

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra hydrauliky a hydrologie



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zatopený přepad přes širokou korunu

Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby  
Vedoucí práce: Ing. Tomáš Pícek, Ph.D.  
Autor: Martin Flaks

Praha 2019



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Flaks Jméno: Martin Osobní číslo: 423077  
Zadávací katedra: Katedra hydrauliky a hydrologie  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Zatopený přepad přes širokou korunu  
Název diplomové práce anglicky: Submerged Broad-crested Weir

Pokyny pro vypracování:

Proveďte literární rešerši problematiky hydraulického výpočtu zatopeného přepadu přes širokou korunu včetně aplikací využívající tento typ hydraulického výpočtu. Jednotlivé způsoby výpočtu porovnejte a posuďte vhodnost jejich použití při různých hydraulických podmínkách. V případě potřeby proveďte vlastní ověřovací pokusy na fyzikálním modelu v hydraulické laboratoři Fakulty stavební.

Seznam doporučené literatury:

HAGER, W. H. (1994). "Broad-crested Weir", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol.120, Issue 1, pp. 13-26

Masiar, E., Kamenský, J. (1985) "Hydraulika pre stavebných inžinierov I", Alfa, Bratislava

NIKOLOV, N. A. et al. (1978). "Hydraulic Calculation of Submerged Broad-crested Weir", Hydrotechnical Construction, Vol. 12, Issue 6, pp. 631-634

AGROSKIN, I. I., DMITRIJEV, G. G., PIKALOV, F. I. (1954). „Hydraulika“, GEI, Moskva, Leningrad.

PATOČKA, C. (1965) „Hydraulika - 1. část“, Učební texty vysokých škol - skripta, SNTL, Praha

PATOČKA, C. (1966) „Hydraulika - 2. část“, Učební texty vysokých škol - skripta, SNTL, Praha

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Tomáš Píček, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 5. 10. 2018 Termín odevzdání diplomové práce: 6. 1. 2019  
*Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku*

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Tomáše Pícky, Ph.D. a čerpal jsem pouze z podkladů uvedených na konci této práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne 6. 1. 2019

Martin Flaks .....

## **Anotace**

Tato Diplomová práce se zabývá nedokonalým (zatopeným) přepadem přes širokou korunu v obdélníkovém korytě. Práce se věnuje současným metodám výpočtu nedokonalého přepadu při různých průtocích a stavech vody za přelivem. V práci jsou prezentována měření na fyzikálním modelu pro posouzení těchto metod. Další součástí práce je posouzení počátku zatápění široké koruny a popis problematiky úplavu za korunou. V závěru práce jsou obsaženy návrhy a posouzení jiných přístupů k výpočtu zatopeného přepadu.

## **Klíčová slova**

Široká koruna, zatopený přepad, nedokonalý přepad, posouzení metod výpočtu nedokonalého přepadu, úplav za korunou, součinitel zatopení, věta o hybnosti proudu kapalin

## **Annotation**

This Master's thesis is focused on submerged broad-crested weir in rectangular manger. The work pursues contemporary methods of calculation of submerged broad-crested weir with different flows and water surface levels under the weir. There are presented measurements on physical model for an assessment of these methods. Next there is assessment of a beginning of a submerged weir and description of problematics of separation zone under the weir. At the end of the thesis there are designs and assessments of different approaches for calculation of submerged broad-crested weir.

## **Key words**

Broad-crested weir, submerged broad-crested weir, contemporary methods of calculation of submerged broad-crested weir, recirculation area under the weir, Impulse – momentum equation

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval Ing. Tomáši Pickovi, Ph.D. za výborné konzultace a odbornou pomoc při vypracování mé diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval mým rodičům, M.D. a Z.V. za jejich podporu a pomoc.

# Obsah

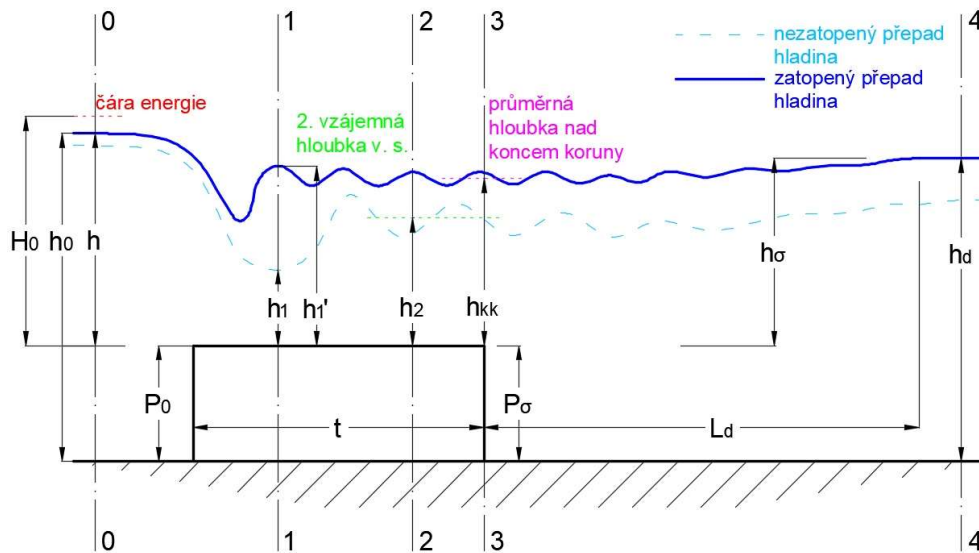
Anotace .....	1
Klíčová slova .....	1
Annotation .....	1
Key words .....	1
Poděkování.....	2
Obsah .....	3
1. Úvod .....	4
2. Rešerše nedokonalého přepadu přes širokou korunu .....	5
2.1. Definice nedokonalého přepadu.....	5
2.2. Základní rovnice pro výpočet dokonalého přepadu .....	6
2.3. Základní rovnice pro výpočet nedokonalého přepadu .....	8
3. Měření na fyzikálním modelu .....	11
3.1. Nastavení průtoku a měřicí nástroje.....	12
3.2. Posouzení chyb měření .....	14
3.3. Výsledky měření .....	14
4. Vyhodnocení měření.....	19
4.1. Obecné postřehy .....	19
4.2. Ověření zatápění přelivu .....	20
4.3. Ověření 1. rovnice zatopeného přepadu .....	22
4.4. Ověření 2. rovnice zatopeného přepadu .....	25
4.5. Problematika úplavu za korunou .....	32
4.6. Další možná řešení .....	35
4.6.1. Výpočet výšky přepadu za pomoci jetu v profilu 1-1 .....	35
4.6.2. Výpočet přepadové výšky z profilu 3-3 .....	40
4.7. Posouzení všech metod.....	42
5. Závěr.....	46
Seznam použité literatury .....	49
Seznam symbolů .....	51

# 1. Úvod

Práce se věnuje nedokonalému přepadu přes širokou korunu. Široká koruna je specifický typ přelivu. Díky její délce se na ní mohou vytvářet různé hydraulické jevy včetně vodního skoku. Nedokonalý přepad je dalším specifickým jevem, kdy hladina dolní vody dosahuje takové hloubky, že již začíná ovlivňovat přepadové výšky před korunou. Pro hydraulické řešení zatopeného přepadu existují různé metody, nikde ale nejsou jednoznačně uvedena kritéria vhodnosti použití těchto metod.

Úvodní část práce je věnována rešerši zatopeného přepadu přes širokou korunu. Přesněji určení počátku zatápnění přepadu, metody pro výpočet dokonalého a v návaznosti nedokonalého přepadu. Pro možnost posouzení těchto metod je provedeno měření na fyzikálním modelu. Následně se věnuji jednotlivým výpočtům pro nedokonalý přepad a jeho zatápnění. Zde posuzuji dvě základní rovnice přepadu a zkoumám jejich použitelnost. V dalších kapitolách se snažím popsat úplav za korunou, jež má vliv na průběh hladiny. Dále je věnována pozornost případným novým přístupům k řešení nedokonalého přepadu, do značné míry založených na aplikaci věty o hybnosti proudu kapalin. V závěru práce se věnuji posouzení vhodnosti využití výše zmíněných metod.

## 2. Rešerše nedokonalého přepadu přes širokou korunu



Obrázek 1 Vzorové schéma pro podélný řez nedokonalým přepadem přes širokou korunu

Pro vyjádření veličin v rovnicích či grafech bude brán Obrázek 1 jako referenční. Toto je třeba, neboť značení v průběhu let nebylo unifikované, a budou použity skeny průběhů hladin ze skript.

### 2.1. Definice nedokonalého přepadu

Nedokonalý přepad nastává v okamžiku, kdy hladina vody za přepadem (dolní voda) vystoupá nad korunu do takové míry, že pro zachování přepadové výšky by bylo třeba zmenšit hodnotu průtoku, respektive při daném průtoku dojde ke zvýšení hladiny před přelivem.

Dle literatury [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9] k tomu dochází v případě, kdy úroveň hladiny v dolním korytě (v profilu 4-4) s hloubkou  $h_d$  dle obrázku 1 dosáhne větší výšky než hladina druhé vzájemné hloubky  $h_2$  přilehlého vodního skoku. Tím začne být ovlivněna první vzájemná hloubka  $h_1$ . Tedy:

$$h_d > h_2 + P_\sigma \quad (2.1)$$

Respektive:

$$h_\sigma > h_2 \quad (2.2)$$

Kde:  $h_d$  – hloubka vody v korytě za přelivem [m]  
 $h_2$  – druhá vzájemná hloubka vodního skoku na koruně [m]  
 $P_\sigma$  – výška zadní části koruny [m]  
 $h_\sigma$  – výška hladiny v korytě za přepadem na úrovni koruny přelivu [m]

Některé zdroje [2], [4], [9], [10], [11] také upravují rovnice (2.1) a (2.2) součinitelem kontrakce pro 2. vzájemnou hloubku vodního skoku  $\varepsilon_2$ . Přičemž oba součinitele pro první a druhou vzájemnou hloubku vodního skoku nad korunou jsou vyjádřeny:



$$\varepsilon_1 = \frac{h_1}{H_0} ; \varepsilon_2 = \frac{h_2}{H_0} \quad (2.3)$$

$H_0$  je přepadová výška hladiny navýšena o rychlostní výšku.

$$H_0 = h + \frac{\alpha v_0^2}{2g} \quad (2.4)$$

Kde:  $H_0$  – energetická přepadová výška [m]  
 $h$  – přepadová výška [m]  
 $h_1, h_2$  – hloubka v daném profilu [m]  
 $v_0$  – střední průřezová rychlost v daném profilu [m/s]  
 $g$  – konstanta gravitačního zrychlení [m/s<sup>2</sup>]  
 $\alpha$  – Coriolosovo číslo, neboli součinitel kinetické energie [-]  
 $\frac{\alpha v^2}{2g}$  – rychlostní výška [m]

Kritérium pro určení zatopeného přepadu lze dle literatury tedy vyjádřit:

$$h_\sigma > \varepsilon_2 H_0 \quad (2.5)$$

Příčemž Argoskin [8] určil tabulkové hodnoty (Tabulka 1) pro jednotlivé součinitele kontrakce v závislosti na tvaru nátokové hrany. Ty se pro  $\varepsilon_2$  pohybují od velmi dobře zaoblené vstupní hrany  $\varepsilon_2 = 0,73$  až po hranu ostrou s mimořádně drsným prahem  $\varepsilon_2 = 0,83$ . Tudíž byla rovnice pro určení zatopeného přepadu v některé literatuře také zjednodušena na:

$$h_\sigma > (0,7 \text{ až } 0,8)H_0 \quad (2.6)$$

[2], [4], [9]

Problém s rovnicí (2.3) a (2.4) by mohl nastat z důvodu využití součinitele kontrakce  $\varepsilon_2$ . Jak uvádím ve své bakalářské práci [12], pokud tento součinitel není vypočten z naměřených hodnot, tak je brán z Agroskinovy tabulky, (Tabulka 1) ve které vyplývá ze zkrácené rovnice pro vlnovitý vodní skok. Tato rovnice ovšem postrádá některé zásadní parametry, a tudíž nedává korektní hodnoty veličiny  $\varepsilon_2$ . Pro přesnější určení zda-li rovnice odpovídají, bude třeba provést vlastní měření.

## 2.2. Základní rovnice pro výpočet dokonalého přepadu

V odborné literatuře v zásadě existují dva způsoby pro výpočet zatopeného přepadu přes širokou korunu. Oba dva způsoby vyplývají z Bernoulliho rovnice aplikované pro nezatopený přepad v profilech 0-0 a 1-1. Proto je vhodné uvést výpočet nezatopeného přepadu jako první. Téma nezatopeného přepadu jsem obsáhl ve své bakalářské práci, a proto využiji popsany postup z ní [12]:

$$h + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} = h_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + Z \quad (2.7)$$

Kde:  $\alpha$  – Coriolosovo číslo, neboli součinitel kinetické energie [-]  
 Uvažujme že  $\alpha_0 = \alpha_1 = 1$ .

Poslední veličinou je  $Z$ , která reprezentuje ztrátu mechanické energie proudu z důvodu úplavu a odporů způsobených zúžením průřezu [11]. V této práci se nezabýváme boční kontrakcí tudíž uvažujeme pouze s vertikálním snížením průtočného pole způsobeným přelivem samotným. Ztráty lze vyjádřit tímto způsobem:

$$Z = \Sigma \xi \frac{v_1^2}{2g} \quad (2.8)$$

Kde:  $\Sigma \xi$  – suma součinitelů místních ztrát

V tento moment lze do Bernoulliho rovnice implementovat rovnice (2.8) a (2.4).

$$H_0 = h_1 + \frac{\alpha v_1^2}{2g} + \Sigma \xi \frac{v_1^2}{2g} \quad (2.9)$$

Z toho jednoduchou úpravou vyjádříme pro  $v_1$ :

$$v_1 = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi}} \sqrt{2g(H_0 - h_1)} \quad (2.10)$$

To lze vyjádřit jako:

$$v_1 = \varphi \sqrt{2g(H_0 - h_1)} \quad (2.11)$$

Kde:  $\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi}}$  – součinitel rychlosti [-]

Součinitel  $\varphi$  je dle Argoskina [8] závislý, stejně tak jako součinitele kontrakce  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ , především na tvaru nátokové hrany. Tato závislost je dána tabulkou, která byla lehce poopravena v mé bakalářské práci.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m	0.385	0.379	0.370	0.360	0.350	0.339	0.330	0.319	0.309	0.298
$\varphi$	1.000	0.987	0.968	0.951	0.936	0.923	0.912	0.900	0.891	0.881
m/ $\varphi$	0.385	0.384	0.382	0.378	0.373	0.368	0.362	0.354	0.347	0.339
$\varepsilon_1$	0.667	0.649	0.621	0.594	0.569	0.545	0.525	0.501	0.483	0.462
$\varepsilon_2$	0.667	0.684	0.710	0.734	0.756	0.775	0.791	0.808	0.821	0.836

Tabulka 1 – Upravená tabulka Argoskina [8], [12], Kde: **1** – přepad beze ztrát (nereálný případ), **4** – vstupní část dobře zaoblená, **5** – zaoblená vstupní hrana, **7** – seříznutá vstupní hrana, **8** – ostrá vstupní hrana, **10** – práh mimořádně drsný

Dále lze do rovnice (2.11) aplikovat rovnici spjitosti pro obdélníkové koryto, která zní:

$$Q = v_i \cdot S_i = v_i \cdot b \cdot h_i = konst. \quad (2.12)$$

Kde:  $Q$  – průtok [ $m^3/s$ ]

$S_i$  – průtočná plocha daného profilu [ $m^2$ ]

$b$  – konstantní šířka koryta [m]

$h_i$  – výška hladiny vody v daném profilu [m]

Tudíž z rovnic (2.11) a (2.12) lze vyjádřit první vztah pro výpočet průtoku dokonalého přepadu přes širokou korunu:

$$Q = \varphi \cdot b \cdot h_1 \sqrt{2g(H_0 - h_1)} \quad (2.13)$$

Nyní zavedeme součinitel kontrakce pro první vzájemnou hloubku z rovnice (2.3):

$$Q = \varphi \cdot b \cdot \varepsilon_1 \cdot H_0 \sqrt{2g(H_0 - \varepsilon_1 \cdot H_0)} = \varphi \cdot \varepsilon_1 \sqrt{1 - \varepsilon_1} \cdot b \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2} \quad (2.14)$$

Dále složky  $\varepsilon_1$  a  $\varphi$  zavedeme pod jednotný součinitel  $m$ , a tím dostaneme druhou základní rovnici nezatopeného přepadu:

$$Q = mb\sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2} \quad (2.15)$$

Kde:  $m = \varphi \cdot \varepsilon_1 \sqrt{1 - \varepsilon_1}$  – součinitel přepadu [-]

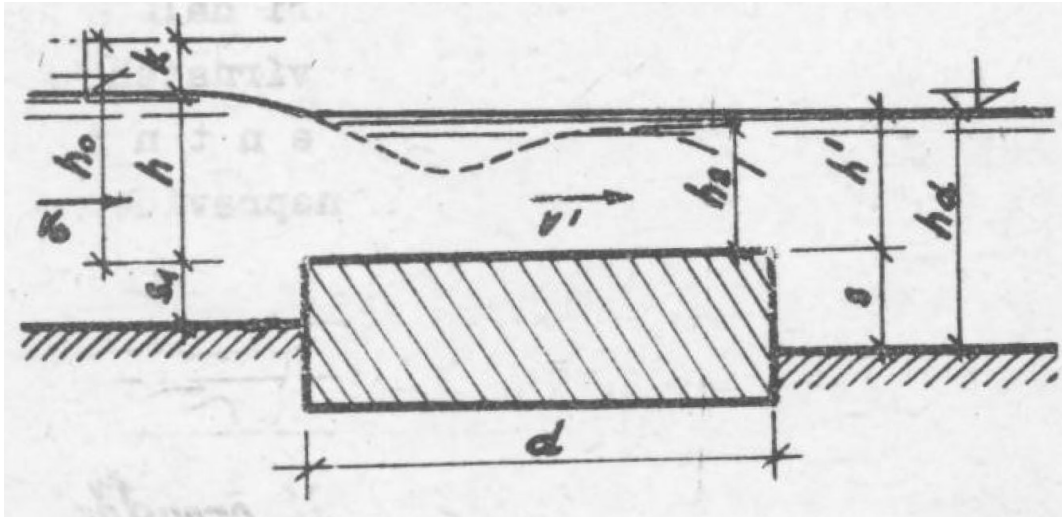
### 2.3. Základní rovnice pro výpočet nedokonalého přepadu

První rovnice pro zatopený přepad je alterací rovnice (2.13). Na místo  $h_1$  je použito  $h_\sigma$ . Rovnice zní:

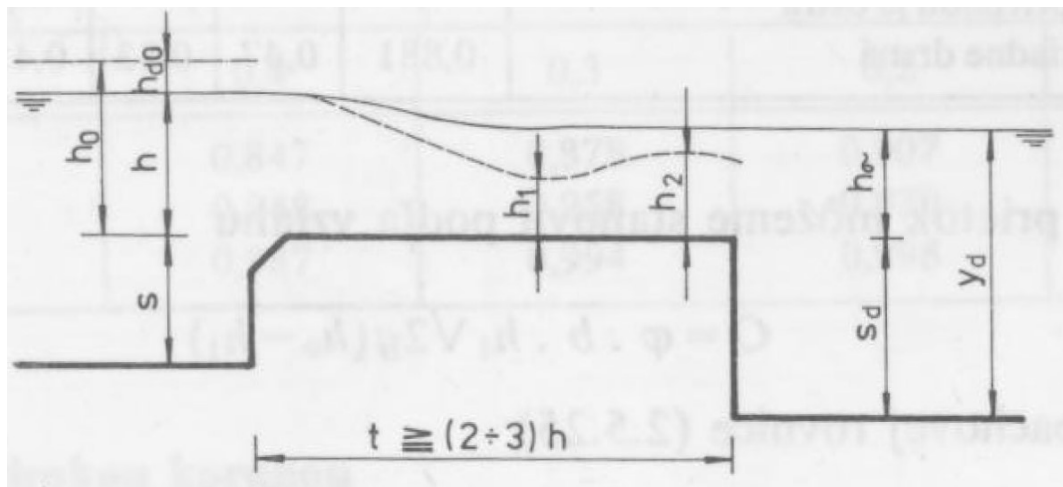
$$Q = \varphi \cdot b \cdot h_\sigma \sqrt{2g(H_0 - h_\sigma)} \quad (2.16)$$

[1], [2], [3], [4], [5], [6], [8], [9], [10], [11], [13]

Tato rovnice vznikla za předpokladu, že při zatopení přepadu se hladina dolní vody dostane nad první vzájemnou hloubku v profilu 1-1, přičemž hladina dolní vody prochází nad korunou vodorovně. Tím by se dala aplikovat upravená Bernoulliho rovnice (2.16) pro profily 0-0 a 1-1. To je patrné z vykreslení uvedeném například Bémem nebo Mäsiarem viz. Obrázek 2 a Obrázek 3.



