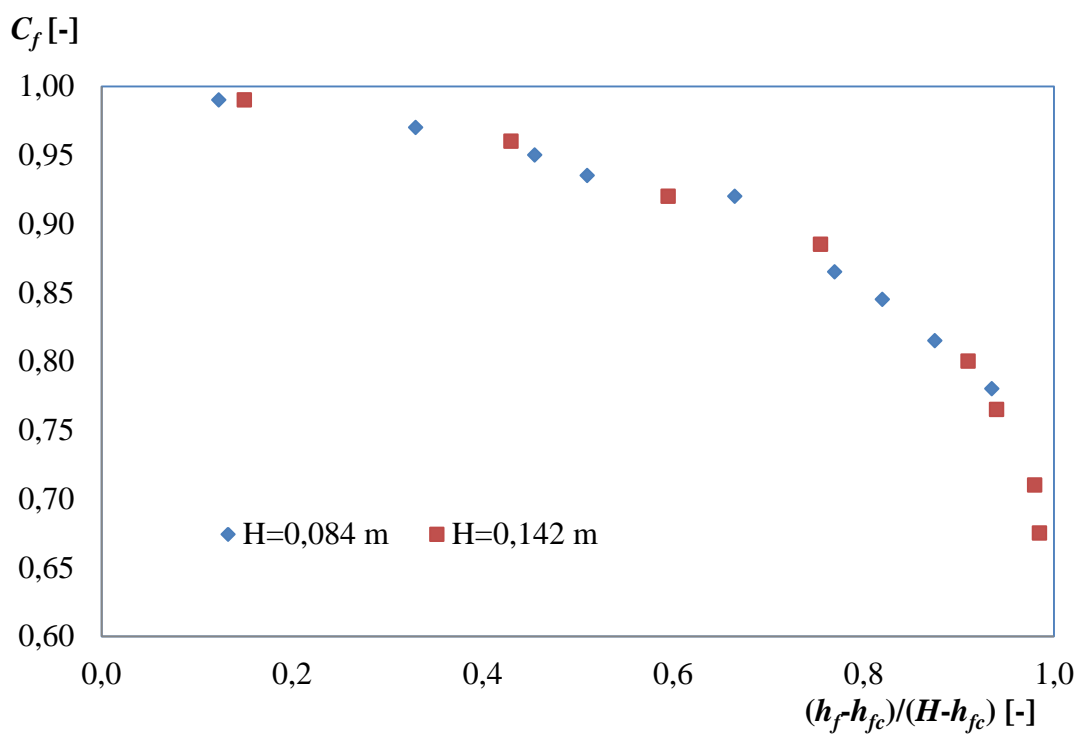
H/t [-]	0,08	0,33	1,50
H_f/H [-]	0,66	0,66	0,38

3.8 Hager a Schwalt

Autoři Hager a Schwalt v roce 1994 [5] provedli experiment na přelivu se širokou korunou o výšce $P = 0,401$ m, šířce $b = 0,499$ m a délce $t = 0,500$ m, na kterém zkoumali zatopení přelivu a mezní míru zatopení. Autoři uvedli závislost součinitele zatopení C_f na poměru

$$\frac{(h_f - h_{fc})}{(H - h_{fc})}, \quad (3.44)$$

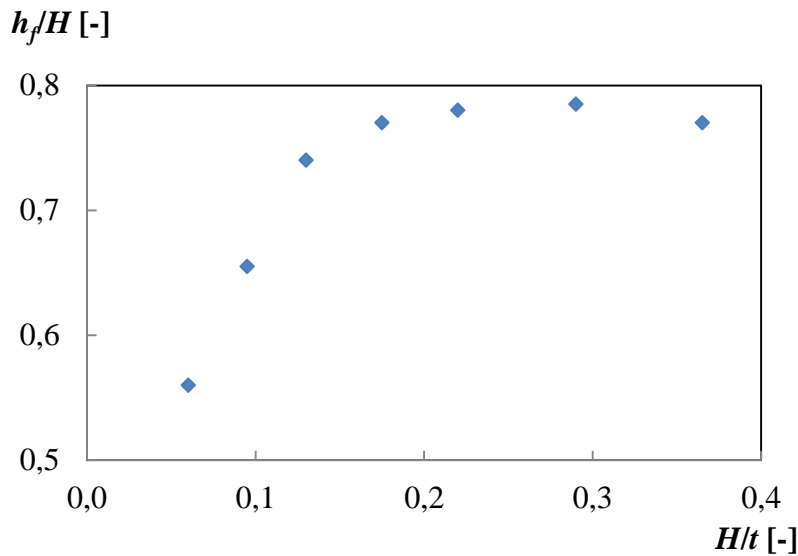
kde h_{fc} je mezní výška zatopení. Hodnoty součinitele zatopení byly odvozeny pro dvě energetické přepadové výšky H , 0,084 m a 0,142 m (Obr. 3.10), (Tab. 3.8). Mezní míru zatopení vyjádřili v závislosti na H/t (Obr. 3.11), (Tab. 3.9).



Obr. 3.10 Průběh součinitele zatopení C_f na $(h_f - h_{fc}) / (H - h_{fc})$ dle Hagera a Schwalta [5]

Tab. 3.8 Hodnoty součinitele zatopení C_f na $(h_f - h_{fc}) / (H - h_{fc})$ dle Hagera a Schwalta [5]

H = 0,084 m		H = 0,142 m	
$(h_f - h_{fc}) / (H - h_{fc})$ [-]	C_f [-]	$(h_f - h_{fc}) / (H - h_{fc})$ [-]	C_f [-]
0,12	0,99	0,15	0,99
0,33	0,97	0,43	0,96
0,46	0,95	0,60	0,92
0,51	0,94	0,76	0,89
0,67	0,92	0,91	0,80
0,77	0,87	0,94	0,77
0,82	0,85	0,98	0,71
0,88	0,82	0,99	0,68
0,94	0,78		



Obr. 3.11 Průběh mezní míry zatopení dle Hagera a Schwalta [5]

Tab. 3.9 Hodnoty mezní míry zatopení dle Hagera a Schwalta [5]

<i>H/t</i>	0,06	0,10	0,13	0,18	0,22	0,29	0,37
<i>h_f/H</i>	0,56	0,66	0,74	0,77	0,78	0,79	0,77

3.9 ČSN ISO 3846

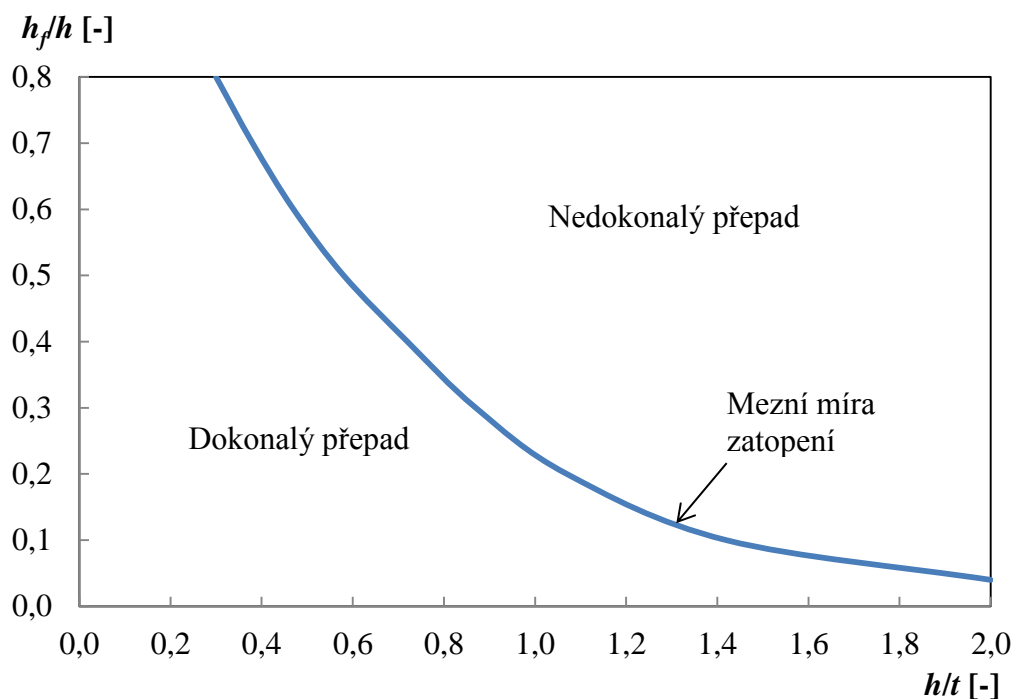
Pro určení součinitele zatopení uvádí norma [3] vztahy (3.45) a (3.46) v závislosti na poměru H_f/H . U přelivů, pro které platí, že t/P je přibližně rovno hodnotě 3, je možné průtok přes zatopený přeliv určit pomocí rovnic

$$C_f = 1,045 \cdot \left[0,76 - \left(\frac{H_f}{H} \right)^{4,2} \right]^{0,0645} \quad (3.45)$$

pro rozsah $0,750 < H_f/H < 0,925$ nebo

$$C_f = 5,70 - 5,245 \cdot \left(\frac{H_f}{H} \right) \quad (3.46)$$

pro rozsah $0,925 < H_f/H < 0,975$. Obr. 3.12 uvádí závislost mezní míry zatopení vyjádřené poměrem h_f/h na poměru h/t [3].



Obr. 3.12 Mezní míra zatopení dle ČSN ISO 3846 [3]

3.10 Zhodnocení provedených výzkumů

Průběhy součinitele zatopení určené experimentálně, které jsou bez teoretického podkladu (Pavlovskij, Berezinskij, Tim, Bos, ČSN ISO 3846), mají zpravidla omezenou platnost. Proto je nezbytné při jejich použití striktně dodržet rozsah platnosti. Mezi nejpoužívanější tvar rovnice pro stanovení součinitele zatopení u ostrohranných přelivů patří rovnice odvozená Villemontem (Kap. 3.2). Tato rovnice však není přímo použitelná pro přelivy se širokou korunou, protože nezohledňuje paralelní proudění na koruně přelivu a tím tedy mezní míru zatopení. Do určité míry ji řeší autoři Hager a Schwalt, ale bez hlubší teoretické analýzy a bez zakomponování výšky přelivu nad dolním dnem. Nevýhodou rovnice odvozené z rovnice hybnosti (Kap. 3.5) je zanedbání místních ztrát a ztrát po délce při proudění vody přes přeliv.

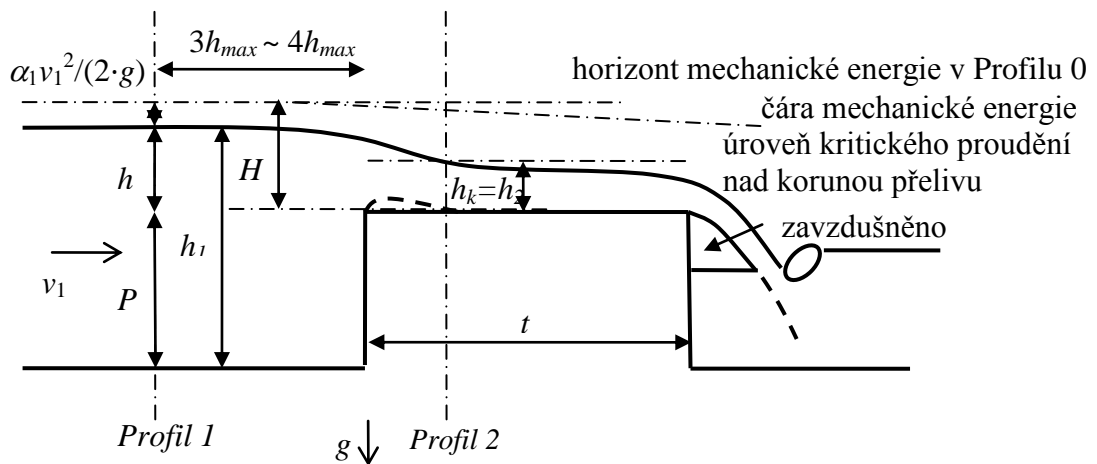
4. DOKONALÝ PŘEPAD

4.1 Stanovení průtoku přes přeliv se širokou korunou

Ke stanovení průtoku Q přes pravoúhlý přeliv se širokou korunou se na základě znalosti energetické přepadové výšky H , případně přepadové výšky h , šířky přelivu b a za působení tíhového zrychlení g používá tři základních přístupů odvození [13]:

- z Bernoulliho rovnice,
- z rovnice hybnosti,
- z rozměrové analýzy.

Z nich vzniknou tři odlišné rovnice s odlišnými součiniteli průtoku. Některé z těchto rovnic lze provázat pomocí sdružených součinitelů průtoku. Tyto přístupy uvažují s teorií dokonalého přepadu, tedy neovlivněného dolní vodou.



Obr. 4.1 Schéma přepadu přes pravoúhlý přeliv se širokou korunou [13]

4.2 Odvození rovnice průtoku z Bernoulliho rovnice

Rovnici průtoku určenou z Bernoulliho rovnice lze odvodit dvěma způsoby vycházející z proudění ideální nebo reálné kapaliny, kde se v obou případech předpokládá přeměna mechanické energie na energii polohovou a energii kinetickou při kritickém proudění [7]. Dále je popsáno pouze odvození

pro proudění ideální kapaliny, protože v celém rozsahu platnosti předpokladů při odvození je součinitel průtoku C_d menší než 1,0 [13].

Odvození rovnice průtoku z Bernoulliho rovnice pro proudění ideální kapaliny

Odvození je založeno na proudění ideální kapaliny, kde poměr mezi průtokem skutečné kapaliny Q a průtokem ideální kapaliny Q_i je vyjádřen pomocí součinitele průtoku C_D [13].

Kritické proudění pro ideální kapalinu se určí z minima energie

$$\frac{dH}{dh} = 0 = 1 - \frac{Q_i^2}{g \cdot A_k^3} \cdot \frac{dA}{dH} = 1 - \frac{v_{ik}^2}{g \cdot A_k} \cdot \frac{dA}{dH}. \quad (4.1)$$

Platí-li pro obdélníkový průřez

$$\frac{dA}{dH} = b, \quad (4.2)$$

z rovnice (4.1) se získá vztah pro kritické proudění

$$\frac{v_{ik}^2}{g} = \frac{A_k}{b} = h_k \quad (4.3)$$

a pro kritickou rychlost

$$v_{ik} = g \cdot \left(\frac{A_k}{b} \right)^{1/2} = (g \cdot h_k)^{1/2}. \quad (4.4)$$

Prouděním ideální kapaliny se mechanická energie přemění na polohovou a kinetickou energii při kritickém proudění

$$H = h_k + \frac{v_{ik}^2}{2 \cdot b} = H_k = h_k + \frac{A_k}{2 \cdot b} = h_k + \frac{h_k \cdot b}{2 \cdot b} = \frac{3}{2} \cdot h_k, \quad (4.5)$$

kde tedy pro kritickou hloubku platí

$$h_k = \frac{2}{3} \cdot H_k. \quad (4.6)$$

Pomocí rovnice spojitosti se určí průtok pro kritické proudění ideální kapaliny [13]

$$Q_i = A_k \cdot v_{ik} = b \cdot h_k \cdot (g \cdot h_k)^{1/2} = b \cdot g^{1/2} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot H_k\right)^{3/2} = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot b \cdot g^{1/2} \cdot H^{3/2}, \quad (4.7)$$

kde součinitel průtoku C_D je daný poměrem průtoku skutečné kapaliny Q a ideální kapaliny Q_i [13]

$$C_D = \frac{Q}{Q_i} \quad (4.8)$$

a rovnice průtoku má tedy tvar

$$Q = C_D \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot b \cdot g^{1/2} \cdot H^{3/2}. \quad (4.9)$$

Tato rovnice je považována za teoreticky nejlépe odvozenou rovnicí pro dokonalý přepad přes přeliv se širokou korunou a je nejčastěji využívána při určení průtoku [13].

4.3 Součinitel průtoku

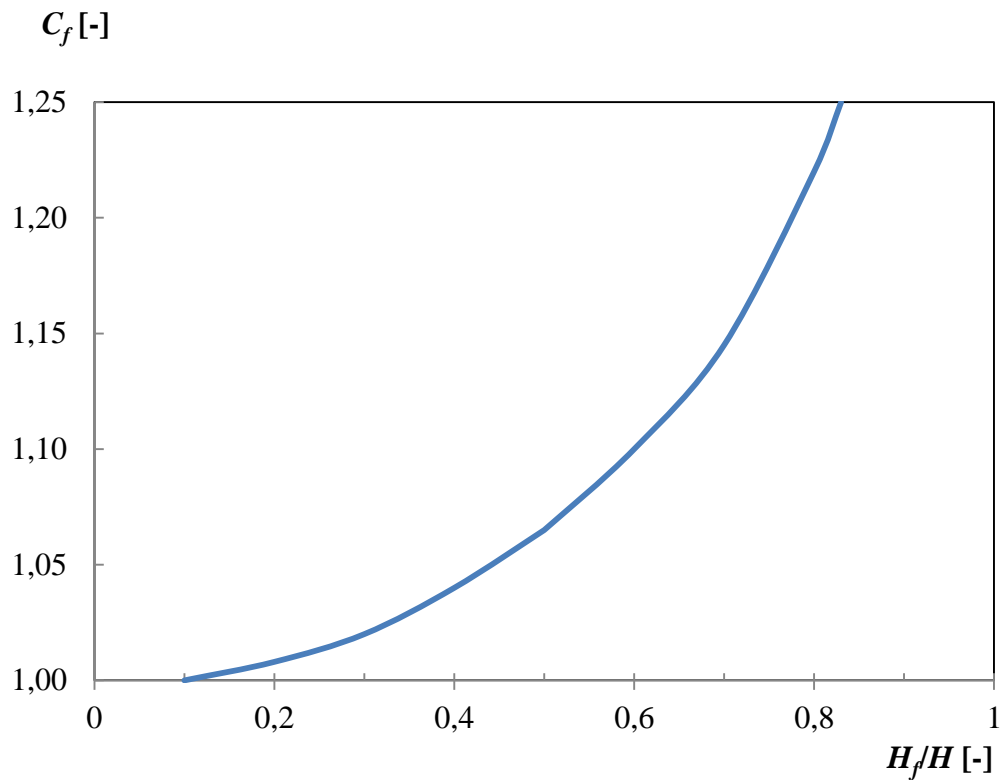
Pro výpočet průtoku přes nezatopený přeliv se širokou korunou pomocí měřené přepadové výšky h je zapotřebí rovnici (4.9) upravit. Proto je zaveden součinitel přítokové rychlosti

$$C_v = \left(\frac{H}{h}\right)^{3/2}, \quad (4.10)$$

který je vyjádřený implicitně zadanou rovnicí

$$C_v = \left[1 + \frac{4}{27} \cdot C_v^2 \cdot \left(\frac{C_d \cdot b \cdot h}{A}\right)^2\right]^{3/2} \quad (4.11)$$

nebo grafem (Obr. 4.2).



Obr. 4.2 Součinitel přítokové rychlosti C_v [4]

Součinitel průtoku pro měřenou přepadovou výšku je pak ve tvaru

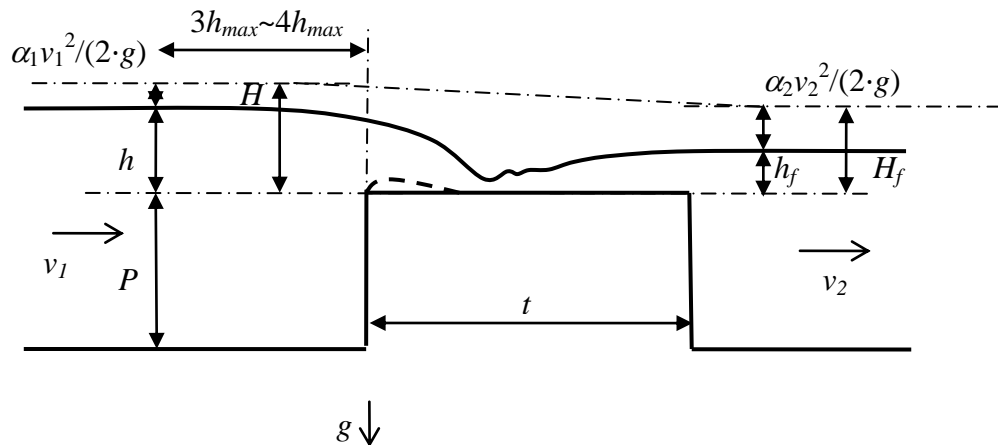
$$C = C_D \cdot C_v, \quad (4.12)$$

rovnice průtoku pro měřenou přepadovou výšku pro dokonalý přepad je [4]

$$Q = C \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot b \cdot h^{3/2}. \quad (4.13)$$

5. NEDOKONALÝ PŘEPAD

U zatopených přelivů dochází k ovlivnění průtoku vodou v odtokovém korytě. Je to způsobeno tím, že úroveň hladiny dolní vody vystoupá výše než je druhá vzájemná výška vlnovitého vodního skoku (Obr. 5.1). Tato hladina dolní vody pak následně brání volnému průtoku vody přes přeliv. To nastane přibližně při $h_f \geq (0,7 - 0,8)H$ [8].



Obr. 5.1 Schéma nedokonalého přepadu přes zatopený přeliv se širokou korunou

5.1 Rovnice průtoku při zatopeném přepadu

Pro stanovení průtoku přes zatopený pravoúhlý přeliv se širokou korunou je jako u nezatopeného přelivu nejčastěji používána rovnice odvozená z Bernoulliho rovnice pro proudění ideální kapaliny s tím, že je zahrnut součinitel zatopení vyjádřený rovnicí (3.1)

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

Tato rovnice je použita při zpracování dat naměřených při experimentu.

5.2 Mezní míra zatopení

Mezní míra zatopení je stav zatopení, při kterém začíná být proudění v přítokovém korytě ovlivněné vodou v odtokovém korytě. Pokud není překročena mezní míra zatopení, nenastane nedokonalý přepad, pokud je překročena, nastane nedokonalý přepad. Mezní míra zatopení je definována různě, nejčastěji poměrem S_h , S_H (3.8) s příslušným indexem vyjadřující mezní stav, tedy S_{hc} , S_{Hc} (3.16) a (3.19). Pro mezní míru zatopení platí, že mezi skutečným průtokem a průtokem v zatopeném režimu vypočteným pomocí vztahu pro výšku dokonalého přepadu je odchylka 1% [3].

Pro vyhodnocení experimentu je dále použita mezní míra zatopení odvozena dle Harrisona (Kap. 3.4) [6]. Toto analytické odvození je spolehlivé, protože uvádí vztah mezní míry zatopení v závislosti na relativní výšce přelivu a úrovni hladiny vody v odtokovém korytě.

5.3 Součinitel zatopení vztažený k mezní míře zatopení

Součinitel zatopení byl vyjádřený v závislosti na mezní míře zatopení z důvodu přesnějšího popsání proudění přes přeliv. Pro stanovení rovnice součinitele zatopení byl přijat Villemonteho předpoklad o interakci průtoků při přepadu se zohledněním mezní výšky zatopení (posunutí srovnávací roviny pro stanovení přepadové výšky), při které nedokonalý přepad vzniká. Proto průtok při dokonalém přepadu v jednom směru může být podle rovnice (4.9) vyjádřen

$$Q = C_D \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot b \cdot g^{1/2} \cdot (H - H_{fc})^{3/2} \quad (5.2)$$

a v opačném směru

$$Q_d = C_{Dd} \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot b \cdot g^{1/2} \cdot (H_f - H_{fc})^{3/2}. \quad (5.3)$$

Rovnice součinitele zatopení je tedy

$$C_f = \frac{Q_f}{Q} = \left(1 - \frac{Q_d}{Q}\right)^m = \left(1 - \frac{C_{Dd} \cdot (H_f - H_{fc})^{3/2}}{C_D \cdot (H - H_{fc})^{3/2}}\right)^X. \quad (5.4)$$

Za předpokladu, že $C_{Dd} = C_D$ a že mocnitél 3/2 může být vlivem zjednodušení jiný, je rovnice zjednodušena na

$$C_f = \left[1 - \left(\frac{H_f - H_{fc}}{H - H_{fc}}\right)^{k_1}\right]^Y, \quad (5.5)$$

kde koeficient k_1 a substituční veličina Y_1 se musí určit experimentálně.

5.4 Meze použití a platnost rovnic

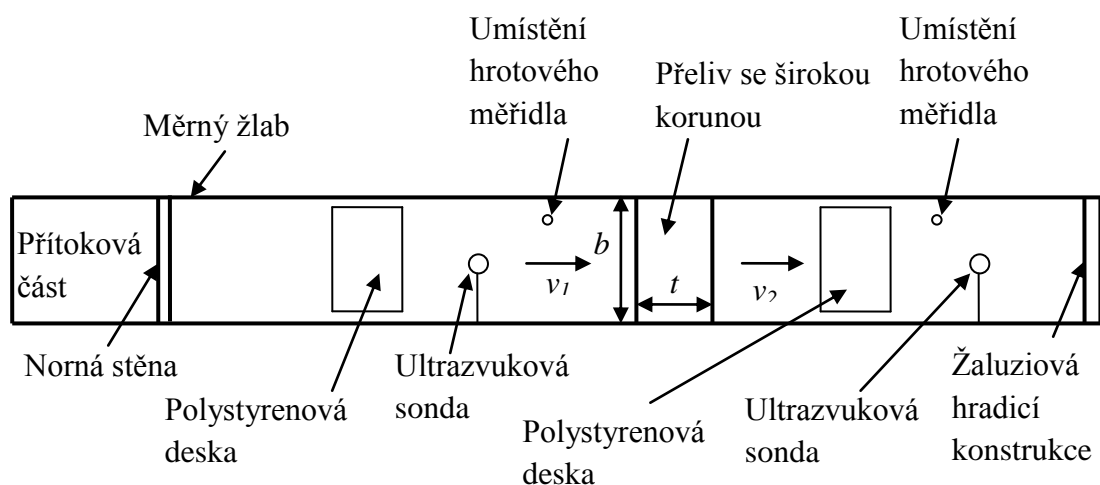
Aby nedošlo k ovlivnění průtoku přes zatopený přeliv vlivem povrchového napětí a viskozity, jsou doporučeny tyto podmínky: $h \geq 0,06$ m, $b \geq 0,3$ m a $P \geq 0,15$ m [3].

6. EXPERIMENT

Měření proběhlo v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb, Fakulty stavební, Vysokého učení technického v Brně.

Experiment byl proveden na pravoúhlém přelivu se širokou korunou. Přeliv o šířce $b = 1,003$ m a tloušťce $t = 0,50$ m byl umístěn ve žlabu o délce 10 m, šířce 1 m a výšce 1 m se skleněnými bočními stěnami a dnem z betonu (Obr. 6.2). Výšky přelivu P byly 0,603 m, 0,254 m, 0,113 m a 0,052 m. Přelivy byly provedeny z povrchově hladkých bílých umělohmotných desek, které byly k sobě upevněny pomocí vrutů.

Voda byla do žlabu čerpána pomocí čerpadel z podzemní zásobní nádrže. Průtok vody Q byl stanovený pomocí měření úrovně hladiny v měrné nádrži, která byla osazena kalibrovaným Thomsonovým přelivem (Obr. 6.3). Voda přepadala do žlabu před normou stěnu, kde docházelo k útlumu proudu vody. Dále byla na hladinu vody položena deska z pěnového polystyrenu, aby se odstranilo zvlnění hladiny před přelivem (Obr. 6.2). Další deska byla umístěna za přelivem pro přesnější změření úrovně hladiny dolní vody. Průtokové stavy se nastavovaly pomocí měniče otáček motoru čerpadel v rozsahu od $0,022$ m³/s do $0,112$ m³/s. Úroveň hladiny dolní vody byla regulována pomocí žaluziové hradící konstrukce (Obr. 6.4).



Obr. 6.1 Schéma umístění přelivu v měrném žlabu



Obr. 6.2 Měrný žlab



Obr. 6.3 Thomsonův přeliv



Obr. 6.4 Žaluziová hradicí konstrukce

6.1 Měření

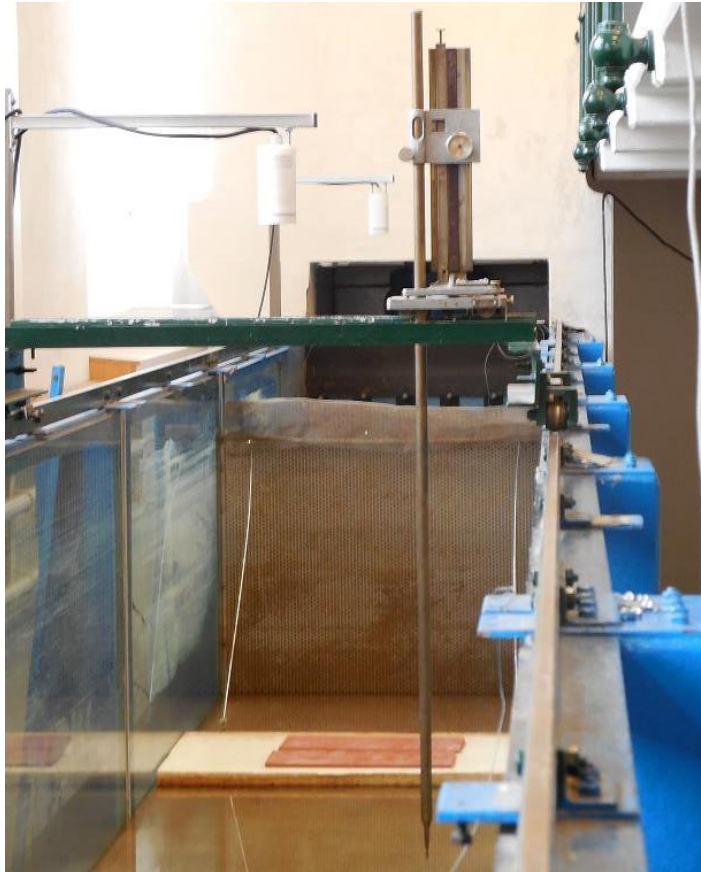
Při různých výškách přelivu P a při různých průtocích Q byly zaznamenávány hodnoty úrovně hladiny před přelivem a za přelivem. Hodnoty byly měřeny pomocí hrotového měřidla (Obr. 6.4) a dvou ultrazvukových sond (Obr. 6.5).