Obrázek 2 Vykreslení průběhu hladiny zatopeného přepadu Bém, Bémová, Patočka (1963) [6]



Obrázek 3 Vykreslení průběhu hladiny zatopeného přepadu Mäsiar, Kamenský (1985) [3]

Předpoklad vodorovné hladiny dolní vody přicházející až do profilu 1-1 je v zásadě důležitý pro zachování hodnot součinitele rychlosti  $\varphi$ . Tento součinitel by měl být dle skript použit z Agroskinovy tabulky pro nezatopený přeliv (Tabulka 1), což je doslovně řečeno v této literatuře: [5], [6], [11]. V ostatních podkladech není implikováno, že by tomu mělo být jinak. Pokud by totiž byla použita Bernoulliho rovnice například mezi profily 0-0 a 3-3, tak by se samozřejmě součinitel  $\varphi$  musel snižovat z důvodu navýšení ztrát vlivem hydraulických jevů nad korunou přelivu.

Otázkou ovšem zůstává, zda-li součinitel  $\varphi$  bude konstantní s narůstající hloubkou dolní vody i v případě, kdy je hladina dolní vody přímo napojená na paprsek přelivu. Pokud se bude zvyšovat vlivem dolní vody přepadová výška, bude se zmenšovat relativní velikost úplavu na koruně v porovnání s velikostí průtočného profilu. Tudíž by měl úplav reprezentovat s navyšující se hladinou menší energetickou ztrátu. Navíc dle Zachovala [14], je i úplav před čelem koruny, jež Zachoval nazývá návodní recirkulační oblast, závislý na relativní výšce přelivu. Přičemž při zvyšování dolní vody, a tím následné navýšování vody před přelivem, by se měl úplav pomalu ztrácet. To by také mělo mít vliv na rychlostní součinitel  $\varphi$ .

Zásadní poznámkou v literatuře je, že tento typ výpočtu (2.16) by se měl použít při větších výškách zatopení [4], [9], [2]. Tato poznámka se ovšem vyskytuje pouze ve třech učebnicích. Toto kritérium se zdá být důležité z toho důvodu, že mechanická energie na konci přilehlého vodního skoku je výrazně menší než na jeho začátku. Proto pokud bychom v Bernoulliho rovnici pro profil 0-0 a 1-1 nahradily pravou stranu původně reprezentující první vzájemnou hloubku vodního skoku hodnotami na konci vodního skoku, tak by při stejném součiniteli rychlosti  $\varphi$  muselo dojít ke snížení hladiny před přelivem (profil 0-0). Toto by ovšem naprosto odporovalo konceptu zatápění přepadu. Případným vysvětlením by byla existence rychlejšího proudu s užším paprskem pod hladinou způsobená přepadovou výškou hladin. Podobně jak je tomu při zatopeném výtoku pod stavidlem. (Nazýváme tento jev zúženého proudu v průběhu práce anglickým výrazem "jet".)

Druhá rovnice pro výpočet zatopeného přeřadu vyplývá z rovnice (2.15) a zní:

$$Q = \sigma \cdot m \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2} \quad (2.17)$$

[1], [2], [3], [4], [7], [8], [10], [13]

Kde:  $\sigma$  – součinitel zatopení [-]

Přičemž se někdy používají substituce pro určité veličiny této rovnice jako:

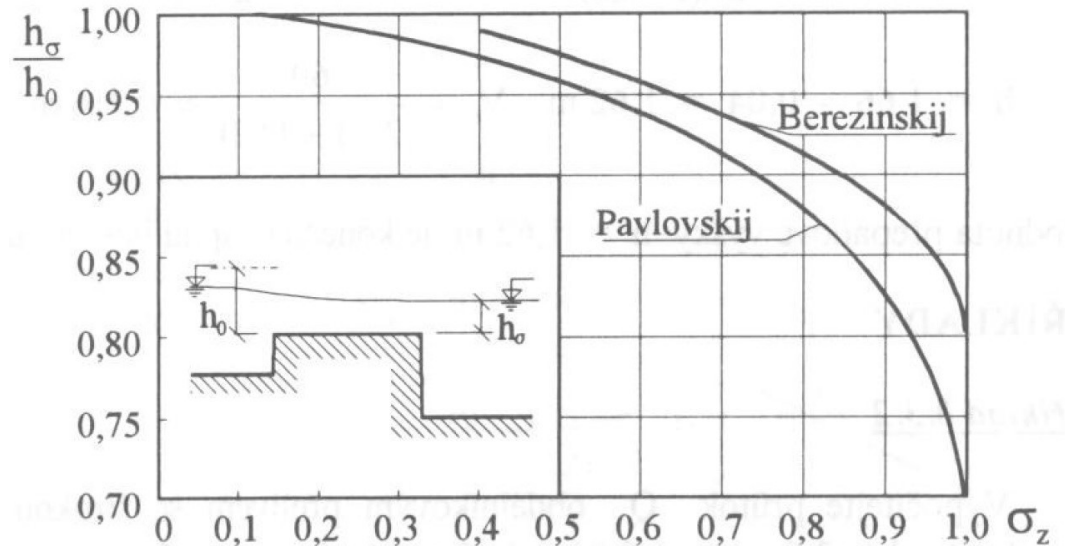
$$M = m \cdot \sqrt{2g}; m = \frac{2}{3} \mu_p \quad (2.18)$$

Rovnice (2.17) je v podstatě rovnicí (2.15) pouze rozšířena o součinitel zatopení  $\sigma$ . Ten je graficky odečten od hodnoty poměru energetické přeřadové výšky a výškou dolní vody nad korunou.

$$\frac{h_\sigma}{H_0} \rightarrow \sigma \quad (2.19)$$

[1], [2], [3], [4], [7], [10],

Existují dva průběhy křivky  $\sigma$ . Jeden průběh vytvořil Palovskij a druhý Berezinskij viz.: Obrázek 4.



Obrázek 4 Grafické vyjádření součinitele zatopení  $\sigma$  [1], [3], [10]

V několika skriptech je aproximován průběh křivky od Pavlovského rovnicí. Její omezující podmínky jsou stanoveny  $0,7 < \frac{h_\sigma}{H_0} < ,98$ .

$$\sigma = 4,147 - 17,3449 \frac{h_\sigma}{H_0} + 29,7929 \left( \frac{h_\sigma}{H_0} \right)^2 - 16,3881 \left( \frac{h_\sigma}{H_0} \right)^3 \quad (2.20)$$

[2], [4]

Korektnost křivek a rovnice pro určení součinitele zatopení  $\sigma$  bude třeba ověřit na fyzikálním modelu.

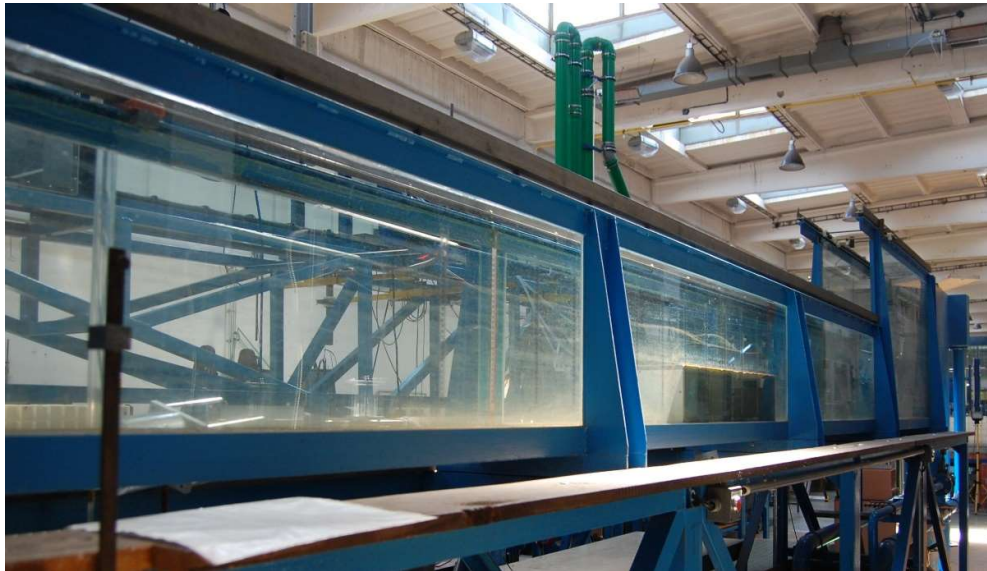
Poslední doposud nezmíněnou výtka by měla být nedostatečná specifikace hladiny dolní vody. Jak bylo zjištěno z mého měření v bakalářské práci [12]: Z důvodu rozšíření průtočného profilu vlivem úplavu za korunou, se postupně zvedá hladina dolní vody. Ta je ovšem ve všech podkladech znázorněna vodorovná. Tím pádem neexistuje adekvátní popis, s jakou úrovní dolní

vody se má počítat. Respektive v jaké vzdálenosti od konce koruny se má výška dolní vody odečíst. Tento jev má vliv na všechny rovnice a jevy popsané v kapitole 2.3. a bude jej třeba vyřešit za pomoci měření na fyzikálním modelu.

### 3. Měření na fyzikálním modelu

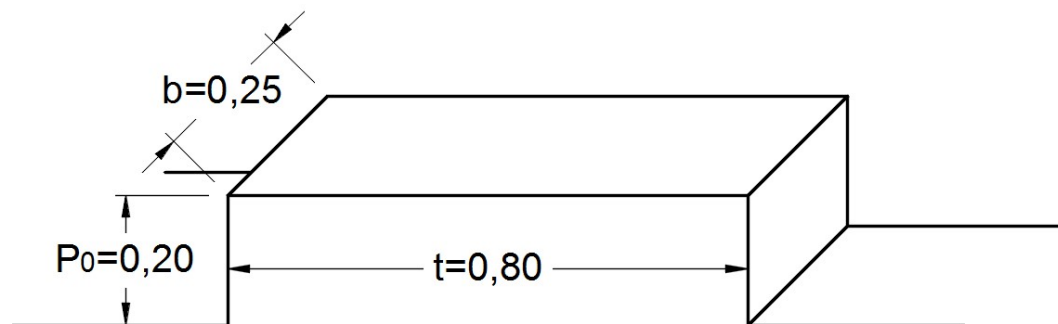
Měření byla prováděna na totožném fyzikálním modelu jako v mé bakalářské práci [12]. Proto jeho popis využiji.

Měření bylo provedeno na žlabu obdélníkového průřezu. Šířka žlabu je  $b=0,251\text{ m}$ . Stěny žlabu jsou zhotoveny z průhledného skla.



Obrázek 5 Měrný žlab

Přeliv byl vyroben z PVC a zasazen a upevněn do žlabu.



Obrázek 6 Rozměry široké koruny použité pro měření [m]

Navyšování dolní vody  $h_o$  bylo docíleno za pomoci posunu dvou na sobě přilehlých desek s otvory viz. Obrázek 7. Tyto desky se při regulaci začaly překrývat a hladina spodní vody byla navýšena.



Obrázek 7 Regulace odtoku (vlevo) , uchytení široké koruny ve žlabu (vpravo)

### 3.1. Nastavení průtoku a měřící nástroje

Voda byla do žlabu čerpána odstředivým čerpadlem. Pro nastavení prvotní požadované hladiny  $h$  bylo zapotřebí velmi jemné regulace přítoku do žlabu. Toho bylo docíleno manipulací větším šoupětem a menším jemným ventilem, který byl využit k doladění průtoků na požadované hodnoty. Výška přepadové hladiny byla přeměřena v doporučené vodorovné vzdálenosti 3~4h od nátokové hrany přelivu [15]. Následně byl změřen průtok, který byl čerpán do žlabu. Proběhla dvě měření průtoku. První z nich bylo naměřeno objemovou metodou za pomoci indukčního průtokoměru umístěného na vtokovém potrubí do žlabu. Druhý průtok byl naměřen na Thomsonovu měřném ostrohranném přelivu umístěném za odtokem ze žlabu. Výsledný průtok byl uvažován jako průměr z takto naměřených průtoků.

Při navyšování hladin dolní vody byla snaha zachovat jednotný průtok z důvodu korelace mezi naměřenými hladinami. K tomu bylo potřeba postupné doladování průtoků z důvodu úbytku vody z čerpané nádrže vlivem plnění žlabu vodou, a tím rozdílné výtlačné výšky čerpadla.



Obrázek 8 Ventily s osazeným průtokoměrem (vlevo) , Vyhodnocovací jednotka průtokoměru (uprostřed) , Thomsonův přeliv (vpravo)



K ustálení proudu a rovnoměrnosti nátoky slouží dva děrované plechy, za kterými jsou osazeny voštiny. Na hladině byla také umístěna polystyrenová deska sloužící k ustálení hladiny. Výška hladiny přepadu byla měřena v ose žlabu hrotovým měřítkem s přesností odečtu na desetiny milimetru. Vzhledem k rozvlnění hladiny byla využita pomůcka nazvaná Elinka-001. Toto zařízení bylo uchyceno na jednom konci k hrotovému měřítku a druhý konec byl spojen s vodou ve žlabu. Zařízení měří dobu propojení elektrického proudu mezi konektory (hrot ve styku s hladinou) a dobu, kdy nejsou propojeny (hrot není ve styku s hladinou). Tyto dvě hodnoty jsou v zařízení průměrovány v závislosti na čase a ukazují průměrnou hodnotu. Tímto lze objektivně odečíst průměrnou výšku rozkolísané hladiny.



*Obrázek 9 Hrotové měřítko (vlevo) , Elinka-001 (vpravo)*

Poslední pomůckou byla provrtaná kovová tyčka malého průměru, ke které byly po její výšce připevněny ústřížky bavlnky. Tyto bavlnky byly využity k orientační identifikaci úplavů, jejich rozměrů a tvarů.





Obrázek 10 Znárodnění úplavu nad korunou (vlevo), před korunou (uprostřed), za korunou (vpravo)

### 3.2. Posouzení chyb měření

Při měření mohlo dojít k těmto hlavním chybám:

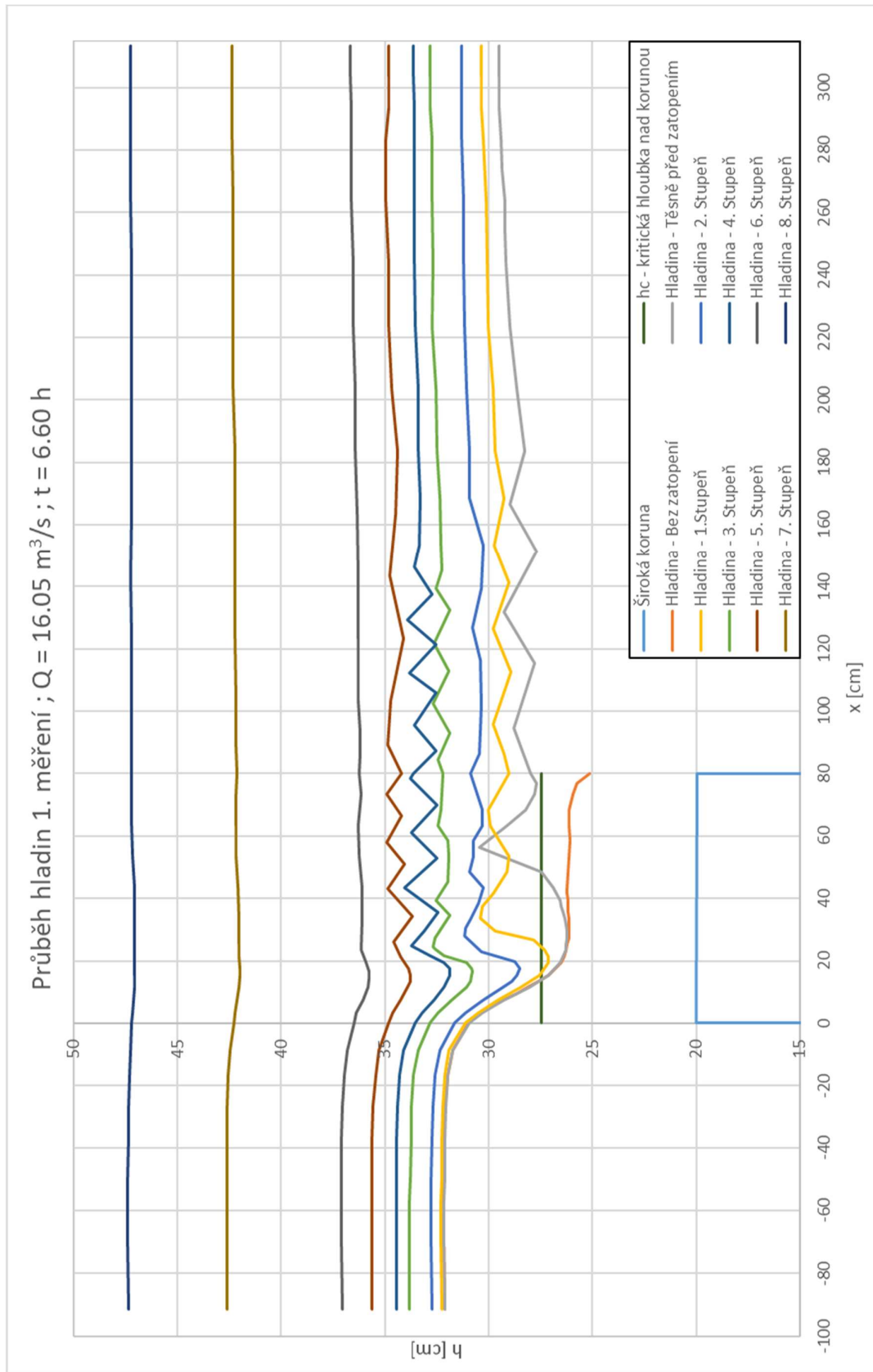
- Špatný odečet hrotovým měřítkem	odhad chyby	± 0,2 mm
- Chybné měření průtokoměru	chyba dle manuálu	± 0,25% Q
- Změna průtoku vlivem čerpadla	odhad chyby	± 0,25% Q

### 3.3. Výsledky měření

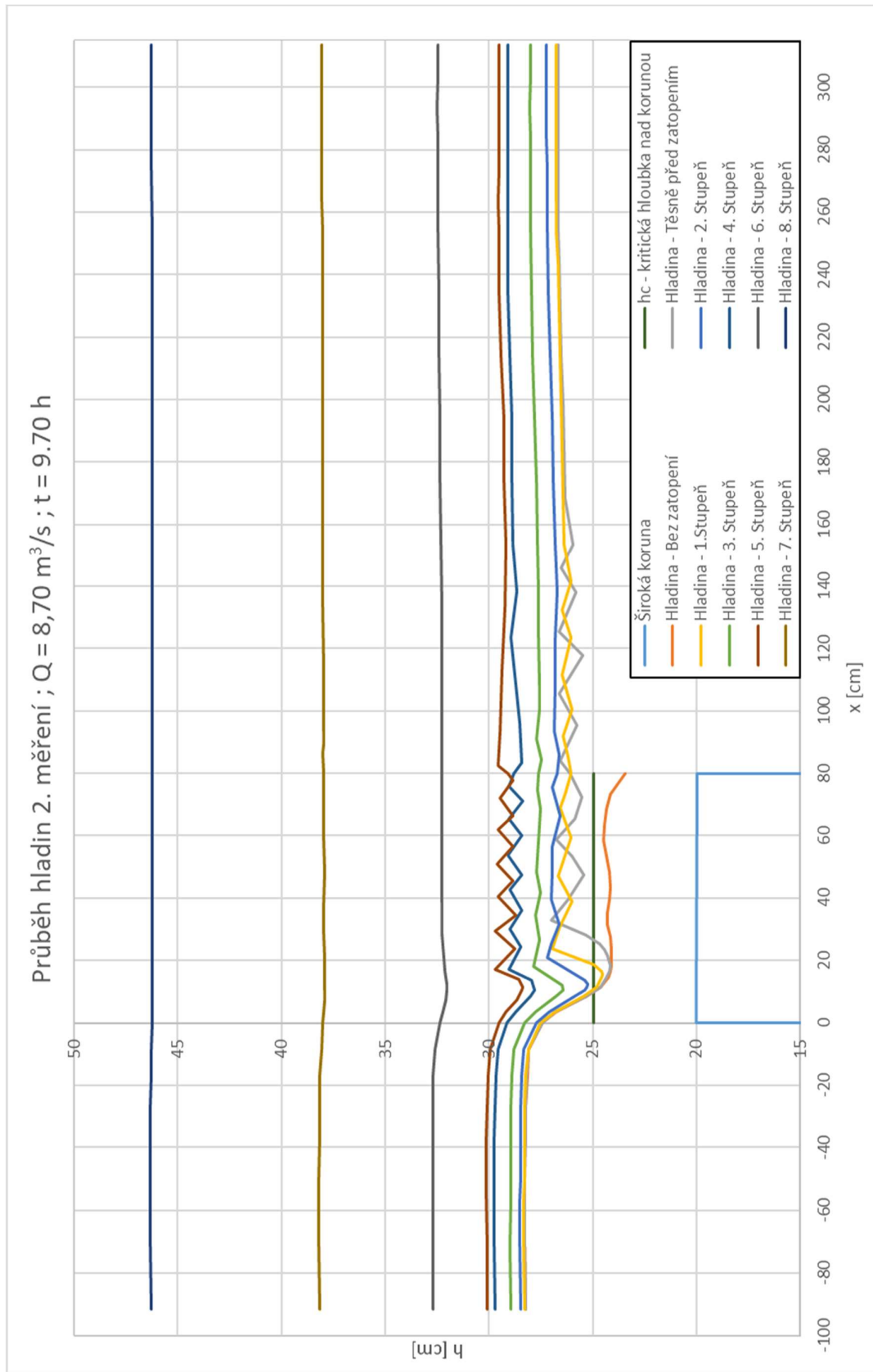
Celkem bylo naměřeno 30 průběhů hladin při třech různých průtocích. Základní rozdělení naměřených průběhů hladin pro jednotlivé průtoky bylo: průběh hladin pro přepad bez zatopení, průběh hladin pro přepad těsně před zatopením (t.p.z.) a následně 8 stupňů zatopeného přepadu. Naměření průběhu hladiny t.p.z. bylo docíleno, tak že se zvyšovala hladina dolní vody, dokud nebyl zaznamenán nárůst hladiny před přepadem  $h$ . Následně byla jemnou regulací snižována dolní voda, dokud hladina před přepadem nedosáhla výšky při nezatopeném stavu. Tento stav byl následně naměřen.