Hrotové měřidlo bylo upevněno na pojezdovém zařízení umístěném na kolejnicích žlabu. V případě potřeby bylo možné s měřidlem pohybovat v podélném i příčném směru vzhledem ke žlabu. Ultrazvukové sondy byly pevně upevněny ke žlabu. Pro měření úrovně hladiny před přelivem byly hrotové měřidlo a jedna ze sond umístěny ve vzdálenosti $3 \cdot h$ až $4 \cdot h$ protiproudě od návodního líce přelivu. Zařízení pro měření úrovně hladiny za přelivem bylo umístěno přibližně 3,5 m od povodního líce přelivu pro eliminaci účinků způsobených vlněním hladiny.

Měření vždy začínalo změřením délky přelivu t a výšky přelivu P pomocí ocelového měřidla a zapsáním těchto hodnot. Teplota vody v měrném žlabu byla 18,5 °C. Aby měření úrovní hladin bylo s požadovanou přesností, bylo třeba před prvním měřením pro jednotlivé výšky přelivu nastavit na hrotovém měřidle nulovou hodnotu odpovídající úrovni koruny přelivu.

Průtoky byly přibližně 0,022 m³/s, 0,046 m³/s, 0,068 m³/s, 0,09 m³/s a 0,112 m³/s. Po ustálení jednotlivých průtoků byla pomocí žaluziové hradicí konstrukce měněna úroveň hladiny vody v odtokovém korytě, dokud nenastalo ovlivnění průtoku přes přeliv touto úrovní hladiny. Ovlivnění se projevilo vytvořením přilehlého vlnovitého vodního skoku na koruně a změnou polohy hladiny vody před přelivem. Následně bylo pro jednotlivé průtoky provedeno několik odečtení úrovní hladin před přelivem a za přelivem pomocí hrotového měřidla a ultrazvukových sond. Hodnoty byly zapisovány do programu, ve kterém byly následně zpracovány a vyhodnoceny.

Jednotlivé průtokové stavy přes přeliv při jednotlivých výškách přelivů byly v průběhu měření fotografovány. Doba měření při jedné výšce přelivu byla přibližně pět hodin.



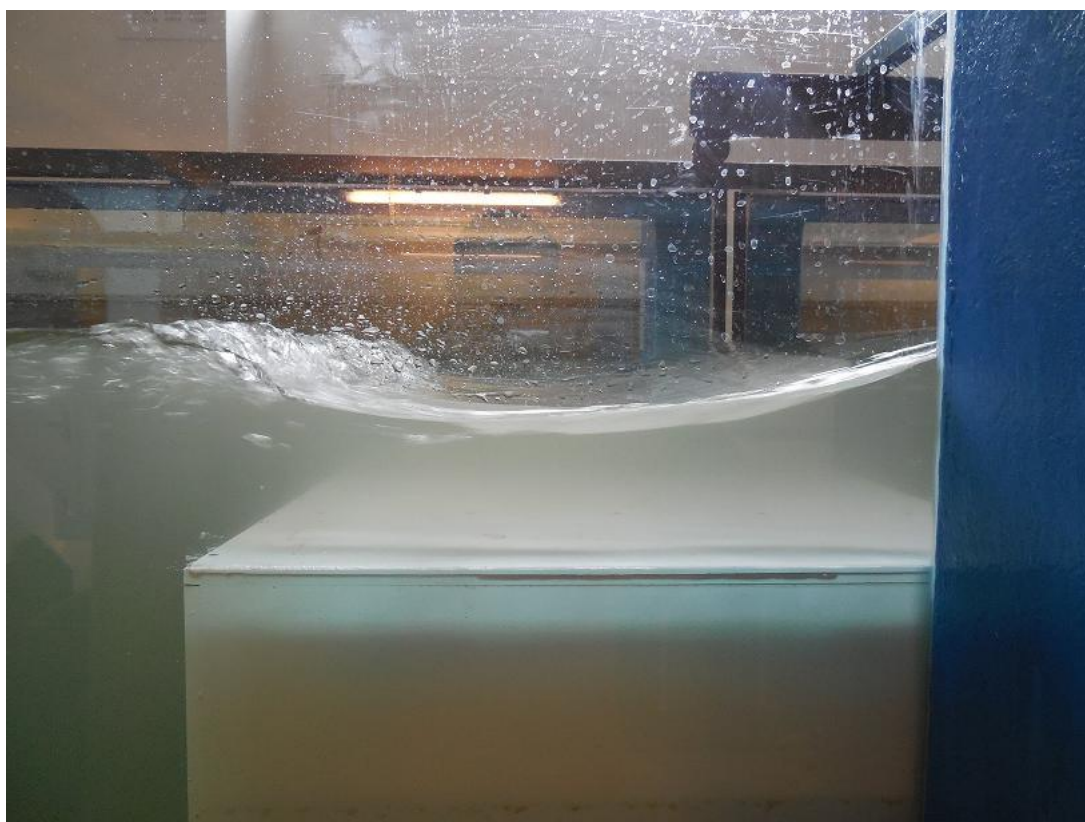
Obr. 6.5 Hrotové měřidlo



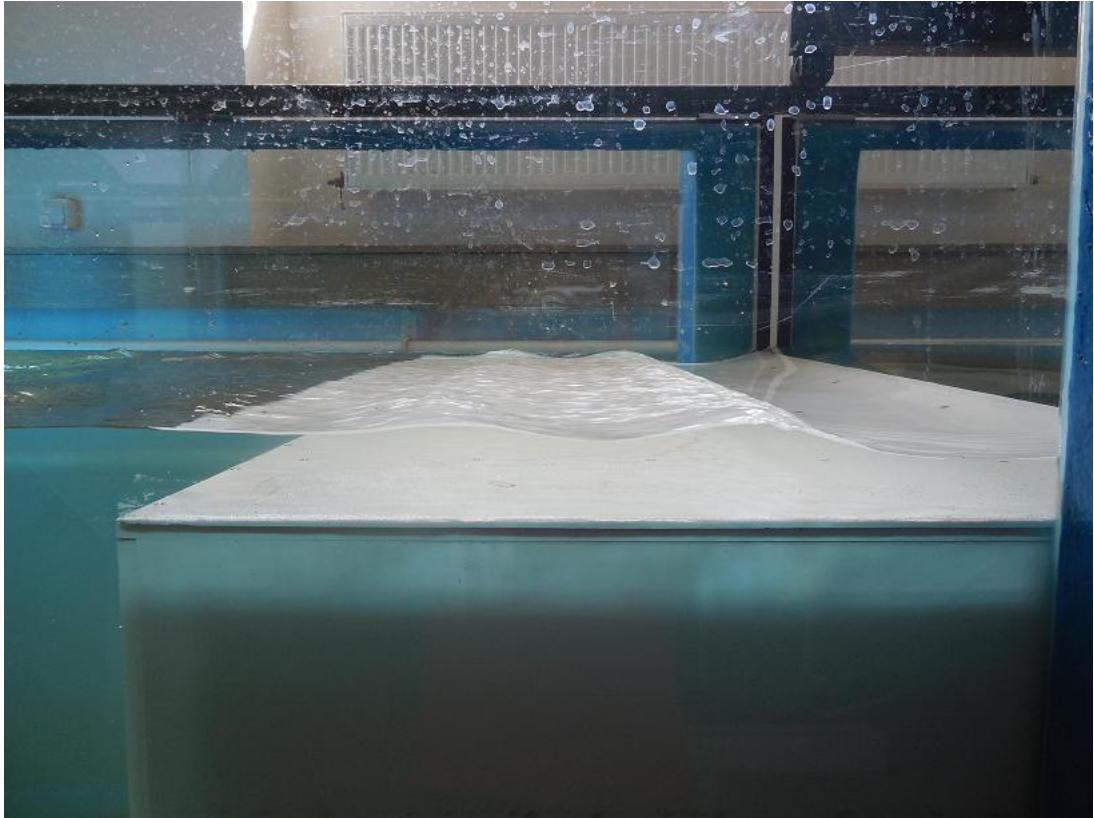
Obr. 6.6 Ultrazvuková sonda



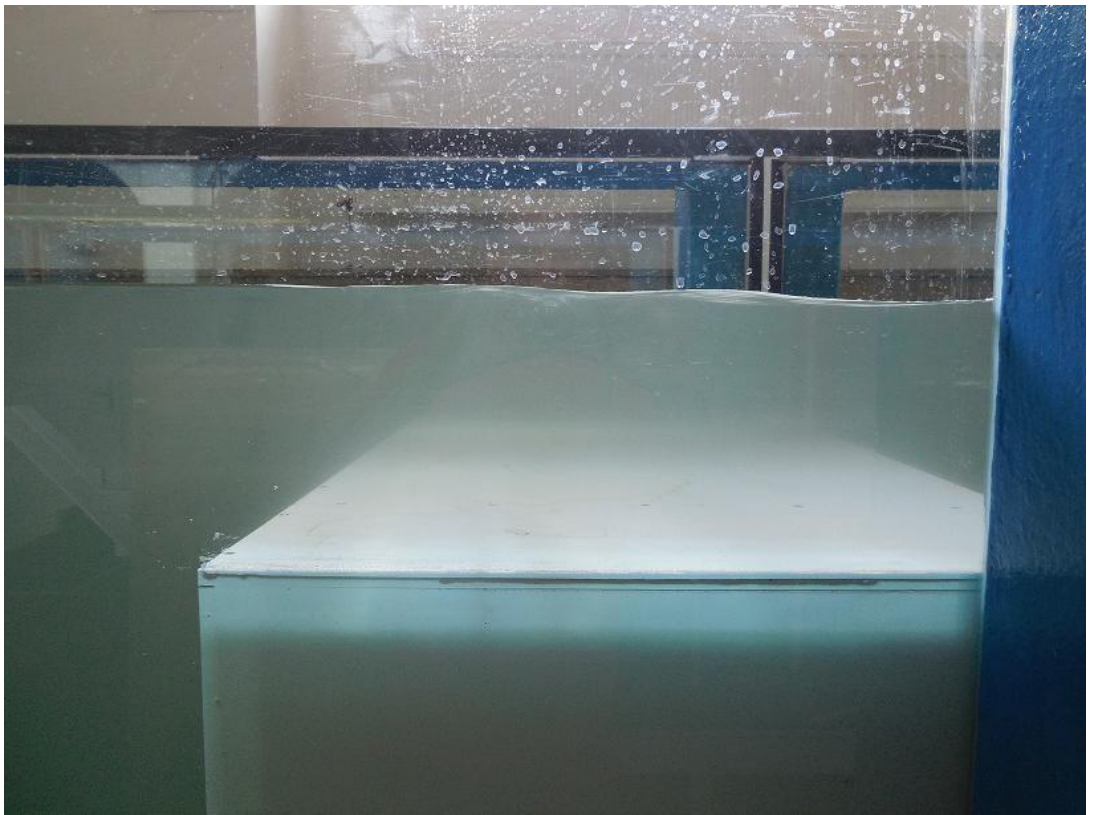
Obr. 6.7 Přeliv se širokou korunou o výšce 0,603 m



Obr. 6.8 Mezní míra zatopení na přelivu o výšce 0,603 m



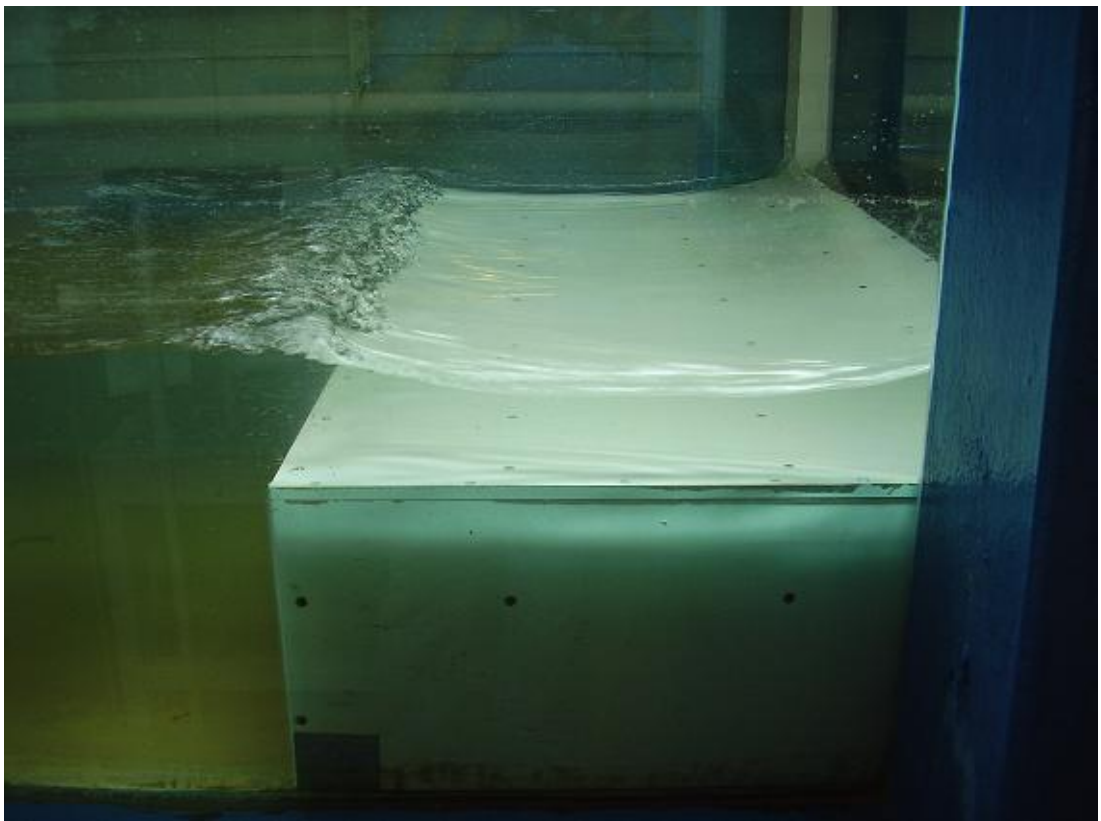
Obr. 6.9 Proudění přes přeliv o výšce 0,603 m