Na následujících stránkách jsou graficky znázorněna všechna měření pro jednotlivé průtoky. Do grafického znázornění byla navíc doplněna úroveň hladiny odpovídající kritickému proudění. Kritickou hloubku  $h_c$  pro obdélníkový příčný profil lze vyjádřit dle rovnice (3.1).

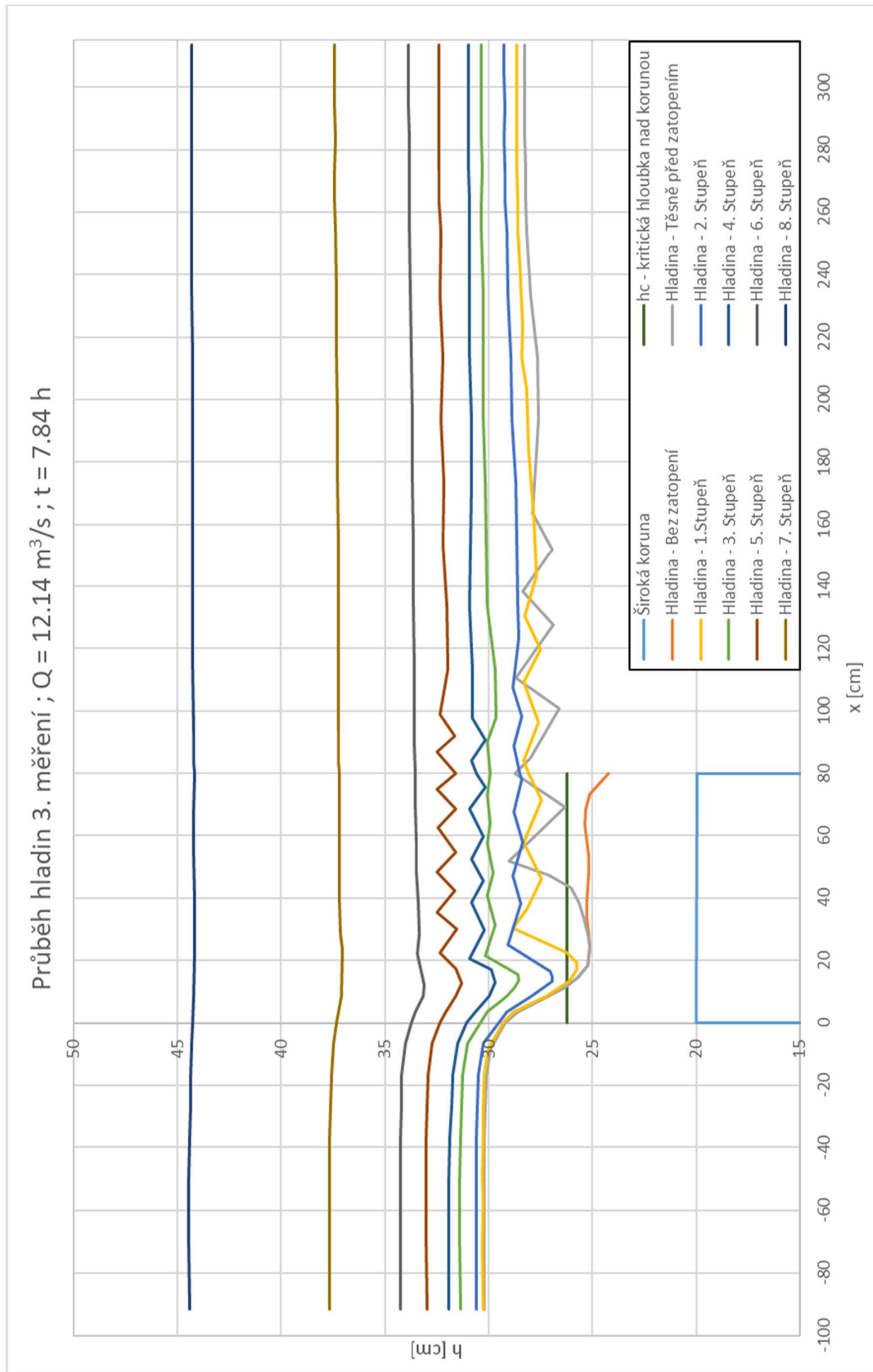
$$h_c = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}} \quad (3.1)$$



Obrázek 11 Průběh hladin - 1. měření ;  $Q = 16.05 \text{ m}^3/\text{s}$  ;  $t = 6.60 \text{ h}$

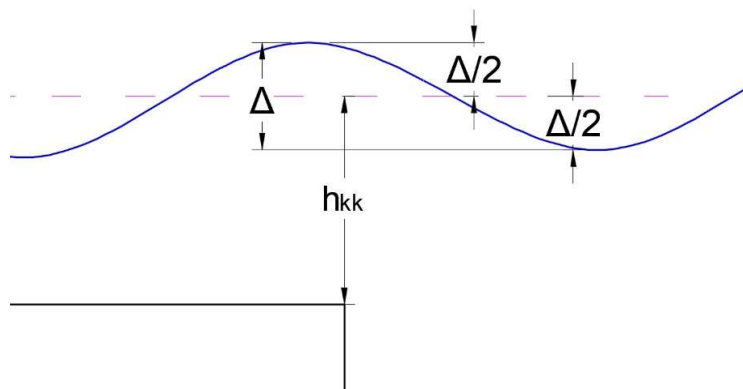


Obrázek 12 Průběh hladin - 2. měření ;  $Q = 8,70 \text{ m}^3/\text{s}$  ;  $t = 9.70 \text{ h}$



Obrázek 13 Průběh hladin - 3. měření ;  $Q = 12.14 \text{ m}^3/\text{s}$  ;  $t = 7.84 \text{ h}$

Z těchto měření byly vybrány a dopočteny základní parametry. Přičemž  $\phi$  značí průměr hodnot.  $L_d$  je vzdálenost od konce koruny k počátku uklidněné spodní hladině  $h_d$ . Tím je myšlen moment, kdy již hladina dolní vody za přelivem nestoupá. Jelikož rozdíly mezi hodnotami  $L_d$  pro jednotlivé průtoky při různých úrovních hladin byly velmi malé, jsou dále uvedeny jejich průměrné hodnoty. Hodnota  $h_{kk}$ , která značí hloubku hladiny nad koncem koruny, byla zprůměrována z nejvyšší a nejnižší hodnoty vln v její blízkosti. Viz.: Obrázek 14.



Obrázek 14 – Způsob stanovení hodnoty  $h_{kk}$

Základní naměřené a vypočtené parametry jsou uvedeny v Tabulce 2, 3 a 4.

#### 1. měření

stav	Q [m <sup>3</sup> /s]	h <sub>0</sub> [m]	h [m]	S <sub>h0</sub> [m <sup>2</sup> ]	v <sub>0</sub> [m/s]	H <sub>0</sub> [m]	h <sub>kk</sub> [m]	h <sub>σ</sub> [m]	h <sub>1</sub> [m]
nezatopený	0.01608	0.3214	0.1214	0.0807	0.199	0.1234	x	x	x
t.p.z.	0.01601	0.3213	0.1213	0.0807	0.199	0.1233	0.0828	0.095	0.0625

stav	Q [m <sup>3</sup> /s]	h <sub>0</sub> [m]	h [m]	S <sub>h0</sub> [m <sup>2</sup> ]	v <sub>0</sub> [m/s]	H <sub>0</sub> [m]	h <sub>kk</sub> [m]	h <sub>σ</sub> [m]	L <sub>d</sub> [m]
1. stupeň zat.	0.01602	0.3229	0.1229	0.0811	0.198	0.1249	0.0952	0.1035	1.93
2. stupeň zat.	0.01600	0.3277	0.1277	0.0822	0.195	0.1296	0.1059	0.1131	
3. stupeň zat.	0.01603	0.3382	0.1382	0.0849	0.189	0.1400	0.1217	0.1282	
4. stupeň zat.	0.01607	0.3446	0.1446	0.0865	0.186	0.1464	0.1315	0.1359	
5. stupeň zat.	0.01601	0.3565	0.1565	0.0895	0.179	0.1581	0.1453	0.1487	
6. stupeň zat.	0.01607	0.3709	0.1709	0.0931	0.173	0.1724	0.1620	0.1664	
7. stupeň zat.	0.01608	0.4262	0.2262	0.1070	0.150	0.2274	0.2217	0.2237	
8. stupeň zat.	0.01608	0.4739	0.2739	0.1189	0.135	0.2748	0.2721	0.2725	
$\phi$	0.01605								

Tabulka 2 – 1. Měření – Základní naměřené parametry

## 2. měření

stav	Q [m <sup>3</sup> /s]	h <sub>0</sub> [m]	h [m]	S <sub>h0</sub> [m <sup>2</sup> ]	v <sub>0</sub> [m/s]	H <sub>0</sub> [m]	h <sub>kk</sub> [m]	h <sub>σ</sub> [m]	h <sub>1</sub> [m]
nezatopený	0.00873	0.2827	0.0827	0.0709	0.123	0.0834	x	x	x
t.p.z.	0.00872	0.2826	0.0826	0.0709	0.123	0.0834	0.0617	0.0667	0.0417

stav	Q [m <sup>3</sup> /s]	h <sub>0</sub> [m]	h [m]	S <sub>h0</sub> [m <sup>2</sup> ]	v <sub>0</sub> [m/s]	H <sub>0</sub> [m]	h <sub>kk</sub> [m]	h <sub>σ</sub> [m]	L <sub>d</sub> [m]
1. stupeň zat.	0.00870	0.2831	0.0831	0.0710	0.122	0.0838	0.0623	0.0675	
2. stupeň zat.	0.00872	0.2849	0.0849	0.0715	0.122	0.0857	0.0674	0.0722	
3. stupeň zat.	0.00871	0.2897	0.0897	0.0727	0.120	0.0904	0.0760	0.0801	
4. stupeň zat.	0.00870	0.2973	0.0973	0.0746	0.117	0.0980	0.0874	0.0910	1.73
5. stupeň zat.	0.00868	0.3011	0.1011	0.0756	0.115	0.1017	0.0921	0.0953	
6. stupeň zat.	0.00868	0.3271	0.1271	0.0821	0.106	0.1277	0.1227	0.1248	
7. stupeň zat.	0.00869	0.3819	0.1819	0.0959	0.091	0.1824	0.1799	0.1805	
8. stupeň zat.	0.00869	0.4631	0.2631	0.1162	0.075	0.2634	0.2622	0.2627	

φ 0.00870

Tabulka 3 – 2. Měření – Základní naměřené parametry

## 3. měření

stav	Q [m <sup>3</sup> /s]	h <sub>0</sub> [m]	h [m]	S <sub>h0</sub> [m <sup>2</sup> ]	v <sub>0</sub> [m/s]	H <sub>0</sub> [m]	h <sub>kk</sub> [m]	h <sub>σ</sub> [m]	h <sub>1</sub> [m]
nezatopený	0.01214	0.3023	0.1023	0.0759	0.160	0.1036	x	x	x
t.p.z.	0.01211	0.3023	0.1023	0.0759	0.160	0.1036	0.0769	0.0825	0.0514

stav	Q [m <sup>3</sup> /s]	h <sub>0</sub> [m]	h [m]	S <sub>h0</sub> [m <sup>2</sup> ]	v <sub>0</sub> [m/s]	H <sub>0</sub> [m]	h <sub>kk</sub> [m]	h <sub>σ</sub> [m]	L <sub>d</sub> [m]
1. stupeň zat.	0.01213	0.3029	0.1029	0.0760	0.160	0.1042	0.0797	0.0864	
2. stupeň zat.	0.01212	0.3061	0.1061	0.0768	0.158	0.1074	0.0860	0.0924	
3. stupeň zat.	0.01218	0.3138	0.1138	0.0788	0.155	0.1150	0.0985	0.1034	
4. stupeň zat.	0.01218	0.3192	0.1192	0.0801	0.152	0.1204	0.1050	0.1095	1.86
5. stupeň zat.	0.01214	0.3301	0.1301	0.0829	0.147	0.1312	0.1206	0.1239	
6. stupeň zat.	0.01211	0.3425	0.1425	0.0860	0.141	0.1435	0.1356	0.1384	
7. stupeň zat.	0.01217	0.3768	0.1768	0.0946	0.129	0.1777	0.1722	0.1741	
8. stupeň zat.	0.01215	0.4444	0.2444	0.1115	0.109	0.2450	0.2422	0.2432	

φ 0.01214

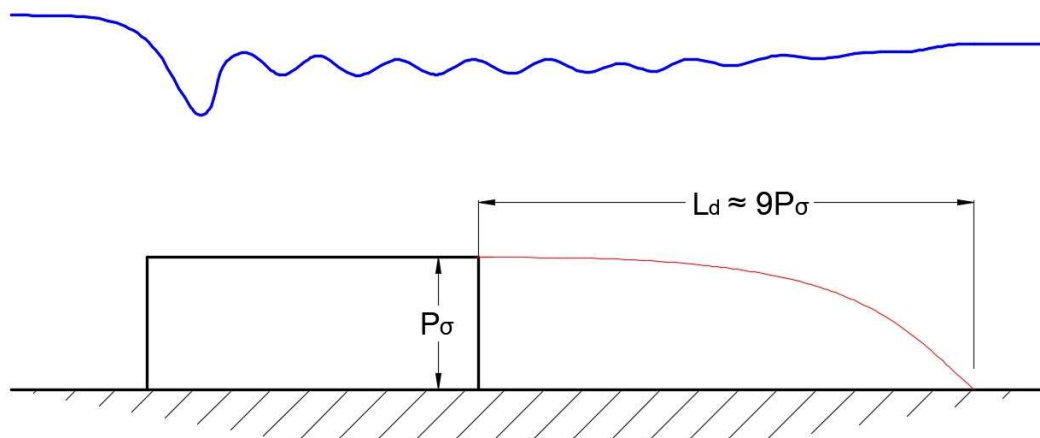
Tabulka 4 – 3. Měření – Základní naměřené parametry

## 4. Vyhodnocení měření

### 4.1. Obecné postřehy

Prvním získaným poznatkem je potvrzení stoupání vody za korunou vlivem úplavu. To je patrné jak vizuálně na grafickém znázornění, tak při porovnání veličin  $h_{kk}$  a  $h_{\sigma}$ . Správné stanovení hladiny za přelivem je při výpočtu zatopeného přepadu velmi důležité, proto této problematice bude věnována další pozornost. První zajímavostí úplavu je, že v rámci měřeného rozsahu průtoků a hloubek je délka úplavu téměř konstantní, a to přibližně 9ti násobek jeho výšky  $P_{\sigma}$ . Když byl úplav zkoumán bavlínkami, byl zjištěn jeho přibližný tvar. Viz.: Obrázek 15. Co je zajímavé, je že tvar typické hranice úplavu vyšel s opačnou křivostí, než je například uváděno pro výpočet průtoků mostním otvorem v manuálu hydraulických referencí pro HEC-RAS [16]. Také délka úplavu nám

vychází mnohem delší než, je uvedeno v tomto manuálu. Délka úplavu koresponduje s délkou zvyšování hladiny v dolním korytě  $L_d$ .



Obrázek 15 Přibližný tvar úplavu za korunou

Dále je z patrné, že při začátku zatápní nám skutečně nevzniká průběh hladiny vykreslený na Obrázek 2 a Obrázek 3. Vzniká až při vyšších zatopeních. Dá se tedy předpokládat, že s narůstající dolní hladinou nám bude nepřesnost výsledků vypočtených za pomoci rovnice (2.16) klesat.

Při přezkoumání 1. stupně zatopení pro všechny průtoky je patrné, že se proud v přední části koruny přelivu dostává do nadkritického proudění. To znamená, že lze mít bystrinné proudění při zatopeném přepadu. Tento poznatek vyvrací například tvrzení: F. H. Schimda (1957), který byl citován [9] že: Přepad je tak dlouho dokonalý, dokud hladina dolní vody nezaplaví kritickou hloubku nad korunou.

## 4.2. Ověření zatápní přelivu

Pro ověření zatápní přelivu musíme vypočíst druhou vzájemnou hloubku vodního skoku. V podkladech je doporučeno využít součinitele kontrakce pro druhou vzájemnou hloubku  $\epsilon_2$ . Jak jsem již, ale zmiňoval, tento součinitel nedává správné výsledky [12]. Proto pro výpočet druhé vzájemné hloubky vodního skoku použijeme výraz vyjádřený z rovnice pro plný vodní skok v obdélníkovém korytě:

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{8q^2}{gh_1^3}} - 1 \right) \quad (4.1)$$

[9]

Ten vyplývá z rovnice hybnosti. Přičemž  $q$  je pro obdélníkové koryto vyjádřeno:

$$q = \frac{Q}{b} = v \cdot h \quad (4.2)$$

Kde:  $q$  – měrný průtok [ $m^2/s$ ]

Když vypočteme  $h_2$  a porovnáme s průměrnými naměřenými hloubkami  $h_{kk}$  na konci koruny pro stav t.p.z. a 1. stupeň zatopení tak dostaneme tyto výsledky:

	t.p.z.	t.p.z.	1. Stupeň
	$h_2$ [m]	$h_{kk}$ [m]	$h_{kk}$ [m]
1. měř.	0.0881	0.0828	0.0952
2. měř.	0.0587	0.0617	0.0623
3. měř.	0.0738	0.0769	0.0797

Tabulka 5 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot  $h_2$

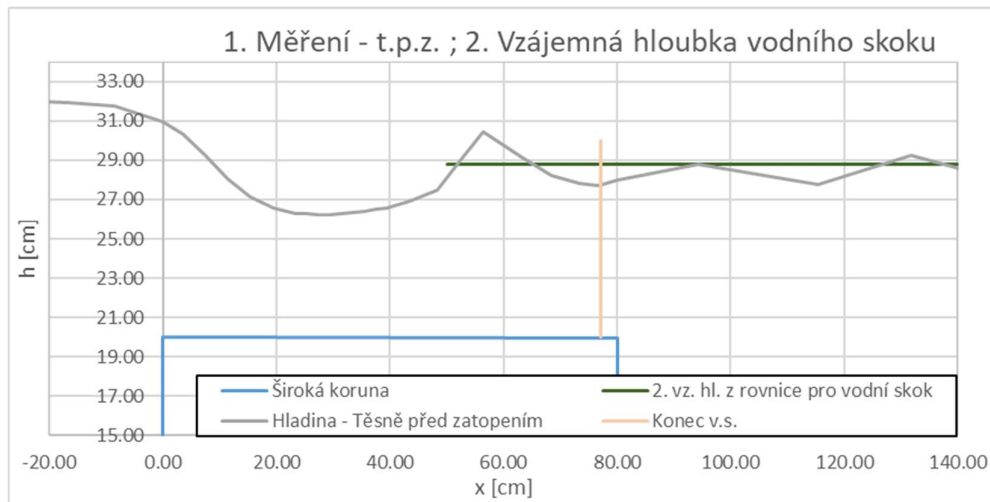
Z tohoto porovnání je patrné, že vypočtená hladina  $h_2$  se v 2. a 3. měření nachází níž, než  $h_{kk}$  před zatopením. Vzhledem k tomu, že z něj byla druhá vzájemná hloubka počítána, se to zdá zvláštní. Pokud vypočteme Froudovo číslo pro  $h_1$  zjistíme, že je pro všechny tři průtoky přibližně  $Fr=1,3$ . To znamená, že na koruně bude probíhat vlnovitý vodní skok. Mohlo by se tedy dít to, že vlnovitý vodní skok nám končí až za koncem koruny. Tomu napovídá i zvlněný průběh hladiny za korunou. Pro ověření bychom si vypočetli délku vlnovitého vodního skoku z rovnice, kterou určil Dimitrijev:

$$L_s \approx 10,6(h_2 - h_1) \quad (4.3)$$

[17]

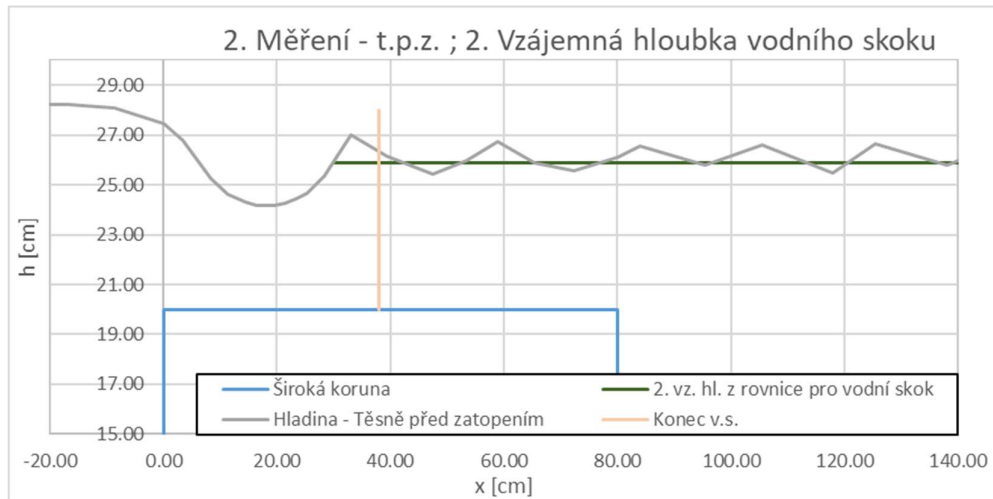
Kde  $L_s$  – délka vlnovitého vodního skoku od první vlny [m]

A graficky si znázornili výsledky:

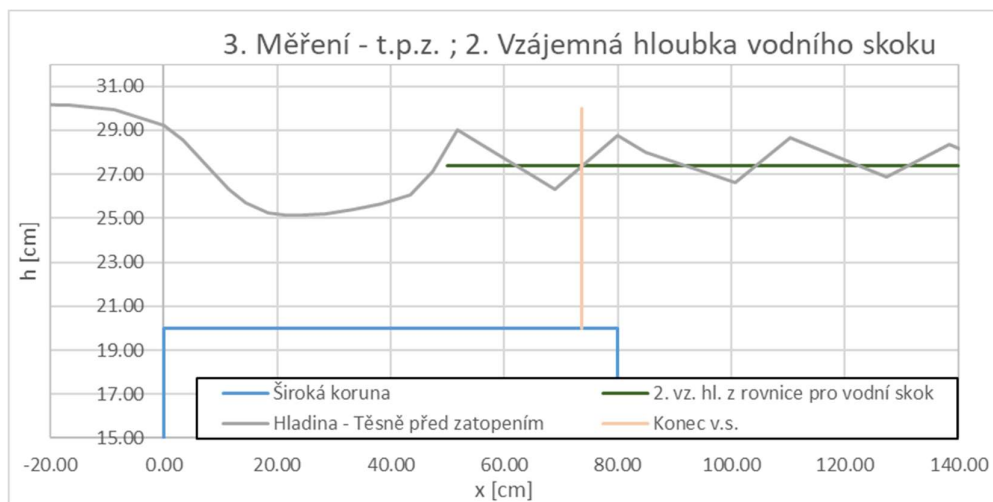


Obrázek 16 - 1. Měření - t.p.z. ; 2. Vzájemná hloubka vodního skoku





Obrázek 17 - 2. Měření - t.p.z. ; 2. Vzájemná hloubka vodního skoku



Obrázek 18 - 3. Měření - t.p.z. ; 2. Vzájemná hloubka vodního skoku

Jsou patrné 2 poznatky. První je, že nám přibližně vypočtená  $h_2$  vychází do vln nad i za korunu. Druhým poznatkem je, že by se nám vlnovitý vodní skok měl dle rovnice vejít na korunu. K podobným výsledkům jsem již dospěl ve své bakalářské práci [12]. Vysvětlením, proč  $h_2$  nevychází přesně je, že vodní skok skutečně vychází až za korunu přepadu. Dimitrijeev měřil délku vlnovitého vodního skoku na poddajném dnu a zkoumal kde vlnovitý skok vytvoří poslední výmol [9]. Jelikož ale bylo dno poddajné, výmoly by se vytvořily po celé délce vlnovitého vodního skoku a proudnicový stav vlnovitého vodního skoku by byl tím pádem alterován dle tvaru dna [12].

### 4.3. Ověření 1. rovnice zatopeného přepadu

Nejprve se zaměříme na rovnici přepadu (2.16). Pro ověření správnosti rovnice ji jednoduše vypočteme s vyjádřením pro energetickou přepadovou výšku  $H_0$  a porovnáme s hodnotou stanovenou na základě měření. Do rovnice dosadíme součinitel  $\varphi$  z Tabulka 1. Tedy  $\varphi=0,900$ . Pro výšku dolní vody dosadíme v jednom případě naměřené  $h_\sigma$  a v druhém  $h_{kk}$ . Tím dostaneme tyto výsledky:

1. Měření	Výpočet H <sub>0</sub> z $\varphi = 0.9$		Chyba H <sub>0</sub>	
	H <sub>0-kk</sub> [m]	H <sub>0-σ</sub> [m]	H <sub>0-kk</sub> [%]	H <sub>0-σ</sub> [%]
1. stupeň zat.	0.1235	0.1274	-1.17	2.01
2. stupeň zat.	0.1287	0.1331	-0.71	2.70
3. stupeň zat.	0.1390	0.1438	-0.71	2.69
4. stupeň zat.	0.1464	0.1499	0.01	2.41
5. stupeň zat.	0.1574	0.1602	-0.46	1.36
6. stupeň zat.	0.1718	0.1757	-0.34	1.90
7. stupeň zat.	0.2270	0.2288	-0.17	0.65
8. stupeň zat.	0.2755	0.2760	0.26	0.41
			$\phi$	-0.41 1.76

Tabulka 6 – 1. Měření - Výsledky výpočtu H<sub>0</sub> se součinitelem  $\varphi=0,900$

2. Měření	Výpočet H <sub>0</sub> z $\varphi = 0.9$		Chyba H <sub>0</sub>	
	H <sub>0-kk</sub> [m]	H <sub>0-σ</sub> [m]	H <sub>0-kk</sub> [%]	H <sub>0-σ</sub> [%]
1. stupeň zat.	0.0818	0.0841	-2.48	0.28
2. stupeň zat.	0.0841	0.0867	-1.83	1.23
3. stupeň zat.	0.0891	0.0919	-1.41	1.65
4. stupeň zat.	0.0973	0.1002	-0.74	2.19
5. stupeň zat.	0.1009	0.1036	-0.79	1.83
6. stupeň zat.	0.1277	0.1296	0.00	1.51
7. stupeň zat.	0.1822	0.1828	-0.09	0.25
8. stupeň zat.	0.2633	0.2638	-0.03	0.15
			$\phi$	-0.92 1.14

Tabulka 7 – 2. Měření - Výsledky výpočtu H<sub>0</sub> se součinitelem  $\varphi=0,900$

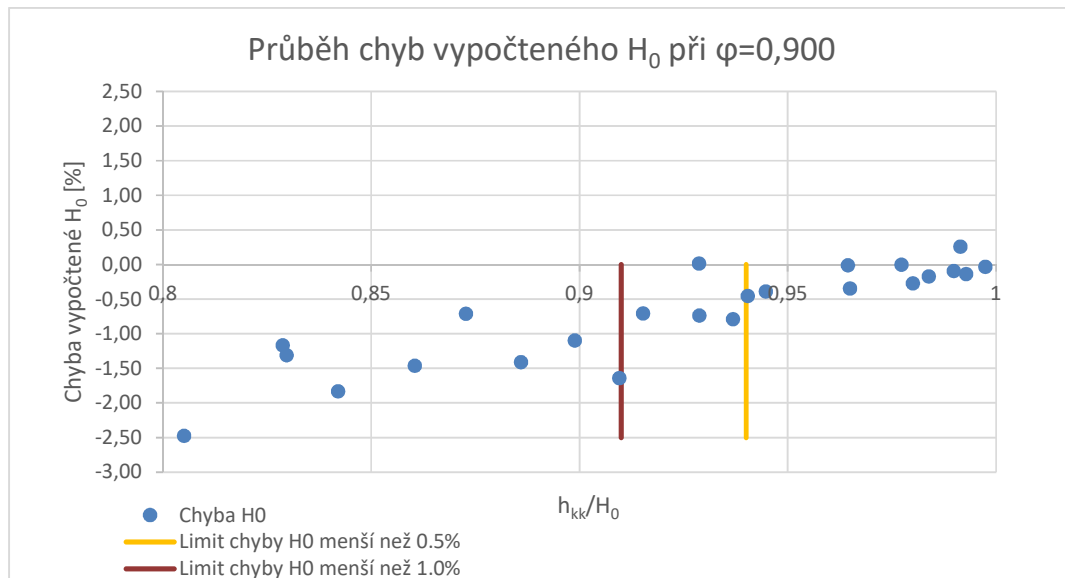
3. Měření	Výpočet H <sub>0</sub> z $\varphi = 0.9$		Chyba H <sub>0</sub>	
	H <sub>0-kk</sub> [m]	H <sub>0-σ</sub> [m]	H <sub>0-kk</sub> [%]	H <sub>0-σ</sub> [%]
1. stupeň zat.	0.1028	0.1061	-1.31	1.84
2. stupeň zat.	0.1058	0.1096	-1.46	2.04
3. stupeň zat.	0.1138	0.1172	-1.10	1.92
4. stupeň zat.	0.1184	0.1219	-1.64	1.21
5. stupeň zat.	0.1307	0.1335	-0.39	1.78
6. stupeň zat.	0.1435	0.1461	-0.01	1.77
7. stupeň zat.	0.1772	0.1790	-0.27	0.74
8. stupeň zat.	0.2447	0.2457	-0.14	0.30
			$\phi$	-0.79 1.45

Tabulka 8 – 3. Měření - Výsledky výpočtu H<sub>0</sub> se součinitelem  $\varphi=0,900$

Přičemž výpočet chyby v procentech je prováděn tímto způsobem:

$$Chyba = \frac{\text{vypočtená hodnota parametru} - \text{změřená hodn. par.}}{\text{změřená hodnota parametru}} \cdot 100 \quad (4.4)$$

Z výsledků je patrný předpokládaný trend snižování chyby se zvyšující se hladinou. Z výsledků je také zřejmé, že v případě spodní hladiny vychází lépe hladiny h<sub>kk</sub> s celkovou průměrnou chybou -0,71%. Zatímco celková průměrná chyba pro h<sub>σ</sub> je 1,45%. Pokud bychom si vykreslili nárůst chyby vypočtených z h<sub>kk</sub> v závislosti na poměru h<sub>kk</sub>/H<sub>0</sub>, tak dostaneme tento graf.



Obrázek 19 Průběh chyb vypočtených  $H_0$  v závislosti na poměru  $h_{kk}/H_0$ ;  $\varphi=0,900$

Při aplikaci rovnice (2.16) s tabulkovou hodnotou součinitele  $\varphi=0,900$  je při stanovení energetické přepadové výšky  $H_0$  chyba ca 0,5% při poměru  $h_{kk}/H_0=0,940$ , při poměru  $h_{kk}/H_0=0,910$  je vypočtená hodnota  $H_0$  podhodnocena o ca 1,0%.

Z výsledků je také patrné, že u obou případů hodnoty vypočtených chyb inklinují ke kladným respektive záporným chybám. To by mohlo být způsobeno například větší ztrátou na nátokové hraně přelivu. Vyzkoušejme si tedy z rovnice dokonalého přepadu (2.13) a (2.15) vypočítat základní součinitele pro stavy t.p.z.

	$\varphi$	$m$	$\varepsilon_1$
t.p.z. 1. měř.	0.934	0.332	0.507
t.p.z. 2. měř.	0.920	0.325	0.500
t.p.z. 3. měř.	0.928	0.327	0.496
$\phi$	0.927	0.328	0.501

Tabulka 9 – Výpočet základních součinitelů dokonalého přepadu

Naproti předpokladu je rychlostní součinitel  $\varphi$  větší, než udává Agroskinova Tabulka 1. To je způsobeno menšími ztrátami na nátokové hraně, než bylo předpokládáno. Dalším zajímavým faktorem je, že rychlostní součinitel  $\varphi$  se zvětšuje s přepadovou výškou. To by korespondovalo s tvrzením, že při zvyšování hladiny přepadu se snižují ztráty na nátokové hraně, uvedeným v kapitole 2.3. Ovšem opravdu pozoruhodným poznatkem je, že součinitel kontrakce  $\varepsilon_1$  má odpovídající hodnotu při tabulkovém  $\varphi=0,900$ , která odpovídá tvaru nátokové hrany použité při měření. Pokud by byl ovšem  $\varepsilon_1$  brán z Tabulka 1 pro  $\varphi=0,927$ , tak by jeho hodnota odpovídala přibližně  $\varepsilon_1=0,550$ .

Je tedy vidět, že při využití vypočteného rychlostního součinitele z nezatopeného přepadu bychom nedostali bližší hodnoty. Další možností postupu je pokusit se propojit rovnicí zatopeného přepadu (2.16) profil 0-0 s profilem 3-3 a do rychlostního součinitele  $\varphi$  zahrnout i ztráty nad korunou. Následně se pokusit najít případnou závislost  $\varphi$  na jiných parametrech. Výsledné hodnoty vypadají takto:

	Vypočtené $\phi$ pro $h_{kk}$		
	1. měř.	2. měř.	3. měř.
1. stupeň zat.	0.878	0.855	0.875
2. stupeň zat.	0.882	0.861	0.866
3. stupeň zat.	0.875	0.859	0.865
4. stupeň zat.	0.901	0.869	0.840
5. stupeň zat.	0.874	0.862	0.878
6. stupeň zat.	0.874	0.900	0.899
7. stupeň zat.	0.868	0.869	0.859
8. stupeň zat.	1.008	0.866	0.845
	celkové $\phi$		0.872

Tabulka 10 Vypočtený rychlostní součinitel pro jednotlivá měření

Z výsledků není patrný žádný charakteristický průběh. Avšak hodnoty se zdají být poměrně podobné pro velké rozpětí hladin. Proto se zdá, že rychlostní součinitel  $\phi$  je teoreticky použitelný. Pro přesnější hodnoty by měla být použita jeho snížená hodnota  $\phi=0,872$ . Důležité je zmínit že 8. stupeň zatopení u 1. měření není zahrnut do celkového průměru z důvodu jeho nesmyslnosti a náhodnosti.

#### 4.4. Ověření 2. rovnice zatopeného přepadu

Druhá rovnice zatopeného přepadu (2.17), je prakticky modifikace rovnice pro dokonalý přepad (2.15) závislá jen na vynásobení její pravé strany součinitelem zatopení  $\sigma$ . Na základě změřených přepadových výšek a průtoků při uvažování tabulkové hodnoty součinitele přepadu  $m=0,319$  se z rovnice (2.17) vypočte součinitel zatopení. Pro takto určené hodnoty součinitele zatopení se z křivek na obrázku 4 (resp. z rovnice (2.20)) odečte odpovídající poměr  $h_{\sigma}/H_0$  a následným vynásobením hodnotou  $H_0$  se zjistí odpovídající hodnota  $h_{\sigma}$ . Takto stanovené úrovně dolní hladiny zatápěcího přepadu jsou dále porovnány s hodnotami naměřenými na fyzikálním modelu, přičemž pro porovnání byly vzaty v potaz dvě charakteristické úrovně hladin, a to hladina v dolním korytě za koncem úplavu za korunou (tomu odpovídá hloubka vody  $h_{\sigma}$  nad úrovní koruny přelivu viz.: Obrázek 1) a hloubka na konci koruny  $h_{kk}$ . Pro přesnější odečtené hodnoty křivek, byly obě detailně překresleny do programu AutoCAD.

Pozn.: Pokud byla překročena kritéria pro dané grafy či rovnici výsledky byly nahrazeny hodnotou x.

1. Měření	Pavlovský, m=0.319			Berezinský, m=319			Pavlovský rovn. , m=0.319		
	Vypočtené	Porovnání		Vypočtené	Chyba		Vypočtené	Chyba	
	$h_{\sigma,kk}$ [m]	$h_{kk}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]	$h_{\sigma,kk}$ [m]	$h_{kk}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]	$h_{\sigma,kk}$ [m]	$h_{kk}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]
1. stupeň zat.	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2. stupeň zat.	0.0980	-7.45	-13.38	0.1090	3.02	-3.59	0.1008	-4.73	-10.84
3. stupeň zat.	0.1182	-2.84	-7.73	0.1250	2.71	-2.46	0.1191	-2.16	-7.08
4. stupeň zat.	0.1276	-2.92	-6.11	0.1332	1.32	-2.01	0.1276	-2.92	-6.11
5. stupeň zat.	0.1433	-1.31	-3.58	0.1476	1.60	-0.73	0.1424	-1.95	-4.20
6. stupeň zat.	0.1605	-0.93	-3.53	0.1640	1.24	-1.42	0.1591	-1.79	-4.37
7. stupeň zat.	0.2209	-0.34	-1.22	0.2245	1.25	0.35	0.2197	-0.91	-1.78
8. stupeň zat.	0.2706	-0.53	-0.69	x	x	x	0.2703	-0.63	-0.78
	$\phi$	-2.33	-5.18	$\phi$	1.86	-1.64	$\phi$	-2.16	-5.02

Tabulka 11 Výpočet úrovně hladiny dolní vody za pomoci součinitele zatopení  $\sigma$  při tabulkovém součiniteli  $m=0,319 - 1.$  Měření

2. Měření	Pavlovský, m=0.319			Berezinský, m=0.319			Pavlovský (rovnice), m=0.319		
	Vypočtené	Chyba		Vypočtené	Chyba		Vypočtené	Chyba	
	$h_{\sigma,kk}$ [m]	$h_{kk}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]	$h_{\sigma,kk}$ [m]	$h_{kk}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]	$h_{\sigma,kk}$ [m]	$h_{kk}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]
1. stupeň zat.	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2. stupeň zat.	0.0631	-6.32	-12.50	0.0711	5.53	-1.43	0.0646	-4.11	-10.43
3. stupeň zat.	0.0739	-2.70	-7.65	0.0792	4.27	-1.03	0.0750	-1.30	-6.32
4. stupeň zat.	0.0859	-1.74	-5.67	0.0895	2.37	-1.72	0.0858	-1.82	-5.75
5. stupeň zat.	0.0910	-1.18	-4.57	0.0941	2.18	-1.32	0.0906	-1.62	-4.99
6. stupeň zat.	0.1215	-0.94	-2.61	0.1237	0.82	-0.87	0.1205	-1.76	-3.41
7. stupeň zat.	0.1795	-0.17	-0.53	x	x	x	0.1794	-0.27	-0.63
8. stupeň zat.	0.2627	0.20	0.01	x	x	x	x	x	x
	$\phi$	-1.84	-4.79	$\phi$	3.04	-1.27	$\phi$	-1.81	-5.25

Tabulka 12 Výpočet úrovně hladiny dolní vody za pomoci součinitele zatopení  $\sigma$  při tabulkovém součiniteli  $m=0,319 - 2.$  Měření

3. Měření	Pavlovský, m=0.319			Berezinský, m=0.319			Pavlovský rovn. , m=0.319		
	Vypočtené	Chyba		Vypočtené	Chyba		Vypočtené	Chyba	
	$h_{\sigma,kk}$ [m]	$h_{kk}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]	$h_{\sigma,kk}$ [m]	$h_{kk}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]	$h_{\sigma,kk}$ [m]	$h_{kk}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]
1. stupeň zat.	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2. stupeň zat.	0.0806	-6.28	-12.80	0.0900	4.72	-2.57	0.0829	-3.52	-10.23
3. stupeň zat.	0.0959	-2.63	-7.22	0.1020	3.51	-1.38	0.0969	-1.64	-6.28
4. stupeň zat.	0.1043	-0.66	-4.76	0.1091	3.95	-0.34	0.1044	-0.54	-4.65
5. stupeň zat.	0.1188	-1.42	-4.11	0.1224	1.52	-1.26	0.1181	-2.04	-4.72
6. stupeň zat.	0.1338	-1.30	-3.36	0.1367	0.84	-1.27	0.1326	-2.16	-4.20
7. stupeň zat.	0.1715	-0.38	-1.48	0.1744	1.25	0.14	0.1704	-1.04	-2.13
8. stupeň zat.	0.2421	-0.02	-0.47	x	x	x	0.2422	0.03	-0.42
	$\phi$	-1.81	-4.89	$\phi$	2.63	-1.11	$\phi$	-1.56	-4.66

Tabulka 13 Výpočet úrovně hladiny dolní vody za pomoci součinitele zatopení  $\sigma$  při tabulkovém součiniteli  $m=0,319 - 3.$  Měření

Z výsledků se zdá, že Pavlovského křivka byla vztažena k hodnotám dolní vody nad koncem koruny  $h_{kk}$ . Zatímco Berezinského křivka byla vztažena až k ustálené hladině dolní vody za přelivem  $h_d$ . Druhým zajímavým poznatkem je rovnice, která byla vytvořena aproximací

Pavlovského křivky nám dává přesnější výsledky než křivka samotná. Rovnice pravděpodobně nepopisuje křivku správně, ovšem její odchylka je blíž k reálným hodnotám.