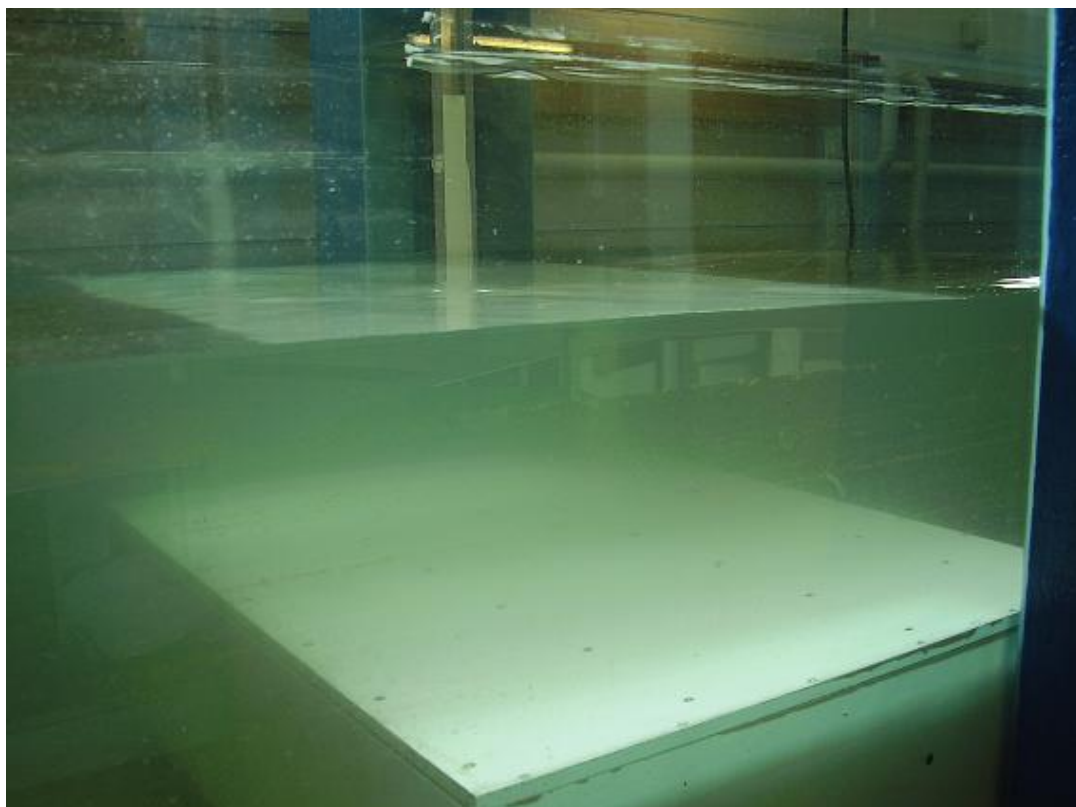
Obr. 6.10 Plně zatopení přeliv se širokou korunou o výšce 0,603 m



Obr. 6.11 Přeliv se širokou korunou o výšce 0,254 m



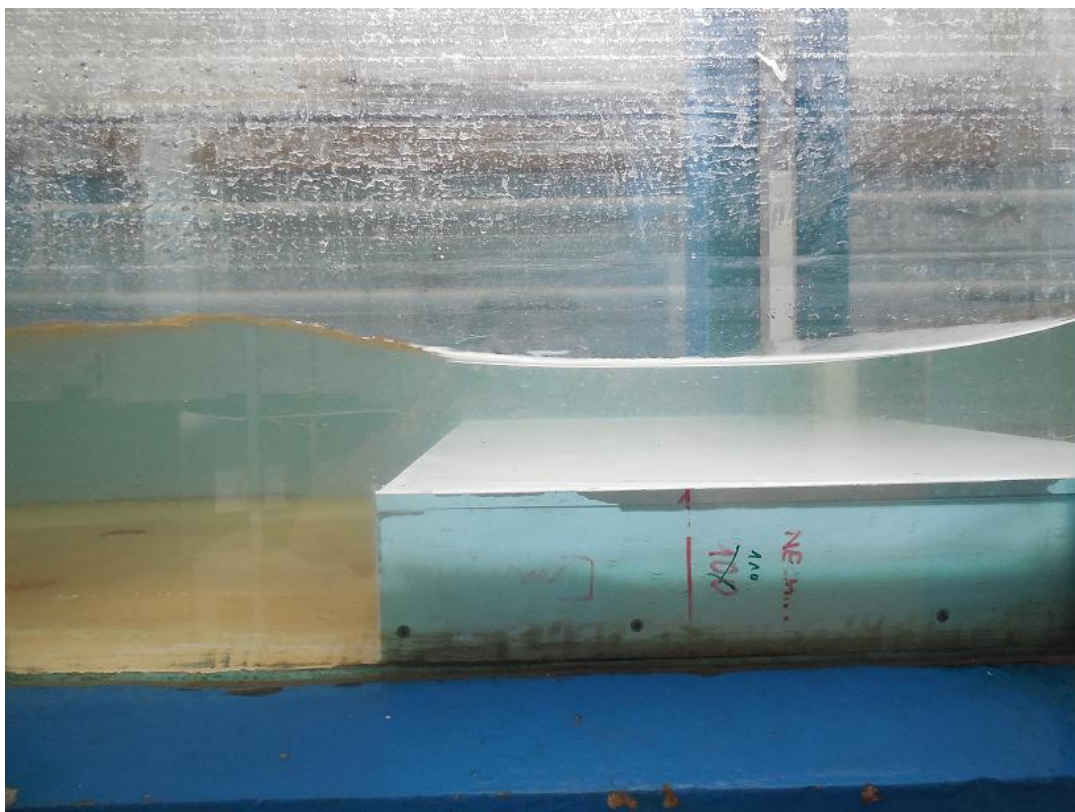
Obr. 6.12 Mezní míra zatopení na přelivu o výšce 0,254 m



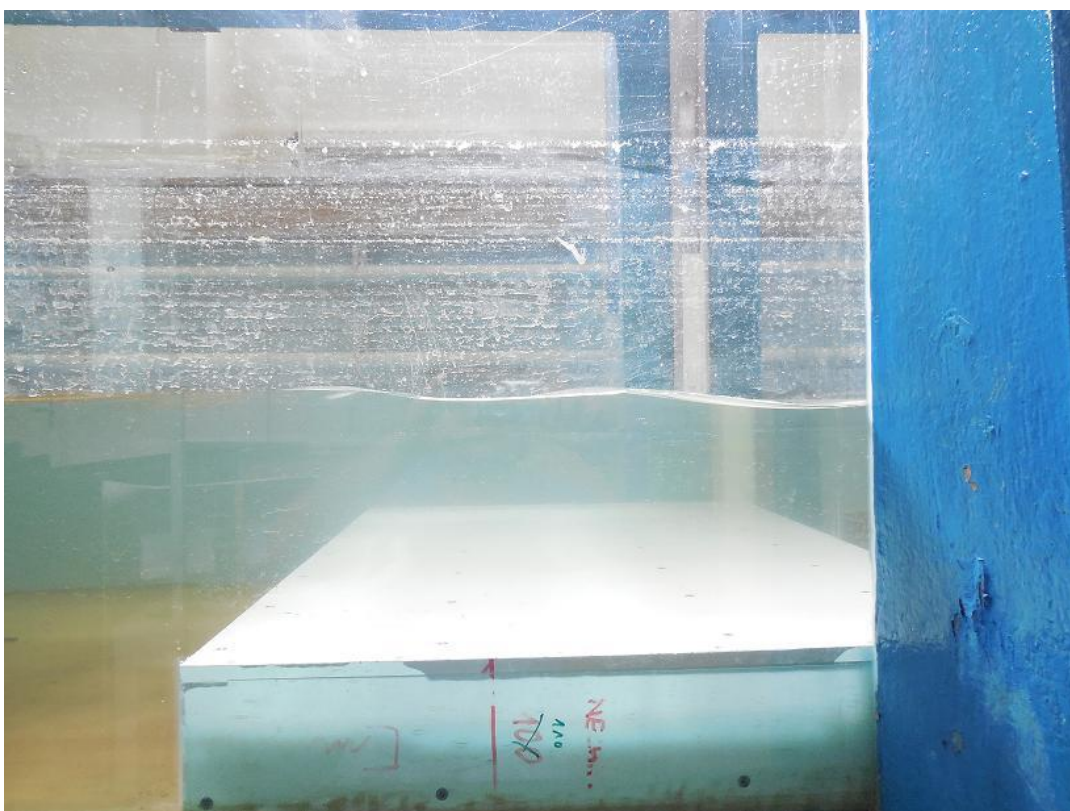
Obr. 6.13 Plně zatopený přeliv se širokou korunou o výšce 0,254 m



Obr. 6.14 Přeliv se širokou korunou o výšce 0,113 m



Obr. 6.15 Mezní míra zatopení na přelivu se širokou korunou o výšce 0,113 m



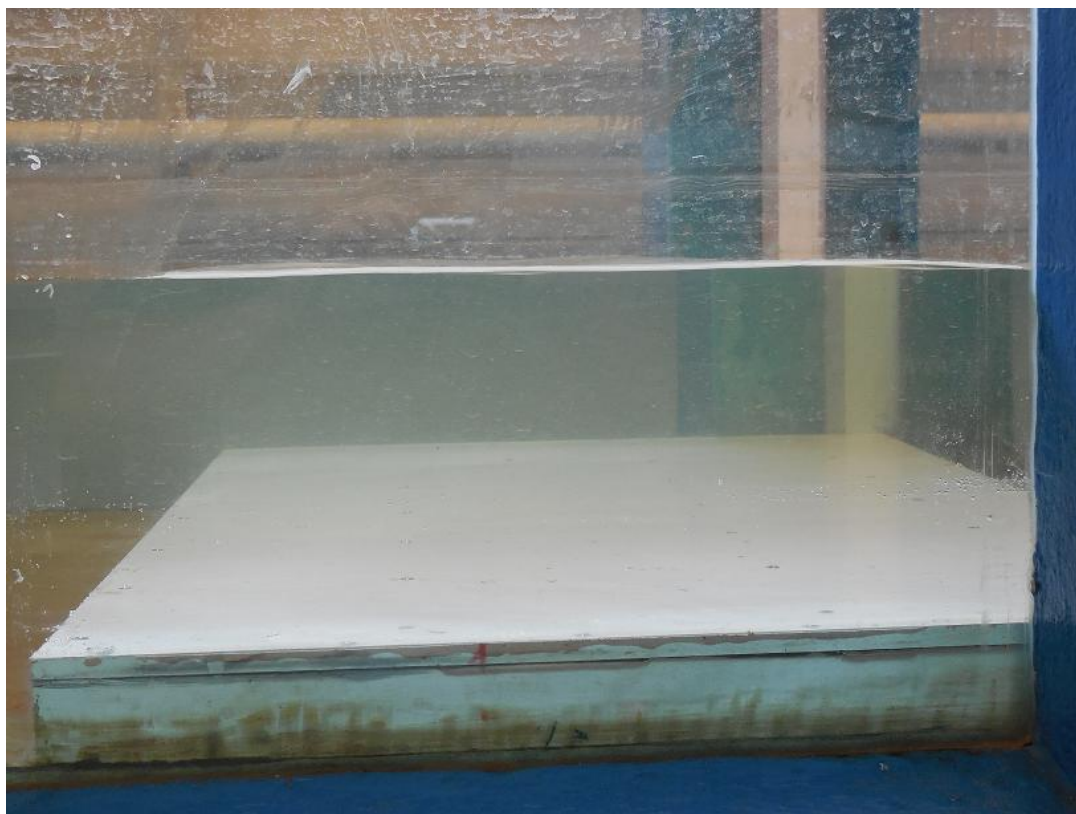
Obr. 6.16 Plně zatopený přeliv se širokou korunou o výšce 0,113 m



Obr. 6.17 Přeliv se širokou korunou o výšce 0,052 m



Obr. 6.18 Mezní míra zatopení přelivu se širokou korunou o výšce 0,052 m



Obr. 6.19 Plně zatopený přeliv se širokou korunou o výšce 0,052 m

6.2 Zpracování

Zpracování bylo provedeno pouze pro data z hrotového měřidla, data z ultrazvukových sond sloužila pro ověření dat získaných z hrotového měřidla. Z naměřených hodnot úrovně hladiny před a za přelivem pro jednotlivé výšky přelivu P při různých průtokových stavech byla po odečtení výšky přelivu P stanovena přepadová výška h a výška zatopení h_f (Tab. 6.1) až (Tab. 6.4). Následně byla vypočtena energetická přepadová výška H a energetická výška zatopení H_f podle rovnic

$$H = h + \frac{v^2}{2 \cdot g}, \quad (6.1)$$

$$H_f = h_f + \frac{v_d^2}{2 \cdot g}. \quad (6.2)$$

Podle rovnice (4.9) byly vypočteny součinitelé průtoku C_D . Součinitel zatopení C_f byl při konstantním průtoku stanoven jako

$$C_f = \frac{C_D}{C_{D'}}, \quad (6.3)$$

kde $C_{D'}$ je součinitel průtoku při mezní míře zatopení pro jednotlivé měřené stavy. Pomocí analytického odvození dle Harrisona [6] byla vypočítána mezní míra zatopení H_{fc} pro jednotlivé měřené stavy dle rovnic (3.9) a (3.23) a dále byl pro tyto stavy určen poměr

$$\frac{H_f - H_{fc}}{H - H_{fc}}. \quad (6.4)$$

Součinitel zatopení C_f byl zobrazen v závislosti na poměru (6.4), výsledky jsou zobrazeny na Obr. 6.20.