Každopádně, ve všech třech případech je prostor ke zlepšení. Pokusme se tedy na místo tabulkových hodnot součinitele  $m$ , dát jeho průměrnou vypočtenou hodnotu pro náš přeliv (Tabulka 9). Tedy  $m=0,328$ .

1. Měření	Pavlovský, $m=0.328$			Berezinský, $m=0.328$			Pavlovský rovn., $m=0.328$		
	Vypočtené	Chyba		Vypočtené	Chyba		Vypočtené	Chyba	
	$h_{\sigma,kk}$ [m]	$h_{kk}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]	$h_{\sigma,kk}$ [m]	$h_{kk}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]	$h_{\sigma,kk}$ [m]	$h_{kk}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]
1. stupeň zat.	0.0891	-6.45	-13.98	0.1018	6.98	-1.63	x	x	x
2. stupeň zat.	0.1022	-3.47	-9.66	0.1115	5.32	-1.43	0.1045	-1.25	-7.58
3. stupeň zat.	0.1202	-1.25	-6.22	0.1262	3.67	-1.54	0.1206	-0.92	-5.91
4. stupeň zat.	0.1291	-1.80	-5.02	0.1341	2.05	-1.31	0.1288	-2.00	-5.22
5. stupeň zat.	0.1444	-0.61	-2.89	0.1483	2.13	-0.22	0.1433	-1.32	-3.58
6. stupeň zat.	0.1613	-0.46	-3.08	0.1647	1.65	-1.03	0.1598	-1.33	-3.92
7. stupeň zat.	0.2213	-0.17	-1.05	0.2249	1.44	0.54	0.2202	-0.69	-1.56
8. stupeň zat.	0.2709	-0.43	-0.58	x	x	x	0.2707	-0.48	-0.64
	$\phi$	-1.83	-5.31	$\phi$	3.32	-0.95	$\phi$	-1.14	-4.06

Tabulka 14 Výpočet úrovně hladiny dolní vody za pomoci součinitele zatopení  $\sigma$  při tabulkovém součiniteli  $m=0,328$  – 1. Měření

2. Měření	Pavlovský, $m=0.328$			Berezinský, $m=0.328$			Pavlovský rovn., $m=0.328$		
	Vypočtené	Chyba		Vypočtené	Chyba		Vypočtené	Chyba	
	$h_{\sigma,kk}$ [m]	$h_{kk}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]	$h_{\sigma,kk}$ [m]	$h_{kk}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]	$h_{\sigma,kk}$ [m]	$h_{kk}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]
1. stupeň zat.	0.0618	-0.87	-8.49	0.0696	11.68	3.10	0.0632	1.46	-6.34
2. stupeň zat.	0.0664	-1.47	-7.97	0.0730	8.33	1.19	0.0682	1.13	-5.53
3. stupeň zat.	0.0756	-0.59	-5.64	0.0802	5.55	0.18	0.0763	0.35	-4.75
4. stupeň zat.	0.0868	-0.65	-4.62	0.0901	3.06	-1.06	0.0866	-0.93	-4.90
5. stupeň zat.	0.0918	-0.32	-3.73	0.0946	2.78	-0.74	0.0912	-0.89	-4.28
6. stupeň zat.	0.1222	-0.41	-2.08	0.1243	1.27	-0.43	0.1210	-1.43	-3.08
7. stupeň zat.	0.1797	-0.06	-0.42	x	x	x	0.1796	-0.12	-0.48
8. stupeň zat.	0.2628	0.25	0.06	x	x	x	x	x	x
	$\phi$	-0.51	-4.11	$\phi$	5.45	0.37	$\phi$	-0.06	-4.19

Tabulka 15 Výpočet úrovně hladiny dolní vody za pomoci součinitele zatopení  $\sigma$  při tabulkovém součiniteli  $m=0,328$  – 2. Měření

3. Měření	Pavlovský, m=0.328			Berezinský, m=0.328			Pavlovský rovn., m=0.328		
	Vypočtené	Chyba		Vypočtené	Chyba		Vypočtené	Chyba	
	$h_{\sigma,kk}$ [m]	$h_{kk}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]	$h_{\sigma,kk}$ [m]	$h_{kk}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]	$h_{\sigma,kk}$ [m]	$h_{kk}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]
1. stupeň zat.	0.0755	-5.26	-12.68	0.0857	7.53	-0.89	x	x	x
2. stupeň zat.	0.0842	-2.03	-8.85	0.0921	7.17	-0.29	0.0863	0.36	-6.63
3. stupeň zat.	0.0977	-0.84	-5.52	0.1030	4.60	-0.34	0.0983	-0.25	-4.96
4. stupeň zat.	0.1056	0.57	-3.58	0.1100	4.74	0.41	0.1055	0.46	-3.69
5. stupeň zat.	0.1197	-0.70	-3.42	0.1230	2.05	-0.74	0.1189	-1.40	-4.10
6. stupeň zat.	0.1344	-0.85	-2.92	0.1372	1.23	-0.88	0.1332	-1.71	-3.76
7. stupeň zat.	0.1719	-0.15	-1.25	0.1747	1.46	0.34	0.1708	-0.79	-1.88
8. stupeň zat.	0.2423	0.06	-0.38	x	x	x	0.2425	0.16	-0.29
	$\phi$	-1.15	-4.83	$\phi$	4.11	-0.34	$\phi$	-0.45	-3.61

Tabulka 16 Výpočet úrovně hladiny dolní vody za pomoci součinitele zatopení  $\sigma$  při tabulkovém součiniteli  $m=0,328$  – 3. Měření

Pro přehlednější posouzení obou případů zprůměrujme veškeré výsledky pro jednotlivé případy.

Celkové porovnání rozdílů dolní vody pro $m = 0.319$					
Pavlovský		Pavlovský rovn.		Berezinský	
$h_{kk}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]	$h_{kk}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]	$h_{kk}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]
-1.99	-4.95	-1.84	-4.98	2.51	-1.34

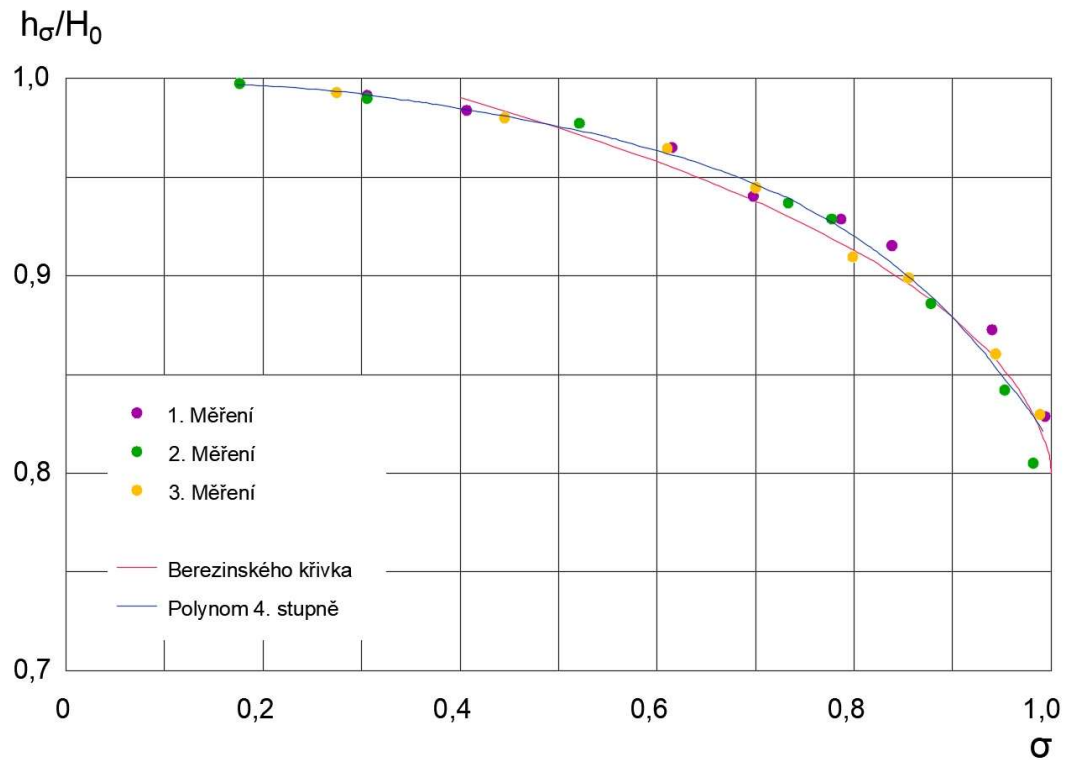
  

Celkové porovnání rozdílů dolní vody pro $m = 0.328$					
Pavlovský		Pavlovský rovn.		Berezinský	
$h_{kkp}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]	$h_{kkp}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]	$h_{kkp}$ [%]	$h_{\sigma}$ [%]
-1.16	-4.75	-0.55	-3.96	4.29	-0.30

Tabulka 17 Porovnání chyb všech zprůměrovaných hodnot dolních hladin

Z výsledků je jasné vidět, že výška dolní vody odpovídá mnohem přesněji pokud využijeme průměrný vypočtený součinitel přepadu  $m=0,328$ . Trend výsledků je v obou případech součinitele  $m$  zachován. Křivka Pavlovského odpovídá hladině  $h_{kk}$ , křivka Berezinského odpovídá hladině  $h_{\sigma}$  a rovnice popisující Pavlovského křivku (2.20) odpovídá hladině  $h_{kk}$ . Nejlepší výsledky vycházejí při využití Berezinského křivky, která má, ale nejmenší rozsah použitelných hodnot. Jako druhá nejlepší se ukazuje rovnice (2.20) a nejméně přesné výsledky udává Pavlovského křivka.

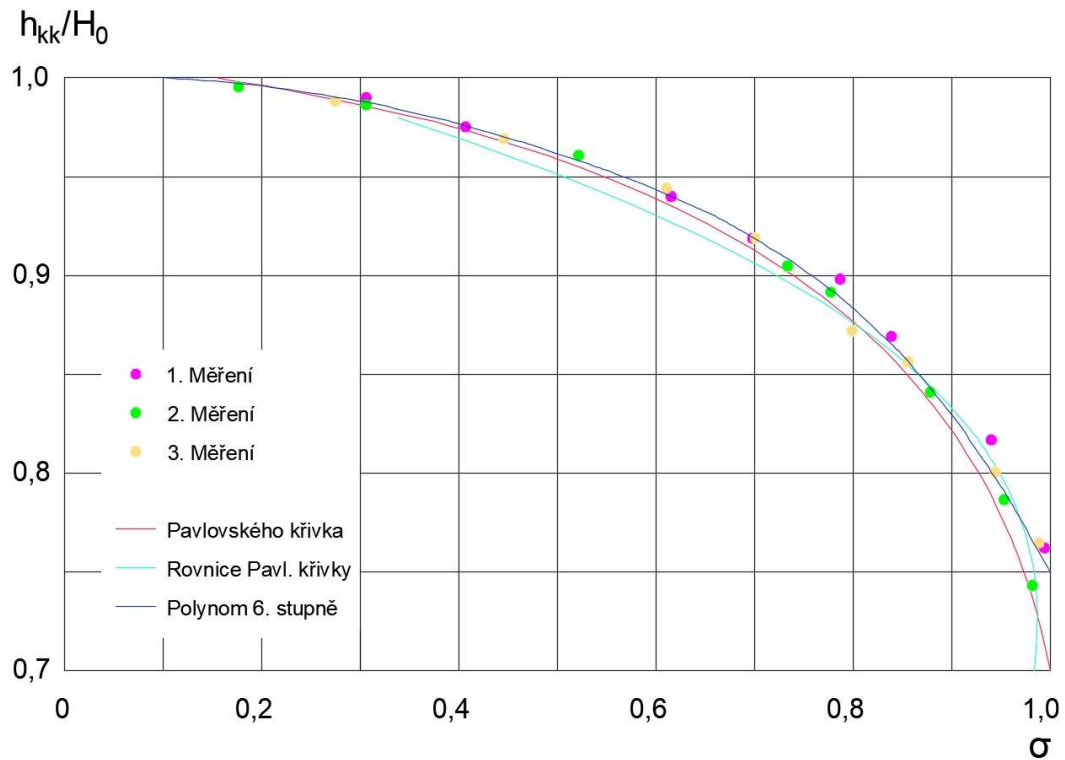
Pro přesnější vyhodnocení si vypočteme hodnoty součinitele zatopení odpovídající měření. Součinitel  $\sigma$  byl pro tato vykreslení vyřešen z rovnice (2.17). Těmito body byla následně proložena křivka polynomu 4. (Berezinský), respektive 6. stupně (Pavlovský) reprezentující spojnicí trendu. Pro porovnání byl také do 2. grafu (Obrázek 21) vykreslen průběh rovnice popisující Pavlovského křivku (2.20). Pro vykreslení byl použit průměrný součinitel přepadu odpovídající naší koruně. Tedy  $m = 0,328$ .



Obrázek 20 Křivka součinitele zatopení - vykreslení vypočtených bodů a porovnání s berezinského křivkou

Jak je z grafu patrné, Berezinského křivka poměrně dobře popisuje průběh naměřených hodnot. Ovšem křivka má zploštělý tvar. Pokud by byla křivka extrapolována na menší hodnoty  $\sigma$  než 0,4, tak by se nám výsledky začaly vzdalovat. Možná také právě z tohoto důvodu ji autor ukončil právě zde. Průběh našich hodnot je z počátku zatápění přepadu lehce rozptýlený. Při vyšším zatápění ( $H_\sigma/H_0 > 0,95$ ) začínají mít hodnoty menší rozpětí, až prakticky stejný průběh.

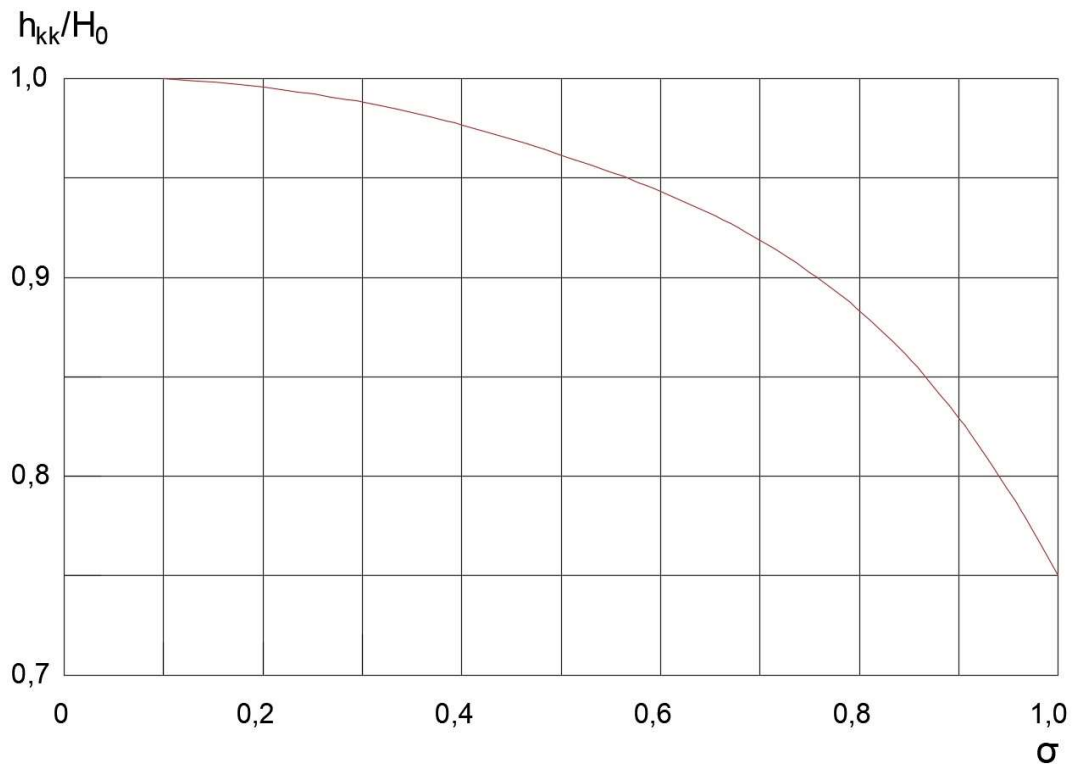




Obrázek 21 Křivka součinitele zatopení - vykreslení vypočtených bodů, porovnání s Pavlovského křivkou a křivkou rovnice popisující Pavlovského křivku (2.20)

Jako prvního si lze všimnout, že průběh rovnice pro Pavlovského křivku vykazuje zalomení pod hodnotou  $h_{kk}/H_0 < 0,75$ . Nezdá se pravděpodobné, že by měly hodnoty  $\sigma$  při počátečním zatápění tento průběh. Jedná se patrně o důsledek snahy co nejtěsnější aproximace Pavlovského křivky polynomem třetího stupně. V rozmezí hodnot  $0,75 < h_{kk}/H_0 < 0,875$  empiricky naměřeným datům lépe odpovídá aproximační rovnice než samotná Pavlovského křivka. Z tohoto důvodu se také zdá, že při posuzování výpočtů měla tato rovnice daleko menší chyby. Pokud se zaměříme na hodnoty  $h_{kk}/H_0 > 0,875$ , tak již Pavlovského křivka lépe kopíruje průběh výsledných hodnot, zatímco rovnice křivky se vzdaluje a následně končí. Pro dosažení nejpřesnějších výsledků by se tedy měla pro výšky zatopení  $h_{kk}/H_0 < 0,875$  využít aproximační rovnice (2.20) a pro ostatní stavy Pavlovského křivku.

Tento způsob se zdá ovšem poněkud nepraktický. Proto bych nahradil kombinaci Pavlovského křivky a její aproximační rovnici výše uvedeným polynomem 6. stupně. Ten vychází z trendu naměřených hodnot (viz.: Obrázek 21 a Obrázek 22) a respektuje jak naměřená data, tak i průběh původních křivek.



Obrázek 22 Křivka polynomu 6. stupně upravující Pavlovského křivku

Aproximační rovnice této křivky zní:

$$\sigma = -18725,08 - 132268,2 \frac{h_{kk}}{H_0} + 388728,87 \left(\frac{h_{kk}}{H_0}\right)^2 + 608478,92 \left(\frac{h_{kk}}{H_0}\right)^3 - 535044,34 \left(\frac{h_{kk}}{H_0}\right)^4 + 250595,25 \left(\frac{h_{kk}}{H_0}\right)^5 - 48843,97 \left(\frac{h_{kk}}{H_0}\right)^6 \quad (4.5)$$

Poslední důležitou poznámkou je, že z výše zmíněných výsledků lze předpokládat počátek zatápění přepadu při hodnotách  $h_\sigma/H_0=0,8$  resp.  $h_{kk}/H_0=0,75$ .

Z důvodu obecné použitelnosti Berezinského křivky, která je omezena obdélníkovým korytem o neměnném průřezu za přelivem, bych doporučoval používat křivku Pavlovského.

## 4.5. Problematika úplavu za korunou

Neboť úplav za korunou a jeho vliv na průběh hladiny za korunou reprezentuje dominantní jev, je třeba ho vyjádřit. Pokusme se ho tedy definovat metodou po úsecích, která se počítá tímto vzorcem:

$$\Delta z = \frac{\alpha Q^2}{2g} \left( \frac{1}{S_d^2} - \frac{1}{S_h^2} \right) + \frac{Q^2}{K_P^2} \cdot \Delta L + \xi \cdot \left| \frac{\alpha(v_d^2 - v_h^2)}{2g} \right| ; K_P = C_P \cdot S_P \cdot \sqrt{R_P} \quad (4.6)$$

[18]

- Kde:  $\Delta z$  – rozdíl mezi horní a dolní počítanou hladinou ( $z_h - z_d$ ) [m]  
 $\Delta L$  – vzdálenost mezi počítanými úsecy [m]  
 $S_d, S_h$  – průtočná plocha dolního a horního příčného řezu [m<sup>2</sup>]  
 $v_d, v_h$  – střední průřezová rychlost v dolním a horním příčném řezu [m/s]  
 $C$  – Chezyho rychlostní součinitel,  $C = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6}$  [m<sup>0.5</sup>/s]  
 $n$  – Manningův součinitel drsnosti koryta [s/m<sup>1/3</sup>]  
 $R$  – Hydraulický poloměr,  $R = \frac{S}{O}$  [m]  
 $O$  – omočený obvod [m]  
 $K$  – modul průtoku [m<sup>3</sup>/s]  
 $\xi$  – součinitel místních ztrát způsobených změnou průřezu koryta [-]  
 $K_P, C_P, S_P, R_P$  – průměrné hodnoty daných veličin obou počítaných úseků

Tuto rovnici budeme aplikovat mezi profilem 3-3 a 4-4. Manningův součinitel drsnosti koryta byl odhadnut na  $n=0,009$ .  $\Delta L=L_d$ . Hlavním faktorem bude součinitel místní ztráty rozšíření  $\xi$ . Ten se pro náhlé rozšíření pohybuje od hodnot 0,5 až 1,0 [18]. Vypočteme tedy z dolní hladiny  $h_o$  hladinu nad koncem koruny  $h_{kk}$  pro součinitele ztráty rozšíření  $\xi=0,5$ ;  $\xi=0,75$ ;  $\xi=1,0$ . Následně porovnáme výsledné hodnoty s naměřeným  $h_{kk}$ .