Ze sestavených závislostí byly sestrojeny spojnice trendu s mocninnou charakteristikou (Obr. 6.20) ve tvaru rovnice (5.5). Hodnota koeficientu k_1 byla stanovena jako 1,64. Pro substituční veličinu Y byla stanovena logaritmická závislost na relativní výšce přelivu h/P . Závislost substituční veličiny Y na h/P je vyjádřena rovnicí ve tvaru

$$Y = k_2 \cdot \ln\left(\frac{h}{P}\right) + k_3, \quad (6.5)$$

kde metodou nejmenších čtverců byly vyjádřeny hodnoty koeficientů $k_2 = -0,035$ a $k_3 = 0,19$. Rovnice (6.5) je po dosazení

$$Y = -0,039 \cdot \ln\left(\frac{h}{P}\right) + 0,19. \quad (6.6)$$

Závislost součinitele zatopení C_f na H , H_f , H_{fc} a poměru h/P je tedy vyjádřena rovnicí (5.5) ve tvaru

$$C_f = \left[1 - \left(\frac{H_f - H_{fc}}{H - H_{fc}} \right)^{1,64} \right]^{-0,039 \ln\left(\frac{h}{P}\right) + 0,19}, \quad (6.7)$$

s koeficientem determinace $R^2 = 0,98$.

Tab. 6.1 Měřené hodnoty pro přeliv o výšce $P=0,603$ m

P	Q	h	h_f	P	Q	h	h_f
[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]
0,603	0,023	0,063		0,603	0,068	0,149	0,134
0,603	0,023	0,063	0,049	0,603	0,068	0,159	0,147
0,603	0,023	0,063	0,048	0,603	0,068	0,170	0,160
0,603	0,022	0,072	0,065	0,603	0,068	0,183	0,176
0,603	0,022	0,067	0,058	0,603	0,068	0,200	0,194
0,603	0,022	0,065	0,054	0,603	0,068	0,215	0,211
0,603	0,022	0,077	0,071	0,603	0,090	0,157	
0,603	0,022	0,081	0,076	0,603	0,090	0,157	0,124
0,603	0,022	0,089	0,085	0,603	0,090	0,160	0,128
0,603	0,022	0,096	0,094	0,603	0,090	0,163	0,138
0,603	0,022	0,104	0,102	0,603	0,090	0,170	0,146
0,603	0,022	0,120	0,121	0,603	0,090	0,178	0,156
0,603	0,045	0,100		0,603	0,090	0,189	0,173
0,603	0,045	0,101	0,082	0,603	0,090	0,204	0,192
0,603	0,045	0,100	0,079	0,603	0,090	0,217	0,209
0,603	0,045	0,103	0,085	0,603	0,090	0,237	0,230
0,603	0,045	0,107	0,092	0,603	0,112	0,181	
0,603	0,045	0,110	0,096	0,603	0,112	0,181	0,142
0,603	0,045	0,116	0,105	0,603	0,112	0,182	0,143
0,603	0,045	0,123	0,114	0,603	0,112	0,183	0,149
0,603	0,045	0,133	0,125	0,603	0,112	0,188	0,159
0,603	0,045	0,145	0,139	0,603	0,112	0,192	0,164
0,603	0,045	0,160	0,156	0,603	0,112	0,197	0,172
0,603	0,045	0,176	0,172	0,603	0,112	0,207	0,186
0,603	0,068	0,131		0,603	0,112	0,218	0,200
0,603	0,068	0,133	0,107	0,603	0,112	0,231	0,215
0,603	0,068	0,131	0,104	0,603	0,112	0,244	0,233
0,603	0,068	0,135	0,113	0,603	0,112	0,263	0,254
0,603	0,068	0,140	0,120	0,603	0,112	0,285	0,280
0,603	0,068	0,145	0,129				

Tab. 6.2 Měřené hodnoty pro přeliv o výšce $P=0,254$ m

P	Q	h	h_f	P	Q	h	h_f
[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]
0,254	0,022	0,061		0,254	0,068	0,148	0,138
0,254	0,022	0,062	0,047	0,254	0,068	0,161	0,154
0,254	0,022	0,067	0,061	0,254	0,068	0,187	0,182
0,254	0,022	0,064	0,055	0,254	0,068	0,144	0,132
0,254	0,022	0,067	0,060	0,254	0,068	0,132	0,115
0,254	0,022	0,065	0,055	0,254	0,068	0,175	0,170
0,254	0,022	0,063	0,052	0,254	0,090	0,154	
0,254	0,022	0,074	0,070	0,254	0,090	0,157	0,136
0,254	0,022	0,092	0,090	0,254	0,090	0,160	0,143
0,254	0,022	0,099	0,097	0,254	0,090	0,168	0,153
0,254	0,022	0,074	0,069	0,254	0,090	0,173	0,160
0,254	0,045	0,098		0,254	0,090	0,182	0,172
0,254	0,045	0,098	0,081	0,254	0,090	0,190	0,180
0,254	0,045	0,104	0,090	0,254	0,090	0,201	0,194
0,254	0,045	0,102	0,089	0,254	0,090	0,252	0,247
0,254	0,045	0,116	0,109	0,254	0,090	0,217	0,211
0,254	0,045	0,110	0,101	0,254	0,111	0,176	
0,254	0,045	0,119	0,111	0,254	0,111	0,177	0,152
0,254	0,045	0,133	0,128	0,254	0,111	0,183	0,164
0,254	0,045	0,137	0,132	0,254	0,111	0,200	0,188
0,254	0,068	0,129		0,254	0,111	0,224	0,214
0,254	0,068	0,130	0,109	0,254	0,111	0,261	0,257
0,254	0,068	0,131	0,112	0,254	0,111	0,188	0,169
0,254	0,068	0,136	0,121	0,254	0,111	0,181	0,159

Tab. 6.3 Měřené hodnoty pro přeliv o výšce $P=0,113$ m

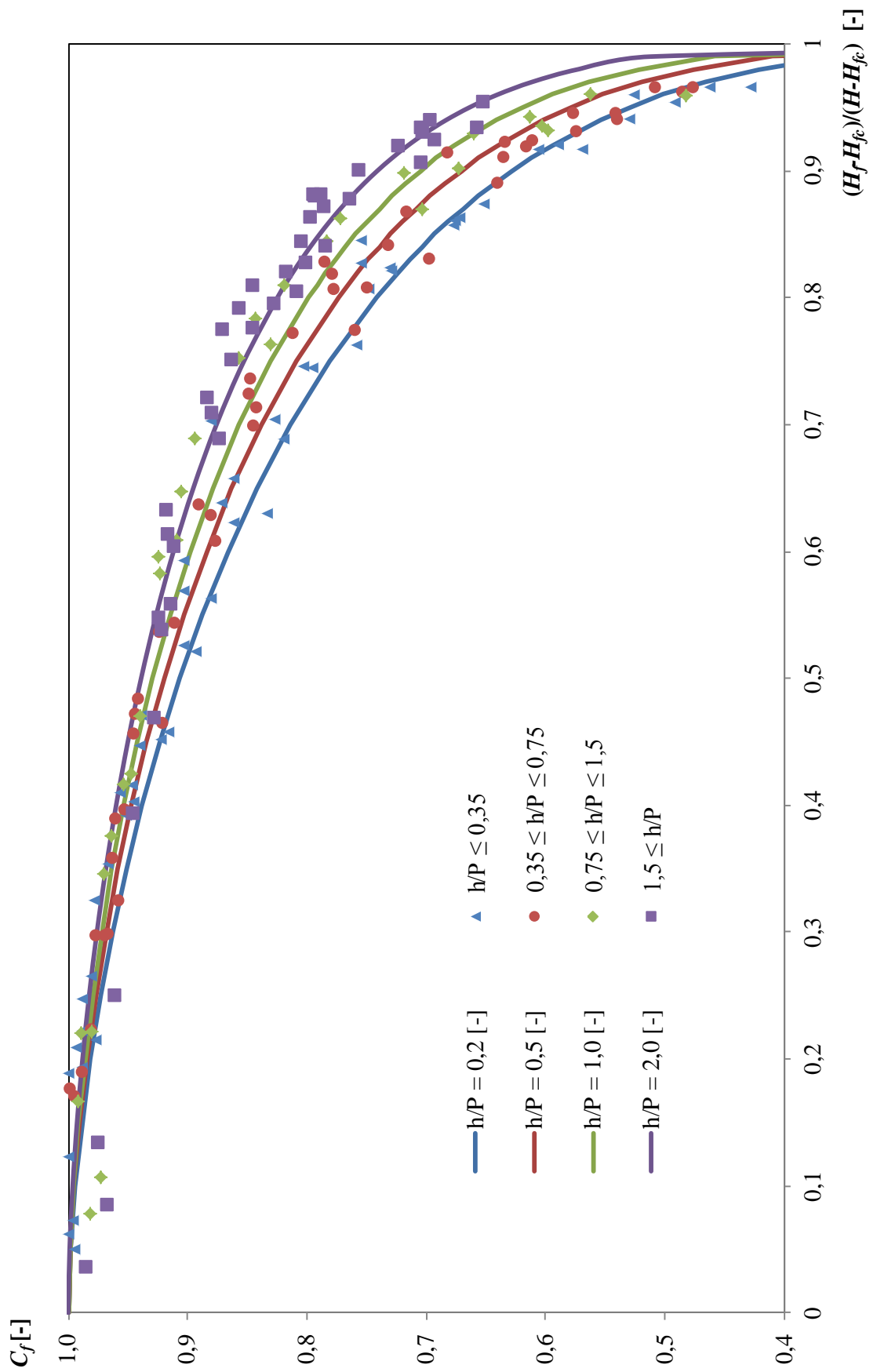
P	Q	h	h_f	P	Q	h	h_f
[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]
0,113	0,023	0,062		0,113	0,068	0,125	0,112
0,113	0,023	0,063	0,054	0,113	0,068	0,134	0,126
0,113	0,023	0,064	0,055	0,113	0,068	0,131	0,121
0,113	0,023	0,086	0,084	0,113	0,068	0,142	0,136
0,113	0,023	0,088	0,085	0,113	0,068	0,165	0,161
0,113	0,023	0,080	0,078	0,113	0,068	0,148	0,143
0,113	0,023	0,073	0,069	0,113	0,090	0,147	
0,113	0,023	0,068	0,061	0,113	0,090	0,149	0,132
0,113	0,023	0,069	0,064	0,113	0,090	0,158	0,147
0,113	0,023	0,067	0,061	0,113	0,090	0,154	0,142
0,113	0,023	0,064	0,056	0,113	0,090	0,170	0,163
0,113	0,023	0,063	0,055	0,113	0,090	0,191	0,187
0,113	0,046	0,097		0,113	0,090	0,175	0,168
0,113	0,046	0,100	0,089	0,113	0,090	0,178	0,173
0,113	0,046	0,098	0,086	0,113	0,113	0,168	
0,113	0,046	0,108	0,102	0,113	0,113	0,169	0,154
0,113	0,046	0,104	0,097	0,113	0,113	0,175	0,161
0,113	0,046	0,103	0,095	0,113	0,113	0,180	0,167
0,113	0,046	0,100	0,090	0,113	0,113	0,178	0,164
0,113	0,046	0,115	0,110	0,113	0,113	0,193	0,185
0,113	0,046	0,122	0,118	0,113	0,113	0,228	0,223
0,113	0,046	0,111	0,105	0,113	0,113	0,217	0,211
0,113	0,068	0,123		0,113	0,113	0,196	0,188
0,113	0,068	0,126	0,114				

Tab. 6.4 Měřené hodnoty pro přeliv o výšce $P=0,054$ m

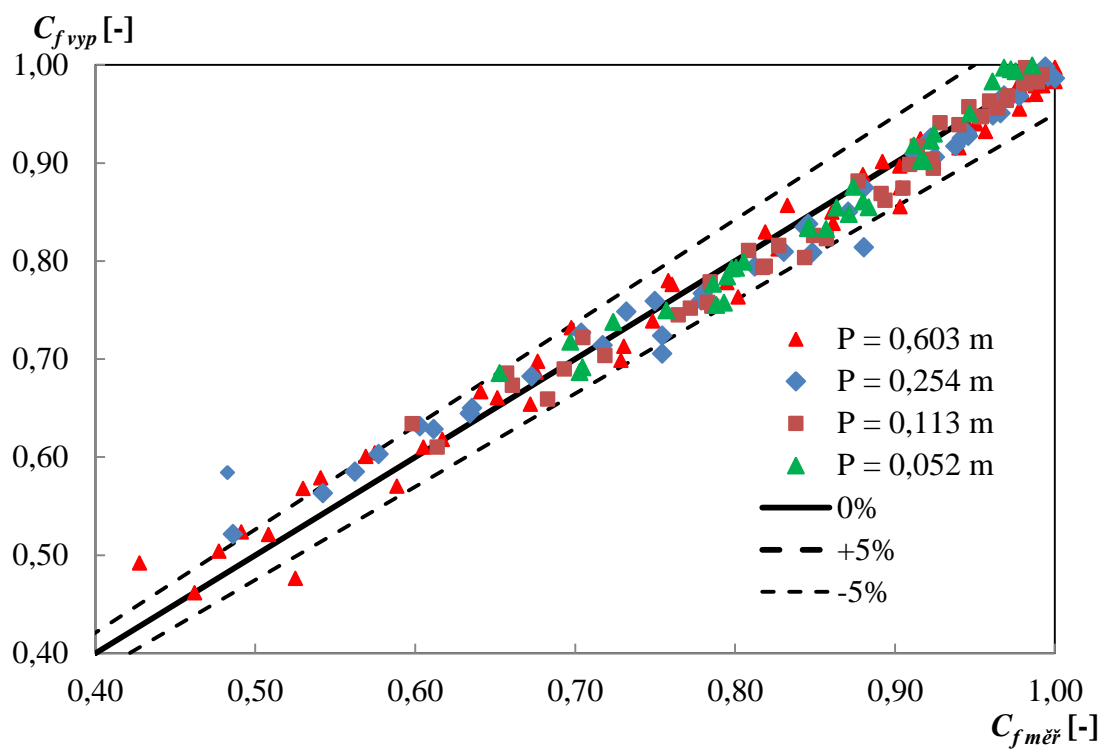
P	Q	h	h_f	P	Q	h	h_f
[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]
0,052	0,033	0,075		0,052	0,068	0,124	0,118
0,052	0,033	0,075	0,067	0,052	0,068	0,130	0,125
0,052	0,033	0,082	0,078	0,052	0,068	0,140	0,136
0,052	0,033	0,078	0,072	0,052	0,068	0,144	0,140
0,052	0,033	0,082	0,078	0,052	0,068	0,137	0,133
0,052	0,033	0,096	0,094	0,052	0,068	0,131	0,126
0,052	0,033	0,088	0,084	0,052	0,090	0,137	
0,052	0,033	0,079	0,074	0,052	0,090	0,142	0,132
0,052	0,033	0,076	0,068	0,052	0,090	0,146	0,138
0,052	0,046	0,092		0,052	0,090	0,153	0,148
0,052	0,046	0,093	0,084	0,052	0,090	0,164	0,159
0,052	0,046	0,094	0,085	0,052	0,090	0,176	0,173
0,052	0,046	0,102	0,096	0,052	0,090	0,190	0,188
0,052	0,046	0,110	0,107	0,052	0,112	0,158	
0,052	0,046	0,119	0,117	0,052	0,112	0,160	0,147
0,052	0,046	0,109	0,106	0,052	0,112	0,170	0,162
0,052	0,046	0,098	0,093	0,052	0,112	0,181	0,175
0,052	0,046	0,104	0,100	0,052	0,112	0,190	0,185
0,052	0,068	0,116		0,052	0,112	0,210	0,206
0,052	0,068	0,119	0,109				

6.3 Vyhodnocení

Závislost součinitele zatopení C_f na poměru (6.2) pro jednotlivé intervaly h/P byla vynesena v Obr. 6.20. Výsledné hodnoty se pohybovaly v rozsahu $0,0 \leq (H_f - H_{fc})/(H - H_{fc}) \leq 1,0$ a $0,4 \leq C_f \leq 1,0$. Pro hodnoty součinitele zatopení byl vyjádřený vztah (6.7), podle kterého byly pro příslušné hodnoty H , H_f , H_{fc} a h/P vypočítány hodnoty součinitele zatopení $C_{f\text{vyp}}$ a porovnány s naměřenými hodnotami $C_{f\text{měř}}$ v grafu shody (Obr. 6.21). Porovnání naměřených a vypočítaných hodnot je provedeno v rozsahu $0,4 \leq C_{f\text{měř}} \leq 1,0$ a $0,4 \leq C_{f\text{vyp}} \leq 1,0$. Z grafu shody vyplývá, že převážná většina vypočítaných hodnot součinitele zatopení se od naměřených hodnot liší do 5%. To vypovídá o dobré spolehlivosti odvození rovnice (6.7).



Obr. 6.20 Součinitel zatopení C_f v závislosti na H , H_f , H_{fc} a poměru h/P



Obr. 6.21 Graf shody naměřených a vypočítaných hodnot součinitele zatopení C_f

7. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

Pro porovnání výsledků měření uvedených v Tab. 6.1 až Tab. 6.4 byly použity doporučené vztahy a výsledky měření jiných autorů a ČSN ISO 3846 [3] uvedených v kapitole 3. Porovnání je provedeno zvláště pro součinitel zatopení C_f a pro mezní míru zatopení. Porovnání hodnot je provedeno pouze s hodnotami pro zatopené přelivy se širokou korunou.

7.1 Porovnání součinitele zatopení

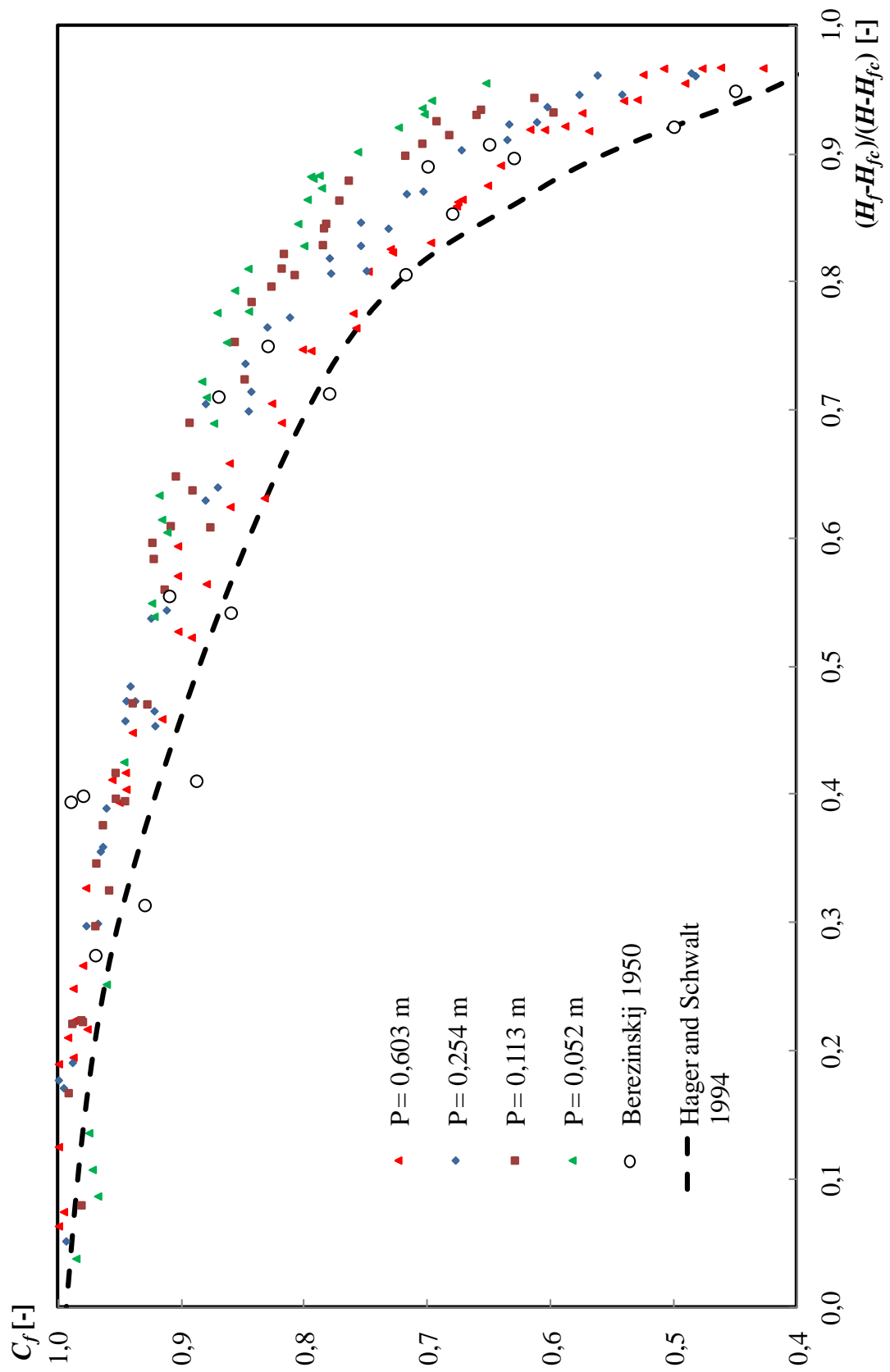
Pro porovnání naměřených hodnot součinitele zatopení C_f byly použity výsledky měření některých autorů v kapitole 3, kteří závislost součinitele zatopení uvádí.

Hodnoty součinitele zatopení byly v závislosti na poměru (6.2) pro jednotlivé výšky přelivu P porovnány s autory Berezinskij [1], Hager a Schwalt [5] a vyneseny do grafu (Obr. 7.1). Výsledné hodnoty se pohybovaly v rozsahu $0,0 \leq (H_f - H_{fc}) / (H - H_{fc}) \leq 1,0$ a $0,3 \leq C_f \leq 1,0$. V grafu (Obr. 7.1) je viditelné, že výsledky experimentu se od autorů liší. V porovnání s hodnotami, které uvádějí Hager a Schwalt pro přeliv se širokou korunou výšky $P = 0,401$ m, se výsledky součinitele zatopení přibližně shodují v rozsahu $0,0 \leq (H_f - H_{fc}) / (H - H_{fc}) \leq 0,3$. Při $(H_f - H_{fc}) / (H - H_{fc}) > 0,3$ se hodnoty součinitele zatopení pro nízké přelivy se širokou korunou odlišují do 25%. Hodnoty uváděné Berezinskim, které vychází z měření pro přeliv se širokou korunou o výšce $P = 0,200$ m, jsou více rozptýlené a jejich průběh spíše odpovídá pro přelivy o vyšších hodnotách P . To je zřejmě způsobeno tím, že autor neuvažuje mezní míru zatopení. Z grafu je dále zřejmé, že přelivy o větší výšce P mohou mít nižší hodnotu součinitele zatopení C_f . Pro přeliv o výšce $P = 0,603$ m je rozsah hodnot součinitele zatopení $0,43 \leq C_f < 1,0$, pro $P = 0,254$ m je nejnižší hodnota součinitele zatopení 0,49, pro $P = 0,113$ m je 0,60 a pro $P = 0,052$ m je 0,65.

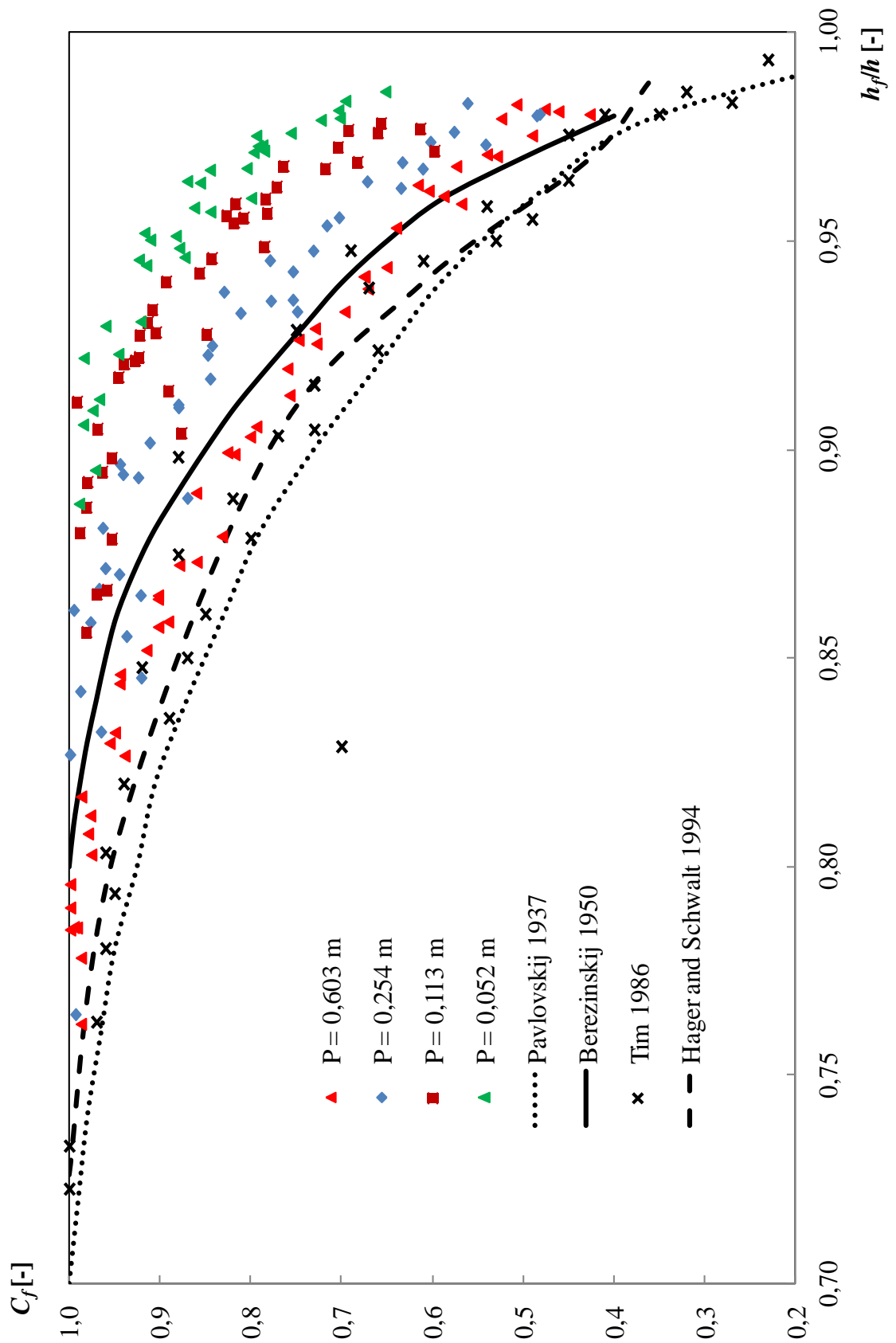
Porovnání hodnot součinitele zatopení s hodnotami, které uvádí Pavlovskij [1] a Tim [11] v závislosti na poměru h_f/h , bylo doplněno o hodnoty, které uvádějí autoři Berezinskij a Hager a Schwalt. Porovnání je zobrazeno na Obr. 7.2. Hodnoty

byly vyneseny v rozsahu $0,7 \leq h_f/h \leq 1,0$ a $0,2 \leq C_f \leq 1,0$. V případě použití hodnot Pavlovského, Tima a Hagera a Schwalta je pro nízké přelivy rozptyl až 40% a v případě Berezinskeho je rozptyl do 30%. Z grafu (Obr. 7.2) je tedy zřejmé, že pro stanovení součinitele zatopení v závislosti na poměru h_f/h pro nízké přelivy se širokou korunou nejsou tato odvození zcela spolehlivá.