	$h_{kk}$ [m]			Chyba $h_{kk}$ [%]; $\xi=0.5$		
	1. měř.	2. měř.	3. měř.	1. měř.	2. měř.	3. měř.
1. stupeň zat.	0.0929	0.0593	0.0774	-2.46	-4.82	-2.88
2. stupeň zat.	0.1050	0.0655	0.0850	-0.83	-2.85	-1.11
3. stupeň zat.	0.1224	0.0751	0.0979	0.54	-1.18	-0.60
4. stupeň zat.	0.1309	0.0875	0.1048	-0.40	0.08	-0.18
5. stupeň zat.	0.1447	0.0921	0.1205	-0.36	0.09	-0.03
6. stupeň zat.	0.1634	0.1231	0.1358	0.85	0.35	0.21
7. stupeň zat.	0.2222	0.1798	0.1726	0.24	-0.03	0.24
8. stupeň zat.	0.2716	0.2624	0.2426	-0.17	0.08	0.18
				Celkové $\phi$		-0.63

Tabulka 18 Výpočet výšky nad koncem koruny se součinitelem rozšíření  $\xi=0,5$

	$h_{kk}$ [m]			Chyba $h_{kk}$ [%] ; $\xi=0,75$		
	1. měř.	2. měř.	3. měř.	1. měř.	2. měř.	3. měř.
1. stupeň zat.	0.0990	0.0641	0.0826	4.03	2.82	3.66
2. stupeň zat.	0.1095	0.0692	0.0891	3.47	2.72	3.69
3. stupeň zat.	0.1255	0.0778	0.1009	3.14	2.38	2.42
4. stupeň zat.	0.1336	0.0894	0.1073	1.66	2.26	2.24
5. stupeň zat.	0.1468	0.0938	0.1223	1.10	1.92	1.48
6. stupeň zat.	0.1650	0.1240	0.1372	1.84	1.06	1.23
7. stupeň zat.	0.2230	0.1802	0.1734	0.59	0.18	0.70
8. stupeň zat.	0.2721	0.2626	0.2429	0.01	0.14	0.32
	Celkové $\phi$					1.88

Tabulka 19 Výpočet výšky nad koncem koruny se součinitelem rozšíření  $\xi=0,75$

	$h_{kk}$ [m]			Chyba $h_{kk}$ [%] ; $\xi=1,0$		
	1. měř.	2. měř.	3. měř.	1. měř.	2. měř.	3. měř.
1. stupeň zat.	0.1038	0.0676	0.0866	8.99	8.45	8.68
2. stupeň zat.	0.1133	0.0722	0.0925	7.04	7.17	7.64
3. stupeň zat.	0.1283	0.0801	0.1035	5.45	5.45	5.08
4. stupeň zat.	0.1361	0.0911	0.1096	3.53	4.24	4.42
5. stupeň zat.	0.1488	0.0954	0.1240	2.46	3.61	2.90
6. stupeň zat.	0.1665	0.1248	0.1385	2.79	1.75	2.20
7. stupeň zat.	0.2238	0.1805	0.1742	0.93	0.38	1.16
8. stupeň zat.	0.2725	0.2627	0.2433	0.18	0.20	0.47
	Celkové $\phi$					3.97

Tabulka 20 Výpočet výšky nad koncem koruny se součinitelem rozšíření  $\xi=1,0$

Jak je patrné z výsledků, nejmenší průměrné chyby při stanovení úrovně hladiny na konci koruny bylo dosaženo při aplikaci hodnoty součinitele místní ztráty  $\xi=0,5$ . Pro ještě přesnější určení součinitele ho lze interpolací optimalizovat na hodnotu  $\xi=0,56$ . Z tabulky výsledků pro nejlepší ze tří testovaných hodnot součinitelů  $\xi=0,5$  je patrné, že pro vyšší stupně zatopení predikované hloubky za korunou velmi dobře odpovídají naměřeným. Při nízkých stupních zatopení jsou predikované hloubky poněkud podhodnoceny, přičemž k jejich zvětšení by vedlo použití větší hodnoty součinitele  $\xi$ . Z toho vyplývá, že hodnota součinitele místní ztráty  $\xi$  se se zvyšující se hladinou dolní vody zmenšuje. Proto v rámci zjednodušení výpočtu je lepší volit střední hodnotu.

Další možnost řešení se naskýtá za pomoci věty o hybnosti proudu kapalin. Ta zní:

$$\Sigma \vec{F} = \beta \cdot \rho \cdot Q \cdot (\vec{v}_2 - \vec{v}_1) \quad (4.7)$$

[19]

Tedy pro dvě tlakové síly ve dvou profilech působící v korytě:

$$F_1 + \beta \cdot \rho \cdot Q \cdot v_1 = F_2 + \beta \cdot \rho \cdot Q \cdot v_2 \quad (4.8)$$

[17]

Kde:  $F$  – vnější síly [N]

$\beta$  – Boussinesquovo číslo [-]

$\rho$  – hustota kapaliny [kg/m<sup>3</sup>]

Boussinesquovo číslo uvažujeme  $\beta=1$ .

Příčemž vnější síly působící v našem případě budou síly hydrostatické. Tedy:

$$F = \rho \cdot g \cdot S \cdot z \quad (4.9)$$

[17]

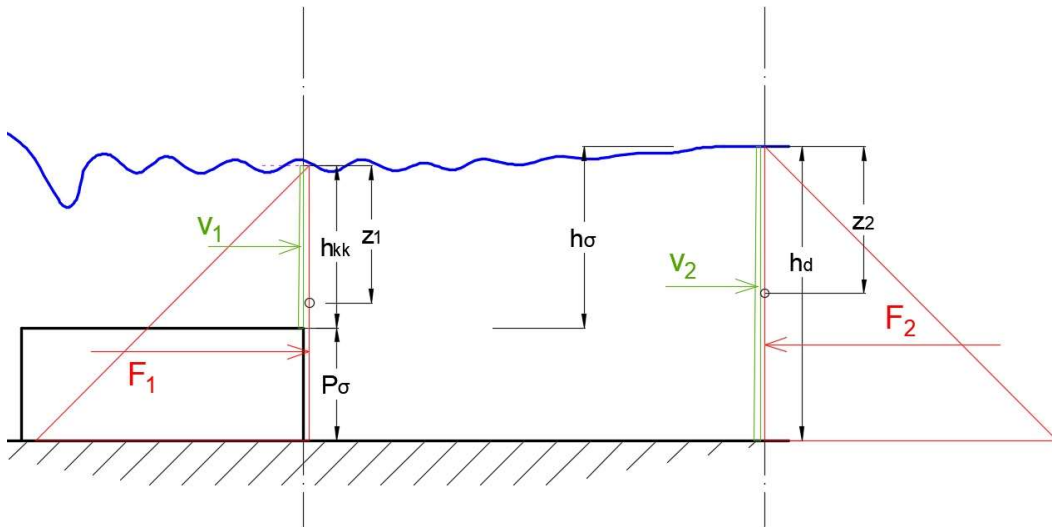
Kde:  $z$  – hloubky těžiště tlačných ploch

Pro obdélníkové koryto  $z = h/2$ . Kde tedy po dosazení a úpravě dostaneme rovnici:

$$\frac{Q^2}{gbh_1} + \frac{bh_1^2}{2} = \frac{Q^2}{gbh_2} + \frac{bh_2^2}{2} \quad (4.10)$$

[17], [9]

Pro náš případ využijeme větu hybnosti podobně jako je využita při vyjádření Bordovy ztráty. To znamená, že rychlostní složku rovnice v profilu 3-3 využijeme pouze výšku  $h_{kk}$  ovšem pro silovou složku rovnice využijeme celou výšku hladiny tedy  $h_{kk}+P_\sigma$ . V profilu 4-4 bude využita celá výška  $h_d$  pro obě složky. Viz.: Obrázek 23.



Obrázek 23 Koncept výpočtu úplavu větou o hybnosti proudu kapalin

V tabulce jsou uvedeny hodnoty  $h_{kk}$  vypočtené řešením výše popsané rovnice pro změřené hodnoty  $h_d$ .

1. měření		2. měření		3. měření	
$h_{kk}$ [m]	Chyba [%]	$h_{kk}$ [m]	Chyba [%]	$h_{kk}$ [m]	Chyba [%]
0.0932	-2.11	0.0617	-0.92	0.0787	-1.25
0.1046	-1.22	0.0670	-0.56	0.0856	-0.42
0.1215	-0.15	0.0758	-0.22	0.0979	-0.65
0.1300	-1.10	0.0877	0.31	0.1046	-0.41
0.1438	-1.02	0.0922	0.18	0.1201	-0.41
0.1624	0.28	0.1229	0.16	0.1353	-0.17
0.2215	-0.07	0.1796	-0.16	0.1721	-0.06
0.2711	-0.36	0.2623	0.02	0.2422	0.03
$\phi$	-0.72	$\phi$	-0.15	$\phi$	-0.42
Celkové $\phi$					-0.43

Tabulka 21 Výpočet  $h_{kk}$  za pomoci věty o hybnosti kapalin

Za použití této metody nám vycházejí poměrně přesné výsledky. Nevýhodou této metody je její limitované využití. V případě že by dolní čelo přelivu nebylo svislé, nebo by se postupně rozšiřovaly stěny koryta, tak by již nebylo možné ji použít.

## 4.6. Další možná řešení

### 4.6.1. Výpočet výšky přepadu za pomoci jetu v profilu 1-1

Jiným přístupem k řešení nedokonalého přepadu by byl předpoklad vytvoření menšího průtočného pole s navýšenou rychlostí pod hladinou v profilu 1-1. Tato myšlenka vznikla v asociaci s rovnicemi využívaných při výtoku pod stavidlem. Tím bychom následně mohli za pomoci Bernoulliho rovnice, jež by měla upravenou tlakovou a rychlostní složku, vypočítat přepadovou výšku  $h$ .

Pokud by tedy vznikl jet v profilu 1-1, zdá se pravděpodobné, že s narůstající výškou dolní vody a menším rozdílem přepadové výšky v profilu 0-0 a 1-1, by se postupně začal deformovat a rozšiřovat. Pokud by ovšem vydržel pro určité stavy stejný, nebo alespoň podobný, tak by nám pomohl k upřesnění výpočtu stavů při menším zatopení.

Zavedme tedy předpoklad, že výška jetu bude rovna výšce první vzájemné hloubky  $h_1$ . Z této hodnoty se pokusíme vypočítat odpovídající výšku hladiny  $h_1'$  (Obrázek 1). Výpočet bude proveden za pomoci věty o hybnosti, viz.: rovnice (4.10). Přičemž v profilu 1-1 bude pro rychlostní složku využita výška  $h_1$  a pro silovou složku výška  $h_1'$ . V profilu 3-3 bude využita pro obě složky výška  $h_{kk}$ .

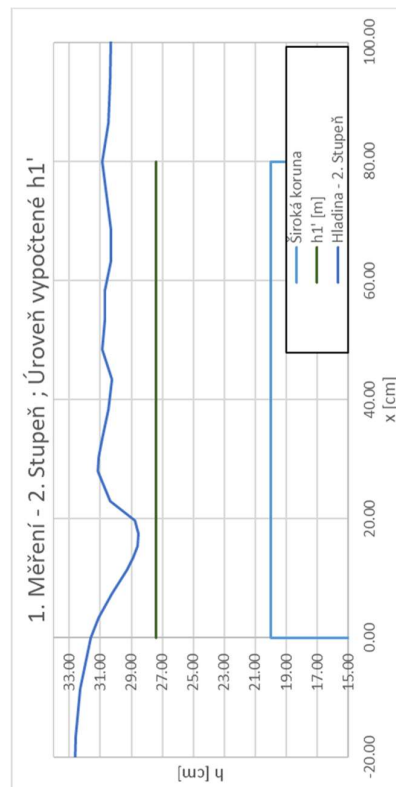
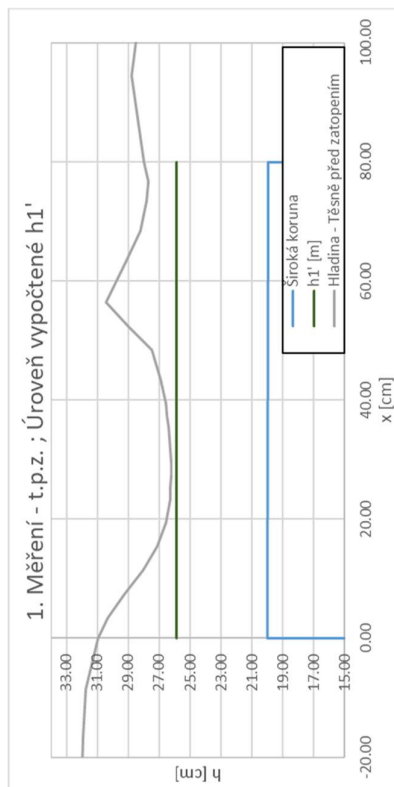
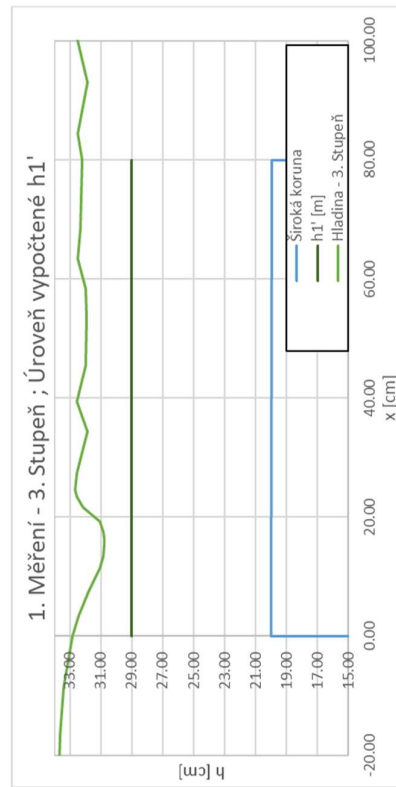
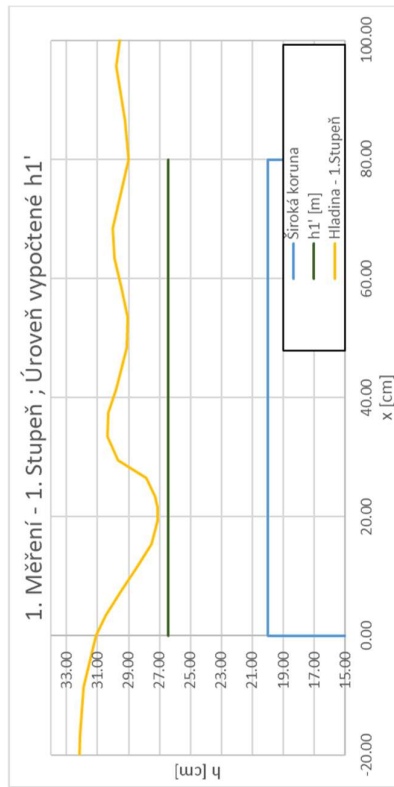
Kvůli značnému zvlnění hladiny (zejména při nižších stupních zatopení přepadu) je stanovení hloubky na konci koruny  $h_{kk}$  ze změřených podélných profilů pravděpodobně zatíženo větší možnou chybou. Pro další výpočty budou tedy použity hodnoty  $h_{kk}$  stanovené výpočtem aplikujícím větu o hybnosti ze změřené hloubky vody v dolním korytě  $h_d$ . (Tabulka 21).

	1. Měření		1. Měření		1. Měření	
	$h_1'$ [m]	$h_1' - h_1$ [m]	$h_1'$ [m]	$h_1' - h_1$ [m]	$h_1'$ [m]	$h_1' - h_1$ [m]
t.p.z.	0.0600	-0.0025	0.0429	0.0012	0.0516	0.0002
1. stupeň zat.	0.0657	0.0032	0.0437	0.0020	0.0546	0.0032
2. stupeň zat.	0.0748	0.0123	0.0476	0.0059	0.0603	0.0089
3. stupeň zat.	0.0911	0.0286	0.0557	0.0140	0.0717	0.0203
4. stupeň zat.	0.0998	0.0373	0.0678	0.0261	0.0787	0.0273
5. stupeň zat.	0.1148	0.0523	0.0728	0.0311	0.0954	0.0440
6. stupeň zat.	0.1348	0.0723	0.1060	0.0643	0.1122	0.0608
7. stupeň zat.	0.1987	0.1362	0.1666	0.1249	0.1519	0.1005
8. stupeň zat.	0.2514	0.1889	0.2527	0.2110	0.2266	0.1752

Tabulka 22 Výsledky hladiny  $h_1'$  vypočtené z podmínky  $jet = h_1$

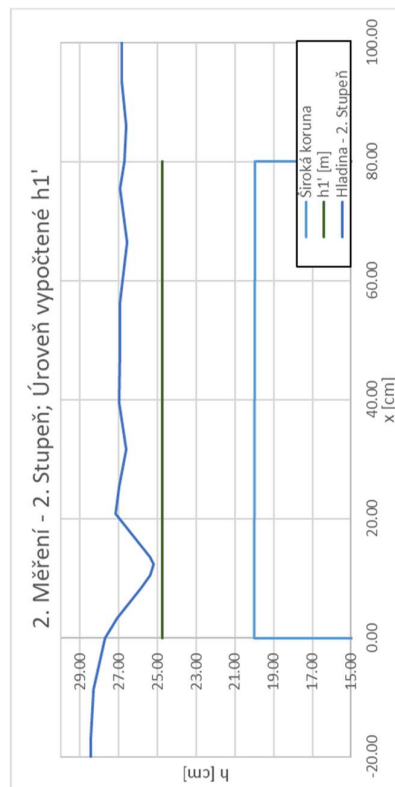
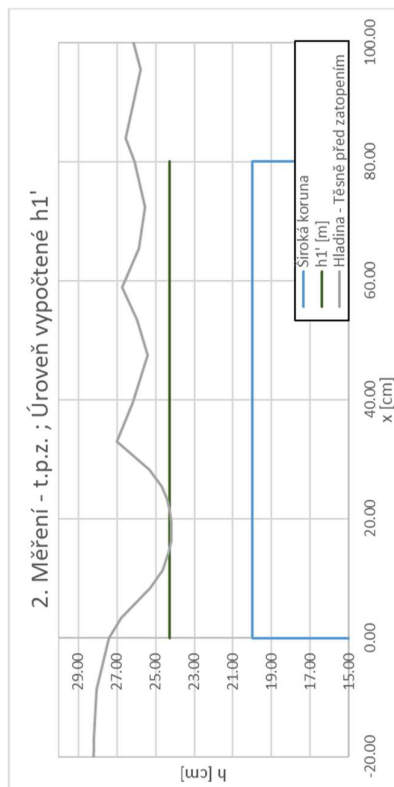
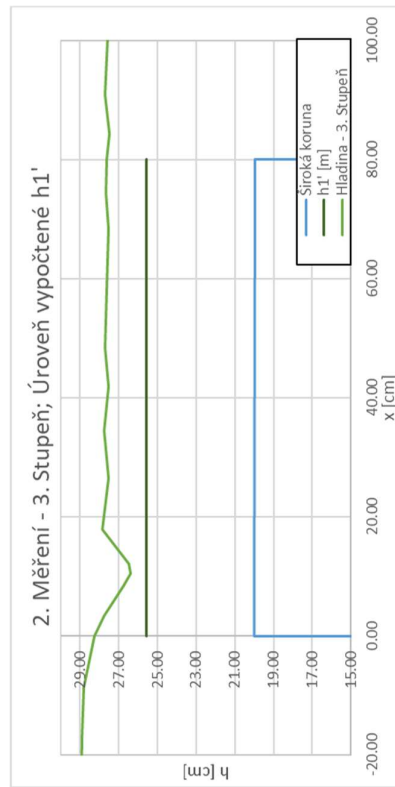
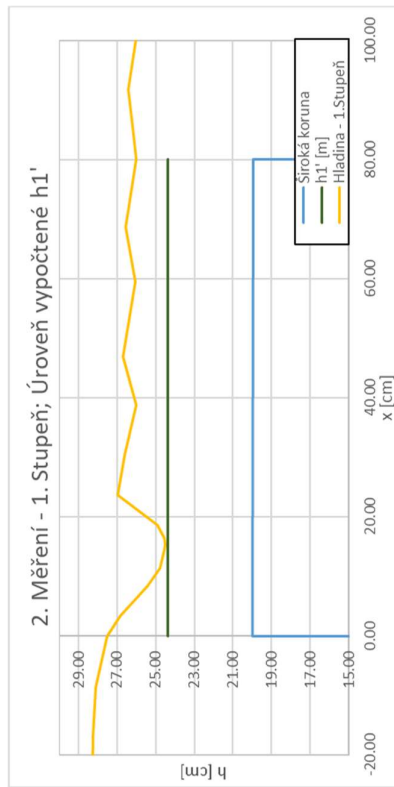
Z výsledků je patrné, že při stavech hladin t.p.z. si jsou hodnoty  $h_1$  a  $h_1'$  dosti podobné. Stav „t.p.z.“ by měl reprezentovat případ s přilehlým vodním skokem, kdy hloubka  $h_1$  je první vzájemnou hloubkou a  $h_{kk}$  druhou vzájemnou hloubkou vodního skoku, což při aplikaci věty o hybnosti právě odpovídá případu, kdy  $h_1 = h_1'$ .