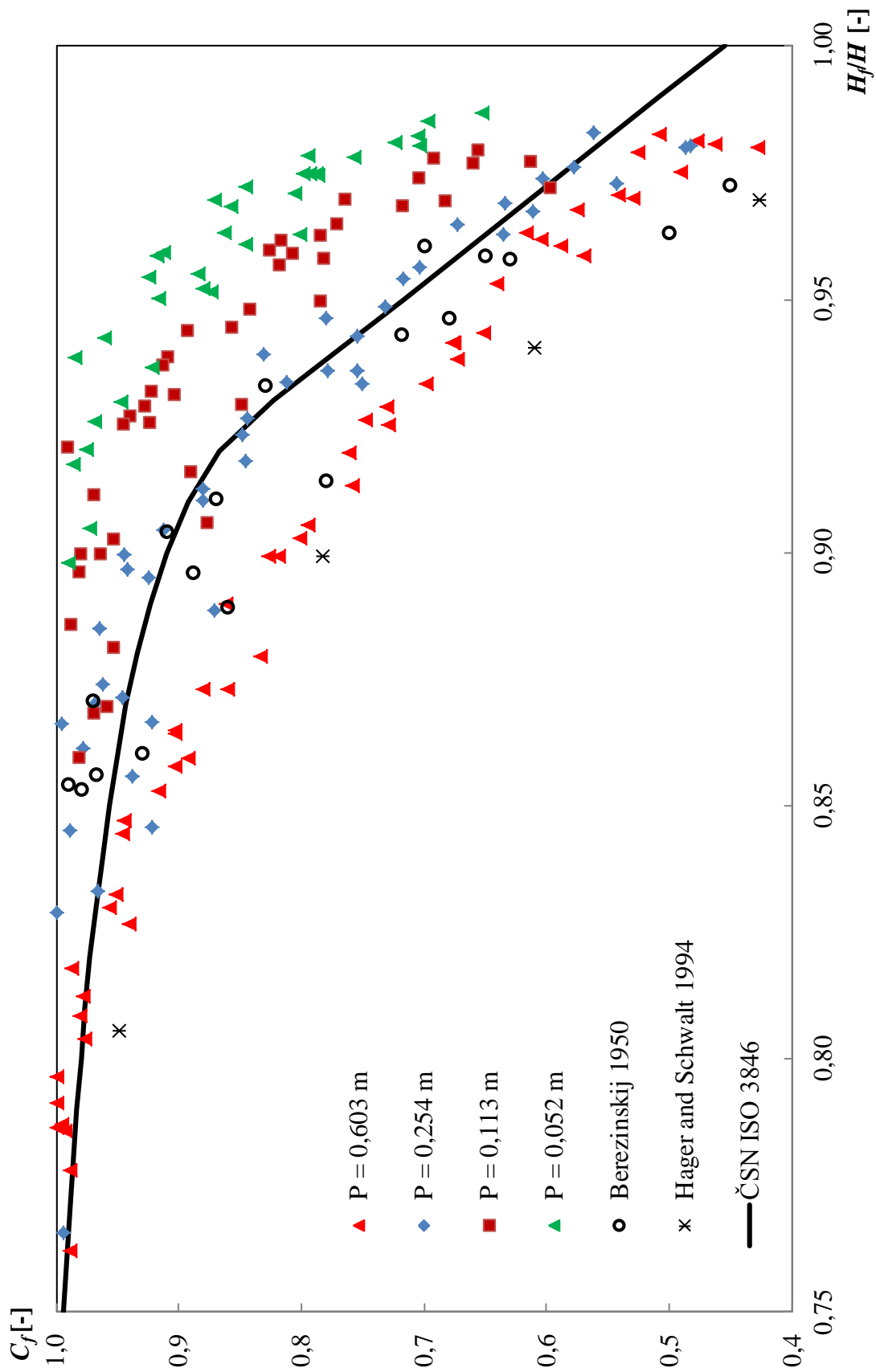
Porovnání s vypočítanými hodnotami součinitele zatopení C_f dle rovnic (3.45) a (3.46) uvedených v normě ČSN ISO 3846 [3] je provedeno v závislosti na poměru H_f/H (Obr 7.3). Porovnání je opět provedeno pro jednotlivé výšky přelivu P a je provedeno s porovnáním s hodnotami autorů Berezinskij a Hager a Schwalt. Hodnoty byly vyneseny v rozsahu $0,7 \leq H_f/H \leq 1,0$ a $0,4 \leq C_f \leq 1,0$. Obr 7.3 ukazuje přibližně 20% rozptyl naměřených hodnot součinitele zatopení od hodnot určených pomocí normy ČSN ISO 3846. Toto porovnání dále potvrzuje použití normy ČSN ISO 3846 pro stanovení součinitele zatopení pro přelivy se širokou korunou, u kterých je hodnota poměru t/P přibližně 3.



Obr. 7.1 Porovnání naměřených hodnot součinitele zatopení C_f ve vazbě na poměru (6.2) s ostatními autory



Obr. 7.2 Porovnání naměřených hodnot součinitele zatopení C_f v závislosti na h_f/h



Obr. 7.3 Porovnání vypočítaných hodnot součinitele zatopení C_f v závislosti na h_f/H

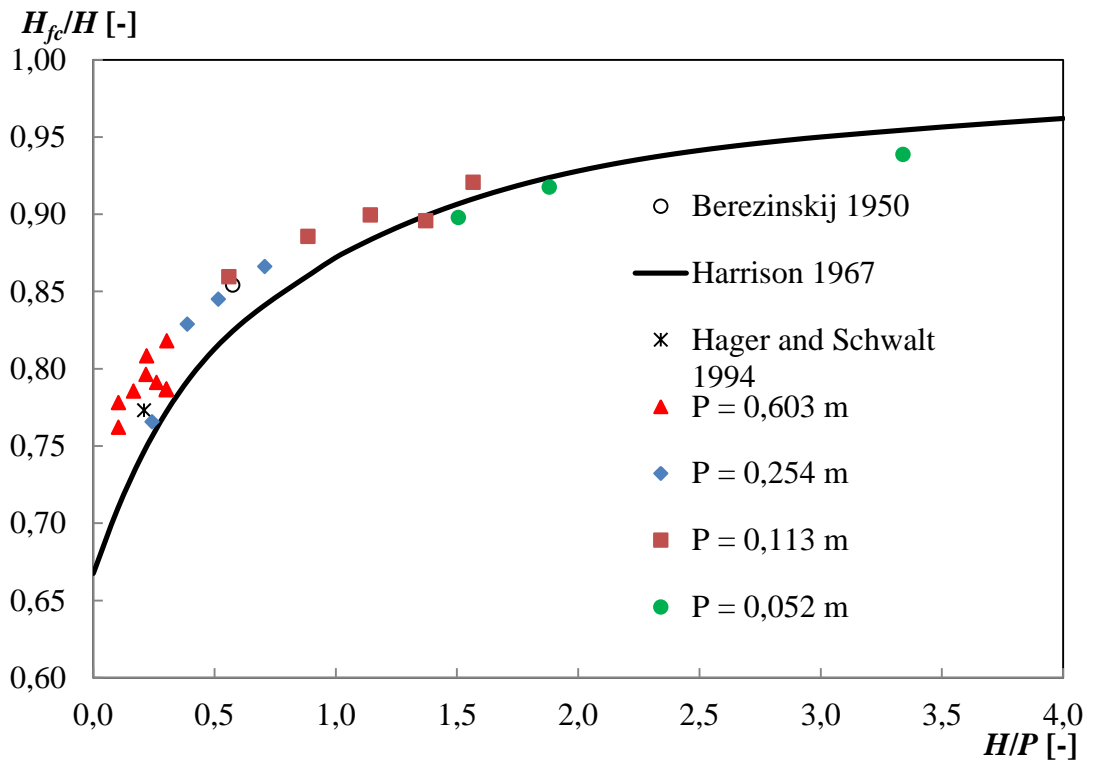
7.2 Porovnání mezní míry zatopení

Pro porovnání mezní míry zatopení byly použity hodnoty uváděné normou ČSN ISO 3846 [3] a výsledky měření autorů v kapitole 3, kteří uvádí hodnoty pro mezní míru zatopení. Porovnání je provedeno pro měřené hodnoty součinitele zatopení v rozmezí $0,98 \leq C_f < 1,0$, které se nachází v blízkosti mezní míry zatopení.

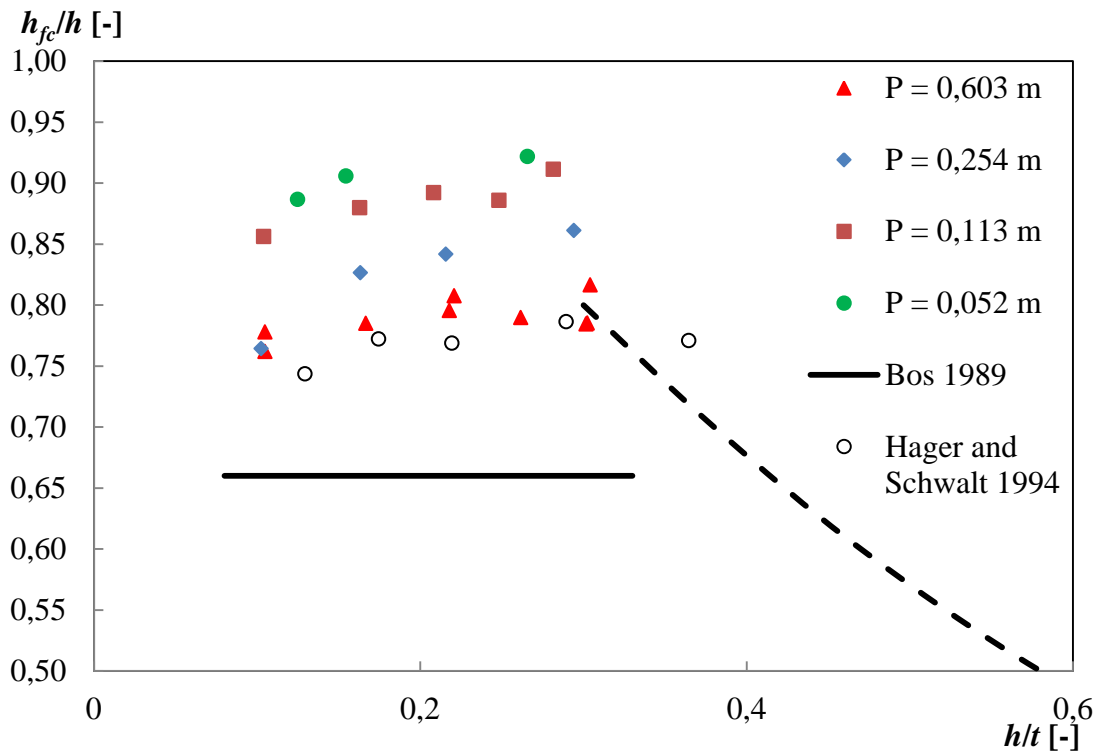
Porovnání hodnot mezní míry zatopení H_{fc}/H s autory Berezinskij [1], Harrison [6], Hager a Schwalt [5] je vyneseno v závislosti na H/P a zobrazeno na Obr. 7.4. Výsledné hodnoty byly vyneseny v rozsahu $0,0 \leq H/P \leq 4,0$ a $0,6 \leq H_{fc}/H \leq 1,0$. Pro hodnoty $H/P \leq 0,1$ se hodnoty mezní míry určené experimentálně od hodnot analyticky odvozených Harrisonem liší do 5%. To je zřejmě způsobeno vlivem vodního skoku. Hodnoty mezní míry zatopení autorů Berezinskij a Hager a Schwalt potvrzují pro uvažovaný rozsah C_f závislost vyjádřenou experimentem. Při porovnání bylo zjištěno, že mezní míra zatopení nastává při hodnotě $H_f/H \geq 0,75$ a že se zmenšující se výškou přelivu P nastává mezní míra zatopení při větších hodnotách H_f/H .

Z důvodu, že norma ČSN ISO 3846 uvádí mezní míru zatopení jako poměr h_{fc}/h v závislosti na poměru h/t , je provedeno porovnání s normou na Obr. 7.5. Hodnoty uváděné Bosem [2] jsou v grafu Obr. 7.5 vyjádřeny jako H/t v závislosti na poměru H_f/H . Protože Bos uvádí, že mezní míra zatopení pro přelivy se širokou korunou má hodnotu 0,66 a přitom nezáleží na výšce přelivu P , lze pro nekonečně vysoké přelivy zanedbat rychlostní výšky a závislost vyjádřit v Obr. 7.5. Hodnoty byly vyneseny v závislosti na poměru h/t a v rozsahu $0 \leq h/t \leq 0,6$ a $0,5 \leq h_{fc}/h \leq 1,0$. Závislost uvedená normou ČSN ISO 3846 je zcela odlišná od hodnot získaných experimentem. Výsledné hodnoty experimentu se pohybovaly v rozsahu $0,1 \leq h/t \leq 0,3$ a hodnoty uvedené normou byly $h/t \geq 0,3$. Důvodem této neshody hodnot je zřejmě to, že norma uvádí závislost mezní míry zatopení pouze na poměru h/t . Ve srovnání s Bosem nastává pro přelivy se širokou korunou podle naměřených hodnot mezní míra zatopení až při hodnotách $h_{fc}/h \geq 0,75$. Podle Obr. 7.5 je viditelné, že pro přelivy s nižší hodnotou P nastává mezní míra zatopení při vyšších hodnotách poměru h_{fc}/h . Z Obr. 7.5 tedy vyplývá, že určení mezní míry zatopení pro přelivy se širokou korunou podle Bose je vhodné, ale s určitou

rezervou, a určení podle normy ČSN ISO 3846 je z důvodu velké neshody hodnot nevhodné.



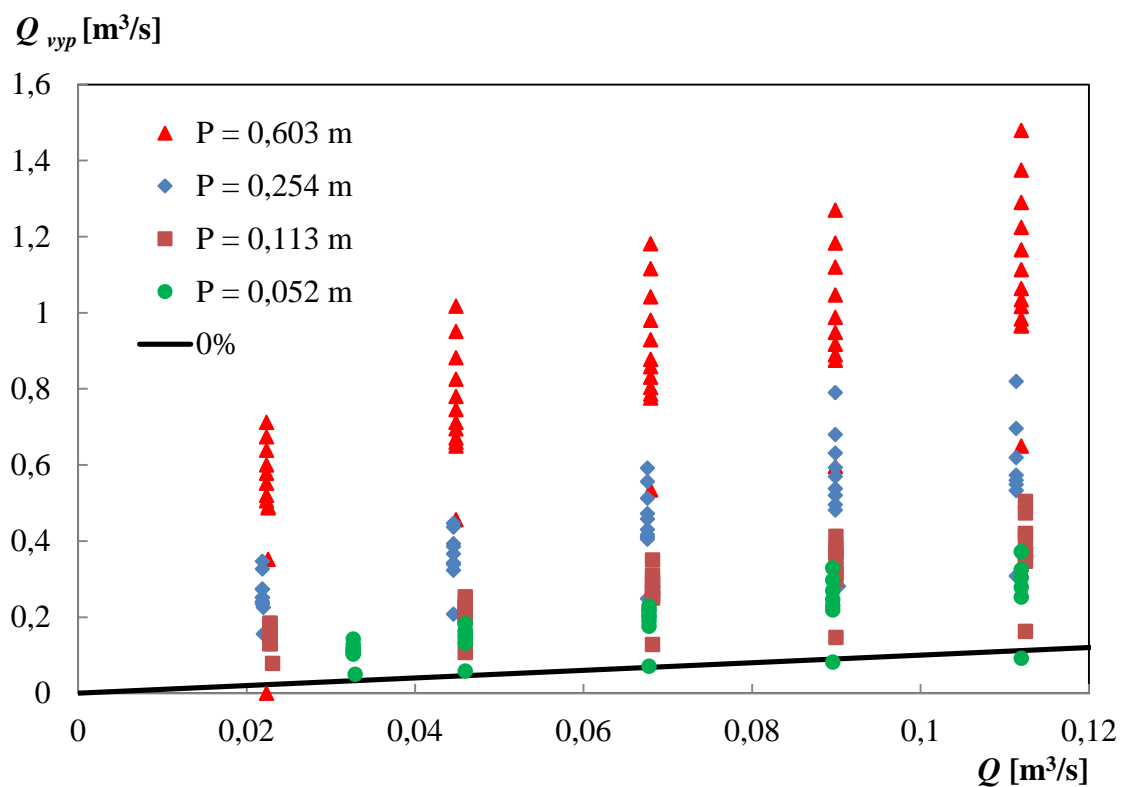
Obr. 7.4 Porovnání mezní míry zatopení v závislosti na H/P



Obr. 7.5 Porovnání mezní míry zatopení v závislosti na h/t

7.3 Porovnání průtoků

Pro porovnání byly použity průtoky stanovené z měření a hodnoty určené podle rovnic (3.41) a (3.43) podle autorů Skogerboe, Hyatt a Austin [10]. Porovnání je provedeno jako graf shody pro jednotlivé výšky přelivu P (Obr. 7.6). Hodnoty byly vyneseny v rozsahu $0 \leq Q \leq 0,12$ a $0 \leq Q_{\text{vyp}} \leq 1,6$. Z grafu (Obr. 7.6) je zřejmé, že hodnoty průtoků stanovené dle vztahů, které uvádějí autoři, jsou zcela odlišné od hodnot stanovených experimentem. Rozdíl v hodnotách je zřejmě způsobený proto, že při odvození rovnice průtoku není uvažováno s místními ztrátami a ztrátami po délce při proudění vody přes přeliv. Vzhledem k rozdílům porovnaných hodnot autor práce nedoporučuje použití tohoto odvození pro stanovení průtoku přes přeliv se širokou korunou.