Vykreslení takto stanovených hloubek do zaměřených podélných profilů hladin je provedeno v následujících obrázcích (Obrázek 24, Obrázek 25, Obrázek 26).

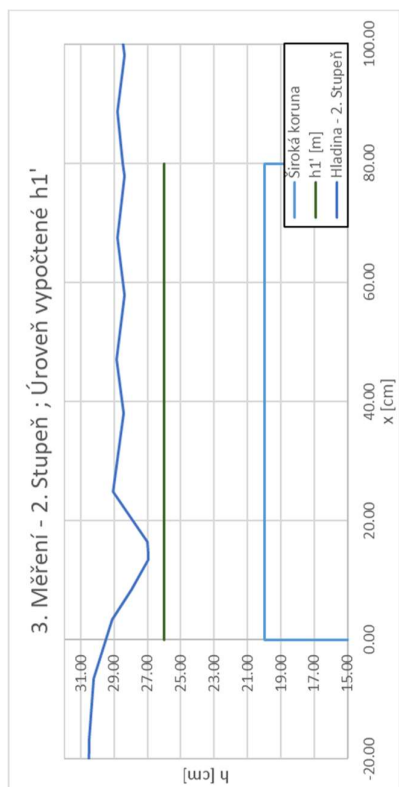
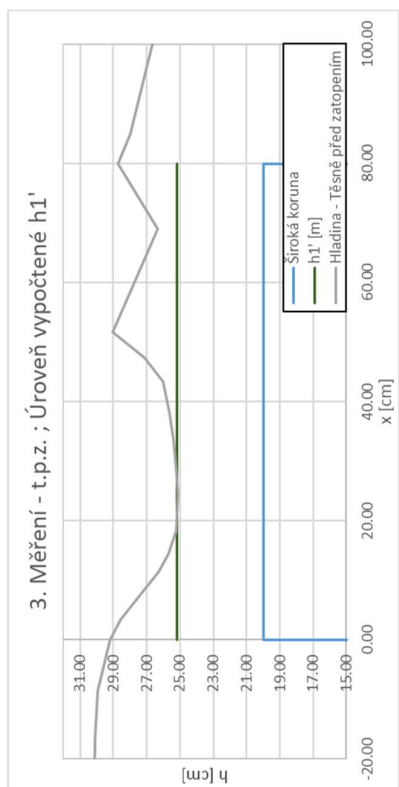
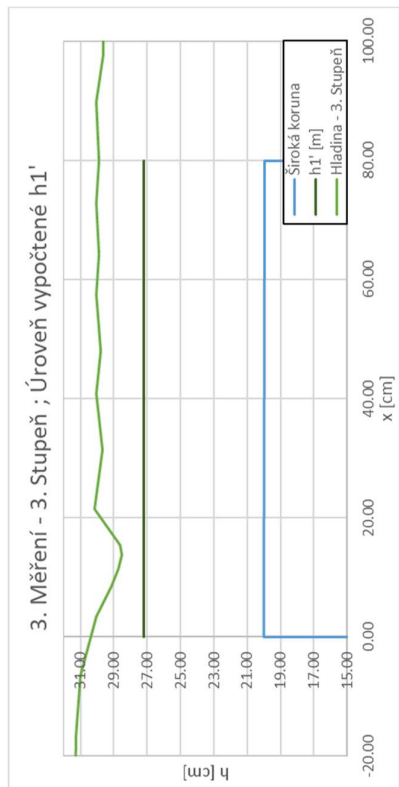
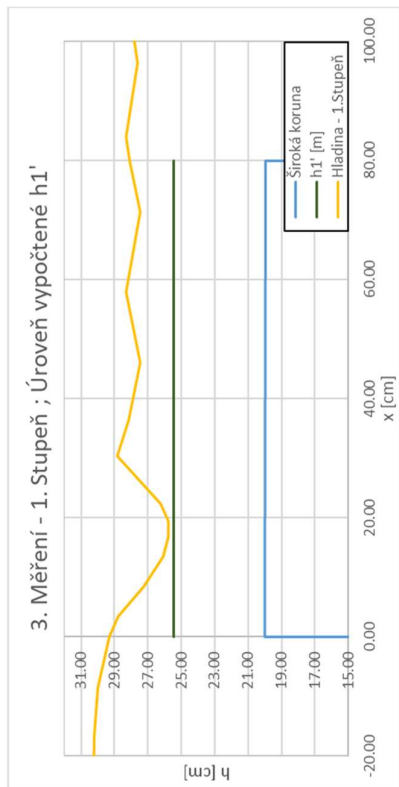


Obrázek 24 – 1. Měření - Vypočtené výšky hladin  $h_1'$  pro stav t.p.z. a 1. - 3. stupeň zatopení





Obrázek 25 – 2. Měření - Vypočtené výšky hladin  $h_1'$  pro stav t.p.z. a 1. - 3. stupeň zatopení



Obrázek 26 – 2. Měření - Vypočtené výšky hladin  $h_1'$  pro stav t.p.z. a 1. - 3. stupeň zatopení

Z uvedených obrázků je patrné, že již od poměrně malých stupňů zatopení je vypočítaná hloubka  $h_1'$  menší nejen oproti hloubce vody v místě původní zúžené hloubky  $h_1$ , ale dokonce je i menší než nejmenší hloubka na koruně. Na základě této skutečnosti je možno usoudit zvětšování výšky jetu při jeho zatápní, kdy v tomto profilu dojde ke zmenšení průtokové síly a tedy ke zvětšení síly tlakové (a tedy ke zvýšení hloubky  $h_1'$ , tedy úrovně vodní hladiny). Nelze tedy využít výšku jetu  $h_1$  pro výpočet rychlostní výšky v Bernoulliho rovnici pro výpočet přepadové výšky  $h$ .

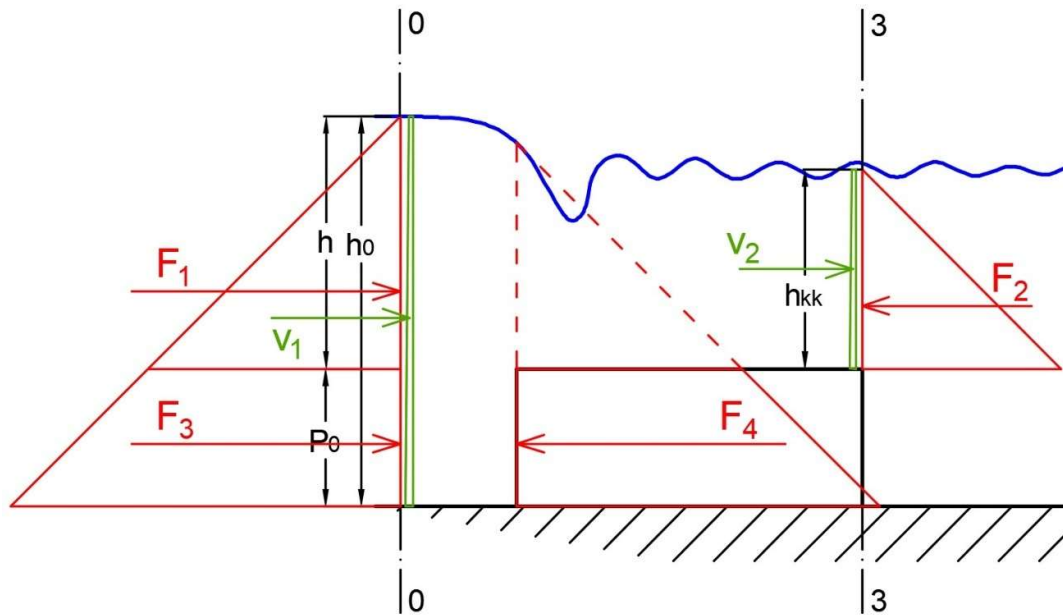
Dalším krokem ve zkoumání této metody bylo pokusit se z naměřené hloubky v profilu 1-1 vypočítat aplikací věty o hybnosti proudu kapaliny výšku jetu a případně se pokusit popsat průběh jeho rozšiřování. Bohužel v mnoha případech nebyla výška hladiny naměřena přímo v požadovaném profilu. Z toho důvodu se musely hodnoty interpolovat (což neodpovídá přirozenému průběhu hladin), a tím nám vycházely poměrně rozházené hodnoty. V několika případech nám i výška jetu vyšla nad interpolovanou hladinou, což by u neinterpolované hladiny byl fyzikální nesmysl. Indikuje to ovšem skutečnost, že výška jetu se při zvýšené hladině poměrně rychle deformuje a je přibližně stejná jako výška reálné hladiny.

Z těchto důvodů se nezdá být tato metoda pro náš případ příliš dobře uchopitelná a ani použitelná. Po teoretické stránce mi ovšem možnost vytváření jetu mezi profilem 0-0 a 1-1 přijde stále reálná.

#### 4.6.2. Výpočet přepadové výšky z profilu 3-3

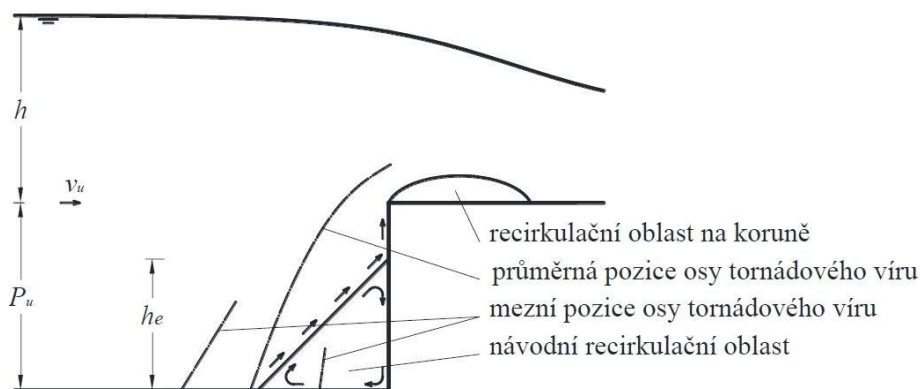
Jak je vidět v předchozích kapitolách, tak metody využívající větu o hybnosti proudu kapalin poměrně dobře udávají výšky hladin mezi dvěma profilem bez ohledu na dění mezi nimi. Můžeme se tedy pokusit touto metodou propojit profil 0-0 a profil 3-3.

Při tomto pokusu ovšem narazíme na několik problémů. Primární problém je stanovení tlakové síly  $F_4$  působící u čela koruny. Tyto síly budou závislé na výšce hladiny nad čelem koruny. Viz. Obrázek 27. Proto tedy, abychom dospěli k výsledku, by bylo třeba znát výšku této hladiny.



Obrázek 27 Koncept výpočtu přepadové výšky  $h$  za pomoci věty hybnosti

Pokud bychom ale přibrali v úvahu návodní recirkulační oblast a směr její cirkulace, jak uvádí Zachoval [14] (Obrázek 28). Lze vidět, že díky směru cirkulace by mělo docházet k zvyšování tlaku na návodní líc koruny. V důsledku toho by se měla zvýšit tlaková síla  $F_4$  (Obrázek 28). Zavedme tedy předpoklad, že  $F_3 \approx F_4$  a jelikož tyto dvě síly působí v navzájem opačných směrech, lze je vyřadit z rovnice.



Obrázek 28 Recirkulační oblast proudu před návodním lícem přelivu - Zachoval 2015 [14]

Při výpočtu rovnic (4.10) lze tedy jako silovou složku v profilu 1-1 brát pouze sílu  $F_1$  o hloubce  $h$  a rychlostní složku o hloubce  $h$ . V profilu 3-3 bude brána pro obě složky hloubka  $h_{kk}$ .

Pozn.: Neboť se pokoušíme nějakým způsobem ucelit výše zmiňované metody, budou pro  $h_{kk}$  brány vypočtené hodnoty z věty o hybnosti (Tabulka 21).

	1. Měření		2. Měření		3. Měření	
	h [m]	Chyba [%]	h [m]	Chyba [%]	h [m]	Chyba [%]
1. stupeň zat.	0.1225	-0.32	0.0831	0.07	0.1033	0.40
2. stupeň zat.	0.1278	0.09	0.0855	0.61	0.1064	0.30
3. stupeň zat.	0.1384	0.14	0.0902	0.63	0.1138	-0.01
4. stupeň zat.	0.1446	-0.01	0.0983	0.98	0.1184	-0.71
5. stupeň zat.	0.1553	-0.78	0.1017	0.62	0.1302	0.05
6. stupeň zat.	0.1711	0.13	0.1278	0.56	0.1429	0.29
7. stupeň zat.	0.2256	-0.27	0.1815	-0.21	0.1764	-0.22
8. stupeň zat.	0.2735	-0.15	0.2630	-0.03	0.2441	-0.13
	$\phi$	-0.15	$\phi$	0.40	$\phi$	0.00
					Celkové $\phi$	0.08

Tabulka 23 – Výsledky pro přepadovou výšku počítanou od konce koruny modifikovanou aplikací věty o hybnosti proudu kapalin

Jak je patrné, tak tato metoda udává poměrně přesné výsledky na mnou naměřených hodnotách. Největší chyba vyšla u 1. měření a to stále pod 1%. I přes poměrně přesné výsledky se ovšem jedná o postup poměrně dost zjednodušený. Navíc je opět možný jen pro homogenní obdélníkové koryto a korunu se svislým návodním lícem a s ostrou vstupní hranou. Dá se předpokládat, že při jiných vstupních hranách budou recirkulační oblasti jiných tvarů a velikostí

a náš předpoklad kde  $F_3 \approx F_4$  již nemusí být platný. Proto bych rád apeloval na obezřetnost při využití této metody a nutnost jejího dalšího přezkoumání.

#### 4.7. Posouzení všech metod

Pro možnost posouzení všech metod bylo nutné výsledné hodnoty přepočítat na jednotnou veličinu. Za tuto veličinu byla zvolena energetická přepadová výška  $H_0$ , neboť se vykytuje ve většině výpočtů. Poté byla vypočtena chyba energetické výšky vůči naměřeným hodnotám.

Byly posuzovány tyto metody:

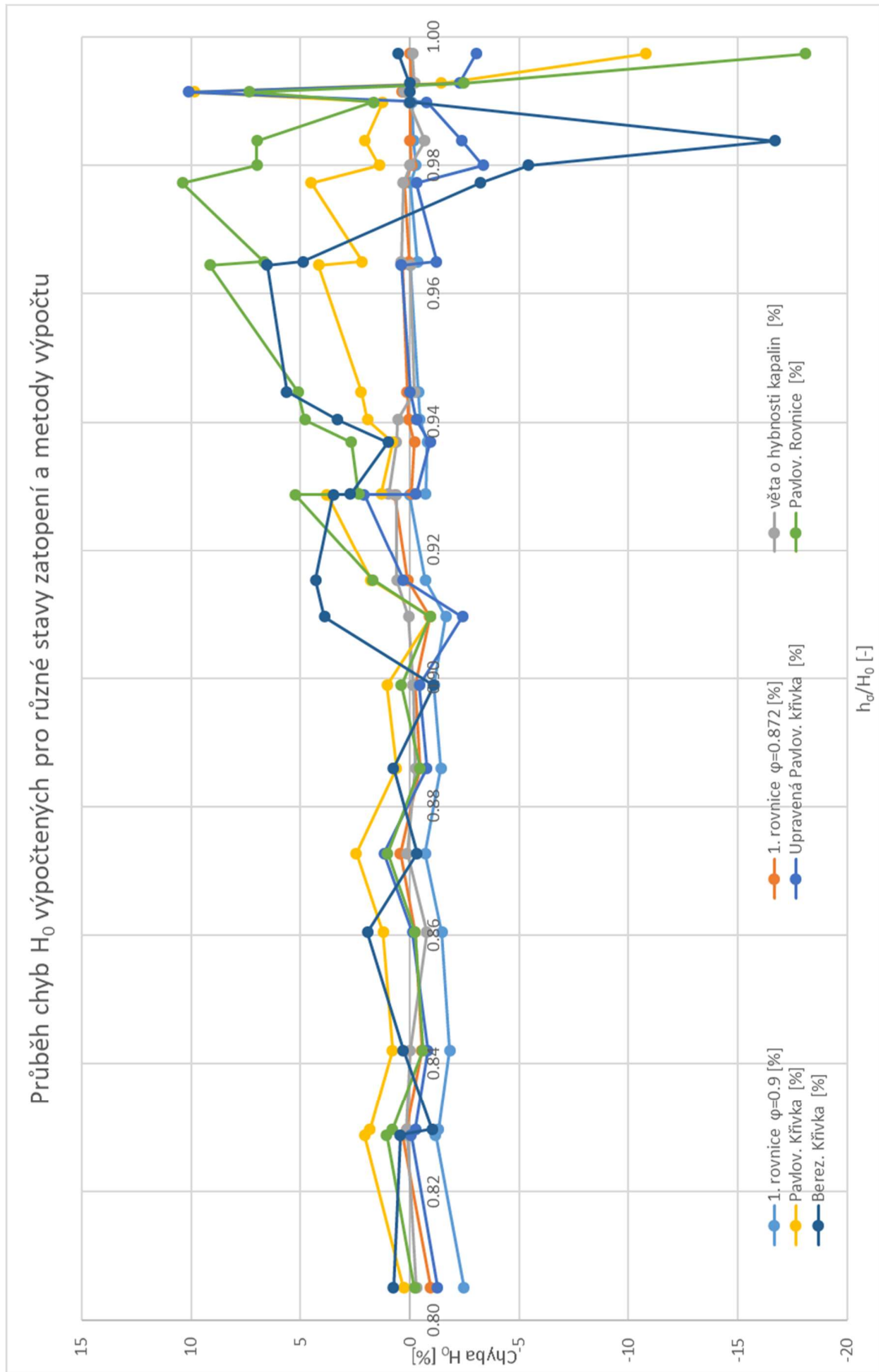
- Metoda A – Rovnice (2.16) při tabulkovém součiniteli rychlosti  $\varphi=0,900$  mezi profilem 0-0 a 1-1.
- Metoda B – Rovnice (2.16) při vypočteném součiniteli rychlosti  $\varphi=0,872$  mezi profilem 0-0 a 3-3.
- Metoda C – Výpočet přepadové výšky  $h$  využívající větu o hybnosti proudu kapalin mezi profilem 0-0 a 3-3. Následný přepočet  $h$  na Energetickou výšku přepadu  $H_0$ .
- Metoda D – Odečtená hodnota součinitele zatopení  $\sigma$  z Pavlovského křivky pro poměr  $h_{kk}/H_0$ . Následný výpočet  $H_0$  z rovnice (2.18) při vypočteném průměrném součiniteli přepadu  $m = 0,328$ .
- Metoda E – Odečtená hodnota součinitele zatopení  $\sigma$  z Pavlovského aproximační rovnice pro poměr  $h_\sigma/H_0$ . Následný výpočet  $H_0$  z rovnice (2.18) při vypočteném průměrném součiniteli přepadu  $m = 0,328$ .
- Metoda F – Odečtená hodnota součinitele zatopení  $\sigma$  z Berezinského křivky pro poměr  $h_\sigma/H_0$ . Následný výpočet  $H_0$  z rovnice (2.18) při vypočteném průměrném součiniteli přepadu  $m = 0,328$ .
- Metoda G – Odečtená hodnota součinitele zatopení  $\sigma$  z upravené sjednocené křivky polynomem pro poměr  $h_\sigma/H_0$ . Následný výpočet  $H_0$  z rovnice (2.18) při vypočteném průměrném součiniteli přepadu  $m = 0,328$ .

Výsledky byly seřazeny v závislosti poměrného zatápnění přepadu  $h_\sigma/H_0$ . Zelené hodnoty označují chyby, které jsou menší než 1%. Viz.: Tabulka 24.