Obr. 7.6 Porovnání průtoků Q stanovených z měření s vypočítanými průtoky Q_{vyp}

8. ZÁVĚR A ZHODNOCENÍ

Celkem bylo provedeno 193 měření pro pět průtoků o hodnotách $0,022 \text{ m}^3/\text{s}$, $0,046 \text{ m}^3/\text{s}$, $0,068 \text{ m}^3/\text{s}$, $0,09 \text{ m}^3/\text{s}$ a $0,112 \text{ m}^3/\text{s}$ a pro čtyři výšky přelivu P o výškách $0,603 \text{ m}$, $0,254 \text{ m}$, $0,113 \text{ m}$ a $0,052 \text{ m}$.

Přepadová výška h byla stanovena na základě měření rozdílu úrovně hladiny ve vzdálenosti $3 \cdot h$ až $4 \cdot h$ protiproudě od návodního líce přelivu, její hodnota se měnila v rozsahu od $0,061 \text{ m}$ do $0,285 \text{ m}$. Výška zatopení h_f byla stanovena na základě měření rozdílu úrovně hladiny v odtokovém korytě, její hodnota se měnila v rozsahu od $0,047 \text{ m}$ do $0,280 \text{ m}$. Průtok vody v měrném žlabu byl stanovený pomocí Thomsonova přelivu (Obr. 6.3).

Pro měřené hodnoty součinitele zatopení C_f byla vyjádřena závislost (6.7) na relativní výšce přelivu h/P a na podílu energetických výšek vztažených k mezní míře zatopení. Žádný z autorů a ani norma ČSN ISO 3846 [3] neuvádějí závislost součinitele zatopení na poměru h/P . Z tohoto důvodu byla stanovena nová závislost na tomto poměru. Rovnice (6.7) tedy uvádí závislost na poměru h/P a na mezní hodnotě energetické výšky zatopení. Tento vztah pro určení součinitele zatopení nízkých přelivů se širokou korunou je v dnešní době nejnovější a autor práce z důvodu spolehlivého odvození doporučuje jeho použití. Při použití odvození ostatních autorů by výsledné hodnoty součinitele zatopení pro nízké přelivy se širokou korunou nemusely být s dostatečnou přesností.

Hodnoty mezní míry zatopení byly vybrány pro součinitele zatopení v rozmezí $0,98 \leq C_f < 1,0$ a porovnány s ostatními autory. Pro vyhodnocení mezní míry zatopení bylo použito Harrisonovo [6] analytické odvození z důvodu jeho spolehlivosti, protože uvažuje vliv relativní výšky přelivu, kritické proudění na koruně přelivu a úroveň hladiny vody v odtokovém korytě. Při experimentu byla stanovena hodnota, při které dochází k ovlivnění proudění přes přeliv, a to při $H_f/H \geq 0,75$. Porovnáním je potvrzena správnost experimentálně stanovených hodnot mezní míry zatopení na poměru H/P . Porovnáním hodnot mezní míry zatopení v závislosti na relativní délce přelivu byla vyvrácena správnost závislosti uváděná normou ČSN ISO 3846.

V Brně dne 16. 1. 2015


.....

Bc. Jakub Major

9. SEZNAMY

9.1 SEZNAM VELIČIN

A	průtočný průřez	[m ²]
b	šířka přelivu	[m]
C	součinitel průtoku	[-]
C_D	součinitel průtoku vztažený k energetické přepadové výšce	[-]
C_f	součinitel zatopení	[-]
C_v	součinitel přítokové rychlosti	[-]
f	koeficient	[-]
F	hydrostatická síla	[N]
F_d	síla od povodního líce přelivu	[N]
F_k	tlaková síla při kritickém proudění	[N]
F_p	tlaková síla od povodního líce přelivu	[N]
F_u	síla od návodního líce přelivu	[N]
g	tíhové zrychlení	[m/s ²]
h	přepadová výška	[m]
H	energetická přepadová výška	[m]
h_d	hloubka vody v odtokovém korytě	[m]
h_f	výška zatopení	[m]
h_{fc}	mezní hodnota výšky zatopení	[m]
H_f	energetická výška zatopení	[m]
H_{fc}	mezní hodnota energetické výšky zatopení	[m]
h_k	kritická hloubka	[m]
h_{max}	maximální přepadová výška	[m]

k_1	koeficient	[-]
k_2	koeficient	[-]
k_3	koeficient	[-]
M_k	hybnost proudu při kritickém proudění	[N]
M_d	hybnost proudu v odtokovém korytě	[N]
P	výška přelivu	[m]
q	specifický průtok	[m ² /s]
Q	průtok	[m ³ /s]
Q_d	průtok při dokonalém přepadu v opačném směru	[m ³ /s]
Q_f	průtok při nedokonalém přepadu	[m ³ /s]
Q_i	průtok ideální kapaliny	[m ³ /s]
R^2	koeficient determinace	[-]
S_h	míra zatopení	[-]
S_H	energetická míra zatopení	[-]
t	tloušťka (délka) přelivu	[m]
v	průřezová rychlost	[m/s]
v_{ik}	kritická rychlost ideální kapaliny	[m/s]
Y	substituční veličina	[-]
α	součinitel kinetické energie	[-]
ρ	hustota vody	[kg/m ³]

9.2 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BEREZINSKIJ, A. R. *Carrying capacity of the broad-crested weir*. M.: VODGEO. Strojizdat, 1950 – 186 p.
- [2] BOS, M. G. *Discharge measurement structures*. Third revised edition. International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI, Wageningen, The Netherlands, 1989, ISBN: 90 70754 15 0.
- [3] ČSN ISO 3846. *Měření průtoků v otevřených korytech pomocí přelivů pravoúhlého průřezu se širokou korunou*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2012.
- [4] ČSN ISO 4362. *Měrné přelivy lichoběžníkového průřezu*. Praha: Český normalizační institut, 1995.
- [5] HAGER, W. H., SCHWALT, M. *Broad-Crested Weir*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE 120(1), 13-26, 1994. ISSN 0733-94375/94/0001.
- [6] HARRISON, A. J. M. *The Streamlined Broad-Crested Weir*. <http://www.icevirtuallibrary.com/content/article/10.1680/iicep.1967.8193?crawler=true&mimetype=application/pdf>. 1967.
- [7] KNĚBLOVÁ, M. *Analýza vlivu relativní výšky pravoúhlého přelivu se širokou korunou na součinitel průtoků*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb.
- [8] KOLÁŘ, V., PATOČKA, C., BÉM, J., *Hydraulika*. Praha: SNTL, Alfa. 1983.
- [9] MAJOR, J. *Vliv sklonu návodního líce přelivu se širokou korunou na součinitel průtoků*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013.
- [10] SKOGERBOE, G. V., HYATT, M. L., AUSTIN, L. H. *Design and Calibration of Submerged Open Channel Flow Measurement Structures: Part 4 – Weirs*. (1967). Reports. Paper 80.
- [11] TIM, U. S. *Characteristics of Some Hydraulics Structures Used for Flow Control and Measurement in Open Channels*. Ph.D Thesis, The Department of Civil Engineering. Concordia University, Montréal, Québec, Canada, 1986. ISBN 0-315-35522-2.

[12] VILLEMONTÉ, J. R. *Submerged-Weir Discharge Studies*. Engineering News-Record, 54 – 57, University of Wisconsin, Madison. 1947.

[13] ZACHOVAL, Z., ŠULC, J. *Rovnice stanovující průtok přes pravoúhlý obdélníkový přeliv se širokou korunou*. Symposium Hydrotechnikou Zborník Príspevkov. Bratislava, Slovenská technická univerzita v Bratislave. 2011. P. 207 – 213.

9.3 SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 Členění pravoúhlých přelivů dle relativní tloušťky a charakteru proudění. 2	
Tab. 3.1 Hodnoty součinitele zatopení C_f dle Pavlovského [1].....	7
Tab. 3.2 Změřené hodnoty součinitele zatopení C_f dle Villemonteho [12].....	8
Tab. 3.3 Hodnoty součinitele zatopení C_f dle Berezinského [1]	10
Tab. 3.4 Hodnoty h_f/h v závislosti na H/P dle Harrisona [6].....	13
Tab. 3.5 Hodnoty součinitele zatopení C_f v závislosti na poměru zatopení h_f/h pro ostrou návodní hranu dle Tima [11]	17
Tab. 3.6 Hodnoty poměru H_f/H při mezní míře zatopení pro zaoblenou návodní hranu dle Bose [2].....	18
Tab. 3.7 Hodnoty poměru H_f/H při mezní míře zatopení pro ostrou návodní hranu dle Bose [2].....	19
Tab. 3.8 Hodnoty součinitele zatopení C_f na $(h_f-h_{fc})/(H-h_{fc})$ dle Hagera a Schwalta [5].....	20
Tab. 3.9 Hodnoty mezní míry zatopení dle Hagera a Schwalta [5].....	21
Tab. 6.1 Měřené hodnoty pro přeliv o výšce $P=0,603$ m	43
Tab. 6.2 Měřené hodnoty pro přeliv o výšce $P=0,254$ m	44
Tab. 6.3 Měřené hodnoty pro přeliv o výšce $P=0,113$ m	45
Tab. 6.4 Měřené hodnoty pro přeliv o výšce $P=0,054$ m	46

9.4 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Jednotlivé typy přelivů: 1) Přeliv s dlouhou korunou, 2) Přeliv se širokou korunou, 3) Přeliv s krátkou korunou, 4) Přeliv s ostrou hranou	2
Obr. 1.2 Pravoúhlý přeliv se širokou korunou [3]	3
Obr. 1.3 Zatopený pravoúhlý přeliv se širokou korunou	4
Obr. 3.1 Průběh součinitele zatopení C_f dle Pavlovského [1]	6
Obr. 3.2 Průběh součinitele zatopení C_f dle Villemonteho [12]	8
Obr. 3.3 Průběh součinitele zatopení C_f dle Berezinského [1]	10
Obr. 3.4 Schéma přepadu přes přeliv se širokou korunou pro Harrisonovo odvození mezní míry zatopení [6]	11
Obr. 3.5 Průběh h_f/h v závislosti na H/P dle Harrisona [6]	13
Obr. 3.6 Vymezený objem kapaliny přelivu se širokou korunou [10]	14
Obr. 3.7 Průběh součinitele zatopení C_f v závislosti na poměru zatopení h_f/h pro ostrou návodní hranu dle Tima [11]	17
Obr. 3.8 Průběh poměru H_f/H při mezní míře zatopení pro zaoblenou návodní hranu dle Bose [2]	18
Obr. 3.9 Průběh poměru H_f/H při mezní míře zatopení pro ostrou návodní hranu dle Bose [2]	19
Obr. 3.10 Průběh součinitele zatopení C_f na $(h_f-h_{fc})/(H-h_{fc})$ dle Hagera a Schwalta [5]	20
Obr. 3.11 Průběh mezní míry zatopení dle Hagera a Schwalta [5]	21
Obr. 3.12 Mezní míra zatopení dle ČSN ISO 3846 [3]	22
Obr. 4.1 Schéma přepadu přes pravoúhlý přeliv se širokou korunou [13]	23
Obr. 4.2 Součinitel přítokové rychlosti C_v [4]	26
Obr. 5.1 Schéma nedokonalého přepadu přes zatopený přeliv se širokou korunou	27
Obr. 6.1 Schéma umístění přelivu v měrném žlabu	30
Obr. 6.2 Měrný žlab	31
Obr. 6.3 Thomsonův přeliv	32
Obr. 6.4 Žaluziová hradicí konstrukce	32
Obr. 6.5 Hrotové měřidlo	34
Obr. 6.6 Ultrazvuková sonda	34
Obr. 6.7 Přeliv se širokou korunou o výšce 0,603 m	35
Obr. 6.8 Mezní míra zatopení na přelivu o výšce 0,603 m	35

Obr. 6.9 Proudění přes přeliv o výšce 0,603 m	36
Obr. 6.10 Plně zatopení přeliv se širokou korunou o výšce 0,603 m	36
Obr. 6.11 Přeliv se širokou korunou o výšce 0,254 m.....	37
Obr. 6.12 Mezní míra zatopení na přelivu o výšce 0,254 m.....	37
Obr. 6.13 Plně zatopený přeliv se širokou korunou o výšce 0,254 m	38
Obr. 6.14 Přeliv se širokou korunou o výšce 0,113 m.....	38
Obr. 6.15 Mezní míra zatopení na přelivu se širokou korunou o výšce 0,113 m	39
Obr. 6.16 Plně zatopený přeliv se širokou korunou o výšce 0,113 m	39
Obr. 6.17 Přeliv se širokou korunou o výšce 0,052 m.....	40
Obr. 6.18 Mezní míra zatopení přelivu se širokou korunou o výšce 0,052 m.....	40
Obr. 6.19 Plně zatopený přeliv se širokou korunou o výšce 0,052 m	41
Obr. 6.20 Součinitel zatopení C_f v závislosti na H , H_f , H_{fc} a poměru h/P	47
Obr. 6.21 Graf shody naměřených a vypočítaných hodnot součinitele zatopení C_f	48
Obr. 7.1 Porovnání naměřených hodnot součinitele zatopení C_f ve vazbě na poměru (6.2) s ostatními autory	51
Obr. 7.2 Porovnání naměřených hodnot součinitele zatopení C_f v závislosti na h_f/h	52
Obr. 7.3 Porovnání vypočítaných hodnot součinitele zatopení C_f v závislosti na h_f/h	53
Obr. 7.4 Porovnání mezní míry zatopení v závislosti na H/P	55
Obr. 7.5 Porovnání mezní míry zatopení v závislosti na h/t	55
Obr. 7.6 Porovnání průtoků Q stanovených z měření s vypočítanými průtoky Q_{vyp}	56