	$h_0/H_0$ [m]	1. rovnice $\varphi=0.9$ [%]	1. rovnice $\varphi=0.872$ [%]	Věta o hybnosti kapalin [%]	Pavlov. Křivka [%]	Pavlov. Rovnice [%]	Berez. Křivka [%]	Upravená Pavlov. křivka [%]
2. Měř. 1. stup. zat.	0.8050	-2.478	-0.953	-0.308	0.2856	-0.2137	0.753	-1.26461
1. Měř. 1. stup. zat.	0.8288	-1.170	0.317	0.088	2.0652	1.0683	0.436	-0.05691
3. Měř. 1. stup. zat.	0.8297	-1.313	0.148	0.136	1.8255	0.7836	-1.019	-0.2567
2. Měř. 2. stup. zat.	0.8421	-1.832	-0.550	-0.013	0.789	-0.6031	0.304	-0.82558
3. Měř. 2. stup. zat.	0.8604	-1.462	-0.247	-0.762	1.2283	-0.237	1.931	-0.13068
1. Měř. 2. stup. zat.	0.8727	-0.712	0.446	0.124	2.4547	1.0083	-0.337	1.170498
2. Měř. 3. stup. zat.	0.8859	-1.413	-0.460	-0.266	0.6047	-0.4573	0.746	-0.766
3. Měř. 3. stup. zat.	0.8988	-1.098	-0.226	-0.144	1.0427	0.3984	-1.084	-0.44043
3. Měř. 4. stup. zat.	0.9096	-1.643	-0.910	0.064	-0.947	-0.9352	3.914	-2.41366
1. Měř. 3. stup. zat.	0.9152	-0.706	0.108	0.602	1.7824	1.6839	4.301	0.298241
1. Měř. 4. stup. zat.	0.9286	0.014	0.684	0.623	3.7813	5.2534	3.505	2.084904
2. Měř. 4. stup. zat.	0.9288	-0.737	-0.073	0.965	1.3099	2.3411	2.722	-0.27998
2. Měř. 5. stup. zat.	0.9368	-0.789	-0.215	0.610	0.783	2.683	0.990	-0.9411
1. Měř. 5. stup. zat.	0.9403	-0.457	0.047	0.553	1.9373	4.7941	3.290	-0.30368
3. Měř. 5. stup. zat.	0.9447	-0.391	0.117	-0.210	2.23	5.1036	5.618	-0.02357
3. Měř. 6. stup. zat.	0.9644	-0.014	0.351	-0.026	4.1674	9.1503	6.527	0.382513
1. Měř. 6. stup. zat.	0.9650	-0.345	0.030	0.393	2.1781	6.6855	4.896	-1.22875
2. Měř. 6. stup. zat.	0.9773	-0.004	0.253	0.297	4.5068	10.396	-3.205	-0.31073
3. Měř. 7. stup. zat.	0.9800	-0.275	-0.090	-0.008	1.3877	6.9943	-5.426	-3.3465
1. Měř. 7. stup. zat.	0.9838	-0.175	-0.023	-0.693	2.0396	7.0005	-16.677	-2.37717
2. Měř. 7. stup. zat.	0.9898	-0.094	-0.010	0.047	1.2518	1.6696	x	-0.76788
1. Měř. 8. stup. zat.	0.9914	0.257	0.340	0.287	9.8466	7.3244	x	10.11253
3. Měř. 8. stup. zat.	0.9928	-0.139	-0.071	-0.219	-1.455	-2.4431	x	-2.27699
2. Měř. 8. stup. zat.	0.9974	-0.033	-0.006	-0.133	-10.78	-18.086	0.524422	-3.03785
$\phi$		-0.709	-0.041	0.084	1.430	2.140	0.605	-0.292

Tabulka 24 Porovnání procentuálního zastoupení chyb Energetické přepadové výšky  $H_0$  při různých metodách výpočtu (světle zeleně jsou označeny hodnoty s chybou pod 1%)

Tyto výsledky byly také znázorněny graficky. Viz.: Obrázek 29.



Obrázek 29 Grafický souhrn průběhů chyb  $H_0$  pro různé metody a stavy zatopení

Z výsledných průměrných hodnot je vidět, že nejlépe vychází metoda B. To je ovšem dáno tím, že součinitel rychlosti  $\varphi$  byl upraven na základě našich měření. Důležitým poznatkem pro tuto metodu ovšem je, že vychází velmi dobře pro celou řadu našich průtoků. Je také patrné, že tedy rovnice (2.16) popisující metodu A a B je opravdu velmi přesná. Jediný problém této rovnice je její předpoklad pro využití v profilu 0-0 a 1-1. Z výsledků nám vychází, že je lepší využít profil 0-0 a 3-3 a zahrnout do rychlostního součinitele i ztráty na koruně. Bylo by tedy vhodné, aby se v budoucích letech tento součinitel pokusil někdo tabulkově vyjádřit.

Z průběhu metody C, která vyšla jako druhá nejlepší lze vidět, že její průběh je velmi blízko nulových hodnot chyb. Průběh nepodléhá, žádným drastickým výkyvům podobně jako u metody B. Výhodou metody C oproti zbylým metodám je, že není třeba žádného součinitele. Nevýhodou je její limitované použití.

Při odečtu a výpočtu součinitele zatopení v metodách D, E a F nám vycházejí pro nižší stavy zatopení relativně přesně. A to až do hodnoty zatopení  $h_{\sigma}/H_0 = 0,91$ . V těchto mezích zatopení ( $h_{\sigma}/H_0 < 0,91$ ) je i patrné, že případná chyba v měření má větší vliv na odchýlení od reálných hodnot než například metoda A a B. Tento jev, ale již vyplývá z podstaty těchto metod, a to odečtu hodnot z křivky. Tento fakt se maximálně projeví při zvyšování zatápení, kdy vykreslené křivky dostávají více horizontální tvar (viz.: Obrázek 4). Tím minimální chyba při určení poměru zatopení  $h_{\sigma}/H_0$ , nebo  $h_{kk}/H_0$  udá drasticky rozdílné hodnoty součinitele zatopení  $\sigma$ .

Jako třetí nejpřesnější vycházela metoda upravené Pavlovského křivky polynomem. Ta vycházela podobně jako u metod D, E a F poměrně přesně při nižších úrovních zatopení. Při vyšších zatopeních dolní vodou se přesnost této metody začala snižovat. Ovšem oproti metodám D, E a F udávala křivka přesnější hodnoty pro více stavů zatopení. Tuto metody dle výsledků lze využít pro kritérium  $h_{\sigma}/H_0 < 0,96$ .

Pozn.: Metoda D, E a F pro tabulkový součinitel přepadu ani nebyla porovnávána, neboť nejpřesnější hodnota vycházela s chybou větší než 3%, přičemž maximální chyba dosahovala hodnoty 22%.



## 5. Závěr

Cílem práce byla literární rešerše problematiky nedokonalého přepadu, posouzení stávajících výpočtů a vhodnost jejich využití při různých hydraulických podmínkách.

Nejprve byla provedena rešerše daného tématu. V ní bylo obsažena definice nedokonalého přepadu. Byly uvedeny postupy výpočtu nedokonalého přepadu v návaznosti na postupy výpočtu přepadu dokonalého. Během rešerše rovnic pro nedokonalý přepad byly vyhledávány problémové části daného tématu. Při této příležitosti byl také proveden rozbor proudění v oblasti za korunou s výskytem výrazného úplavu.

Následně byl popsán postup měření a měřicí nástroje. Poté byly uvedeny základní hodnoty vyplývající z daných měření. Z nich byla vyvozena první pozorování. Bylo dokázáno, že přepad se stává zatopeným i přes přítomnost nadkritického proudění na koruně. Dále byl vykreslený tvar úplavu za korunou a bylo vypořováváno, že délka úplavu koresponduje s délkou stoupání hladiny v dolním korytě  $L_d$ . Tato délka je přibližně devítinásobek výšky úplavu  $P_o$ . Byla také zjištěna misinterpretace vzorových vykreslení nedokonalého přepadu v podkladech. Ty neodpovídají nižším stavům zatápnění přepadu.

Prvním výpočtem bylo posouzení podmínek zatopení přepadu. Pro první vzájemné hloubky vodního skoku nad korunou byly vypočteny z rovnice pro vodní skok druhé vzájemné hloubky. Ty při posouzení s naměřenou hladinou na konci koruny pro případ těsně před zatopením přepadu vycházely ve dvou ze tří případů níž, než hladina naměřená, což by naopak mělo indikovat zatápnění vodního skoku a tedy i zatápnění přepadu. Jako vysvětlení této situace se nabízí možnost, že vodní skok má větší délku, než je vzdálenost konce koruny za zúženou hloubkou na koruně. Proto byla posouzena délka vlnovitého vodního skoku nad korunou dle údajů v literatuře, podle které by délka koruny měla být dostatečná. Z toho bylo usouzeno, že výpočet pro délku vlnovitého vodního skoku není, alespoň pro naše podmínky korektní, a je hoděn dalšího zkoumání.

Poté bylo provedeno posouzení první rovnice zatopeného přepadu tedy:  $Q = \varphi \cdot b \cdot h_{\sigma} \sqrt{2g(H_0 - h_{\sigma})}$ . Pro ni byly ověřeny hodnoty energetické přepadové výšky na základě výpočtu z hloubky ustálené hladiny v dostatečné vzdálenosti za přelivem a hloubky hladiny nad koncem koruny. Pro součinitelem rychlosti byla využita tabulková hodnota  $\varphi=0,900$ . Dle schémat z literatury by tam měla být úroveň hladiny z dolního koryta. To se ovšem nepotvrdilo a jako vhodnější se jeví zavedení hladiny z konce koruny. Ve výsledcích byly patrné rezervy, a tudíž byly přepočítány základní parametry koruny z nezatopeného přepadu. Z nich byla nalezena velká podobnost součinitele výškové kontrakce pro všechny tři průtoky a to  $\varepsilon_1 \approx 0,500$ . Hledaný součinitel rychlosti vyšel v průměru  $\varphi=0,928$ . Vzhledem k tomu, že byly výsledné hodnoty  $H_0$  podhodnoceny, potřebovali bychom menší rychlostní součinitel. Proto byl vypočten rychlostní součinitel mezi profilem 3-3 na konci koruny a profilem 0-0 v přítokovém korytě. Ten vycházel přibližně stejný pro všechny naměřené stavy a měl průměrnou hodnotu  $\varphi=0,872$ .

Dále byla posouzena 2. rovnice zatopeného přepadu  $Q = \sigma \cdot m \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2}$ . Pro ni byly odvozeny za pomoci výpočtu  $\sigma$  a odečtu z křivek Pavlovského a Berezinského a rovnice pro Pavlovského křivku hodnoty dolní vody. Ty byly následně porovnány s naměřenými hodnotami. Pro výpočet byla využita tabulková hodnota součinitele přepadu  $m=0,319$  i zprůměrovaná

vypočtená hodnota nezatopeného přepadu stanovená na základě vlastních měření, a to  $m=0,328$ . Z vypočtených chyb vyšlo najevo, že Berezinského křivka byla vytvořena pro hodnoty ustálené dolní vody v dolním korytě  $h_o$  a vycházela s nejmenší chybou. Měla ovšem také nejmenší rozsah použitelných hodnot. Jako druhá nejpřesněji vycházela aproximační rovnice pro Pavlovského křivku a nejhůře na tom s přesností byla křivka Pavlovského. Při posouzení grafického znázornění dat ovšem vyšlo najevo, že rovnice pro Pavlovského křivku výborně reprezentovala hodnoty pro nízké stavy zatopení. Byl tedy navrhnout postup využití Pavlovského rovnice pro poměrné výšky zatopení  $0,75 < H_{kk}/H_o < 0,875$  a pro zbylé hodnoty využít Pavlovského křivku. Tento postup je ovšem komplikovaný tak byla kombinace těchto metod nahrazena sjednocující křivkou polynomu 6. stupně. Dále byl z vyhodnocených dat aproximován počátek zatápní přelivu a to při  $h_o/H_o=0,8$  resp.  $h_{kk}/H_o=0,75$ .

Dále byla věnována pozornost změně hladiny v korytě za koncem koruny s výskytem mohutného úplavu za korunou. Nejprve se počítal metodou po úsecích a hledal se ztrátový součinitel náhlého rozšíření  $\xi$ , který by vyjádřil nárůst hladiny mezi koncem koruny a ustálenou hladinou v dolním korytě za korunou. Hladina nad koncem koruny byla vypočten pro sérii ztrátových součinitelů, a to  $\xi=1$ ,  $\xi=0,75$ ,  $\xi=0,5$ . Nejlépe vycházela hodnota  $\xi=0,5$ . Ta byla následně interpolována na nejlepší hodnotu  $\xi=0,56$ . Z výsledků bylo také patrné, že ztrátový součinitel se se zvyšující se hladinou dolní vody snižuje.

Poté byla zvolena jiná metoda, a to za pomoci věty o hybnosti proudu kapalin. Ta byla specificky využita pro tento případ, kdy je dolní čelo přelivu svislé. V profilu 3-3 byla brána pro rychlostní složku rovnice hloubka hladiny ke koruně přelivu a tlaková složka k patě přelivu. V dolním profilu 4-4 byla brána silová složka i rychlostní složka pro celý průřez. Touto metodou jsme získali poměrně velmi přesné hodnoty pro výšku hladiny nad koncem koruny.

Ke konci práce byla navrhována další možná řešení. Prvním z nich byl pokus o výpočet hladiny  $h_1'$  nad první vzájemnou hloubkou vodního skoku na koruně. Byl zaveden předpoklad, že voda bude proudit pod hladinou formou jetu, a to o hloubce právě první vzájemné hloubky nezatopeného vodního skoku  $h_1$ . K hledané hloubce vody jsem se pokusil dostat větou o hybnosti proudu kapalin z vypočtené hloubky nad koncem koruny. Tento pokus ovšem skončil nezdarem, neboť výsledná hladina  $h_1'$  se již při malých navýšení hloubky dolní vody rychle vzdalovala od naměřených hladin. Tím bylo zřejmé, že jet nemá stejnou hloubku jako  $h_1$ .

Poslední navrhovanou metodou byl pokus dostat se větou o hybnosti kapalin proudu z hladiny v profilu 3-3 k hladině v profilu 0-0. To bylo ovšem komplikováno silovou složkou, která působí na návodním líci koruny. Byl tedy zaveden předpoklad, že vlivem návodní recirkulační oblasti se silové složky pod úrovní vrcholu koruny vykrátí. Tím byl výpočet zjednodušen tak, že se v profilu 0-0 brala silová složka o výšce  $h$  a rychlostní složka o výšce  $h_o$ . V profilu 3-3 se brala hloubka  $h_{kk}$  pro obě složky. Z této metody jsme dostali velmi dobré výsledky, všechny s přesností pod 1%. Tato metoda je ovšem limitovaná na tento konkrétní případ. Při změně nátokové hrany, nebo změně sklonu stěn koryta, by již pravděpodobně nebyla funkční.

V závěru práce bylo provedeno porovnání všech metod výpočtu. Z nichž vyplývá, že rovnice zatopeného přepadu (2.16) při tabulkovém součiniteli rychlosti  $\varphi=0,9$  je použitelná v rozmezí poměrného zatopení  $h_o/H_o > 0,91$ . Nejlépe vycházela rovnice zatopeného přepadu (2.16) s upraveným součinitelem rychlosti  $\varphi=0,872$ . Druhá nejlepší vyšla metoda při využití věty

o hybnosti proudu. Rovnice popisující Pavlovského křivku, Pavlovského křivka a Berezinského křivka jsou doporučeny pro výpočet při znalosti součinitele nezatopeného přepadu  $m$  pro konkrétní tvar koruny, v mezích zatopení  $h_{\sigma}/H_0 < 0,91$ . Přičemž Pavlovského křivka v těchto mezích udává nejméně přesné výsledky. Upravená Pavlovského křivka vyšla jako třetí nejpřesnější metoda a dle výsledků je použitelná pro kritérium  $h_{\sigma}/H_0 < 0,96$ .

Do budoucna bych rád doporučil přezkoumání tabulkových součinitelů dokonalého přepadu a také výzkum součinitelů přepadu pro rovnici zatopeného přepadu s využitím profilů 0-0 a 3-3. Dobré by také bylo přezkoumání úseku rozšíření proudu za přelivem.

Na úplný závěr bych chtěl uvést, že měření i využití v této práci trvalo po velmi dlouhou dobu. Proto bych rád nabídl tato naměřená data pro případný budoucí výzkum. V případě zájmu mě kontaktujte na emailové adrese: [flaks.martin@hotmail.com](mailto:flaks.martin@hotmail.com) .

## Seznam použité literatury

1. **Havlík, Aleš a Pícek, Tomáš.** HY2V\_06\_Přepady. *Hydraulika 141 HYA*. [Online] [Citace: 11. Října 2018.] <http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/prednasky.htm>.
2. **Havlík, Vladimír a Marešová, Ivana.** *Hydraulika 11 příklady*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2001.
3. **Mäsiar, Ernest a Kamenský, Jozef.** *Hydraulika pre stavebných inženierov /I/*. Bratislava : Alfa, 1986.
4. **Havlík, Vladimír a Marešová, Ivana.** *HYDRAULIKA (příklady)*. Praha : Ediční středisko ČVUT, 1988.
5. **Patočka, Cyril.** *Hydraulika 1. část*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1965.
6. **Bém, Jiří, Bémová, Ivana a Patočka, Cyril.** *Základy hydrauliky a hydrologie*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
7. **Kolář, Václav, a další.** *Technický Průvodce - Hydraulika*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1966.
8. **Agroskin, I. I., Dimitrijevič, G. T. a Píkalov, F. I.** *Гидравлика*. Moskva, Leningrad : Государственное Энергетическое издательство, 1954.
9. **Kolář, Václav, Patočka, Cyril a Jiří, Bém.** *Hydraulika*. Praha : Vydavatelství technické a ekonomické literatury - Alfa, 1983.
10. **Havlík, Vladimír a Marešová, Ivana.** *Hydraulika II Příklady*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1995.
11. **Boor, Boris, Kunštánský, Jiří a Patočka, Cyril.** *Hydraulika pro vodohospodářské stavby*. Praha : Nakladatelství technické literatury, 1968.
12. **Flaks, Martin.** Průběh hladiny při dokonalém přepadu přes širokou korunu. *ČVUT DSpace*. [Online] 28. Květen 2017. [Citace: 15. Září 2018.] <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68725/F1-BP-2017-Flaks-Martin-BP.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
13. **Nikolov, N. A., a další.** Hydraulic calculation of a submerged broad-crested weir. *Hydrotechnical Construction*. 1978, Sv. 12, 6.
14. **Zachoval, Zbyněk.** *Přelivy se širokou korunou pravoúhlého příčného průřezu*. Brno : VUTIUM, 2015.
15. **Zachoval, Zbyněk, a další.** Zone of flow separation at the upstream edge of a rectangular broad-crested weir. *DE GRUYTER*. [Online] 14. Prosinec 2012. <https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/johh.2012.60.issue-4/v10098-012-0025-0/v10098-012-0025-0.xml>.
16. **Engineers, US Army Corps of.** HEC-RAS - River analysis system -Hydraulic Reference Manual. *Hydrologic Engineering Center*. [Online] US Army Corps of Engineers, 2 2016. [Citace: 6. 12 2018.]

<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf>.

17. **Havlík, Aleš a Pícek, Tomáš.** HY2V\_07\_Vodní skok. *Hydraulika 141 HYA*. [Online] [Citace: 20. Listopad 2018.]

<http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/prednasky.htm>.

18. —. HY2V\_05\_Proudění v korytech. *Hydraulika 141 HYA*. [Online] [Citace: 12. Říjen 2018.]

<http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/prednasky.htm>.

19. —. HY2V\_03\_Základy hydrodynamiky. *Hydraulika 141 HYA*. [Online] [Citace: 11. Prosince 2018.]

[http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke\\_stazeni/prednasky/HY2V\\_03\\_Zaklady\\_hydrodynamiky.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/prednasky/HY2V_03_Zaklady_hydrodynamiky.pdf).

## Seznam symbolů

- $\alpha$  – Coriolosovo číslo, neboli součinitel kinetické energie [-]
- $\beta$  – Boussinesquovo číslo [-]
- $\Delta z$  – rozdíl mezi horní a dolní počítanou hladinou ( $z_h - z_d$ ) [m]
- $\Delta L$  – vzdálenost mezi počítanými úseky [m]
- $\sigma$  – součinitel zatopení [-]
- $\phi$  – průměrná hodnota daných veličin
- $\rho$  – hustota kapaliny [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $\xi$  – součinitel místních ztrát způsobených změnou průřezu koryta [-]
- $\Sigma \xi$  – suma součinitelů místních ztrát
- $C$  – Chezyho rychlostní součinitel,  $C = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6}$  [ $\text{m}^{0.5}/\text{s}$ ]
- $F$  – vnější síly [N]
- $g$  – konstanta gravitačního zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ]
- $h$  – přepadová výška [m]
- $H_0$  – energetická přepadová výška [m]
- $h_1, h_2$  – hloubka v daném profilu [m]
- $h_1'$  – skutečná hloubka vody v místě první vzájemné hloubky
- $h_c$  – kritická hloubka [m]
- $h_d$  – hloubka vody v korytě za přelivem [m]
- $h_{kk}$  – hloubka vody nad koncem koruny [m]
- $h_\sigma$  – výška hladiny v korytě za přepadem na úrovni koruny přelivu [m]
- $K$  – modul průtoku [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $K_p, C_p, S_p, R_p$  – průměrné hodnoty daných veličin obou počítaných úseků
- $L_d$  – délka potřebná k ustálení hladiny za přelivem [m]
- $L_s$  – délka vlnovitého vodního skoku od první vlny [m]
- $n$  – Manningův součinitel drsnosti koryta [ $\text{s/m}^{1/3}$ ]
- $O$  – omočený obvod [m]

$P_{\sigma}$  – výška zadní části koruny [m]