

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra hydrauliky a hydrologie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Průběh hladiny při dokonalém přepadu 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 2017



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Flaks

Jméno: Martin

Osobní číslo: 423077

Zadávající katedra: Katedra hydrauliky a hydrologie

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Průběh hladiny při dokonalém přepadu přes širokou korunu

Název bakalářské práce anglicky: Water surface profile over non-submerged broad-crested weir

Pokyny pro vypracování:

V rámci řešení dané problematiky se zaměřte především na: literární rešerši problematiky proudění přes širokou korunu se zaměřením na průběh hladiny při nezatopeném přepadu (níže uvedený seznam doporučené literatury případně doplňte o další zdroje); rozbor a posouzení přístupů vedoucích ke stanovení charakteristických hloubek nad širokou korunou pro základní geometrii (obdélníkový příčný profil koryta, obdélníkový tvar široké koruny); případný návrh úprav ve stávajících přístupech či navržení vlastních přístupů a jejich ověření v laboratorních podmínkách.

Seznam doporučené literatury:

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

KOLÁŘ, V. a kol. (1966). „Technický průvodce - hydraulika“, Státní nakladatelství technické literatury, Praha.

KOLÁŘ, V., PATOČKA, C., BÉM, J. (1983). „Hydraulika“, Státní nakladatelství technické literatury, Praha.

PATOČKA, C. (1949) „Přepad vpdy přes širokou korunu“, Sborník Vysoké školy inženýrského stavitelství - svazek 11, ČVUT v Praze, Praha

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

ZACHOVAL, Z., MISTROVÁ, I., ROUŠAR, L., ŠULC, J., ZUBÍK, P. (2012). "Zone of Flow Separation at the Upstream Edge of Rectangular Broad-Crested Weir, JHH, 60/4, str. 288-298, SLOVAK ACAD SCIENCES, Bratislava

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Tomáš Pícek, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 21. 2. 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 28. 5. 2017

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

Podpis vedoucího práce

Podpis:

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantu je nutné uvést v bakalářské 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“.

21.2.2017

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

Martin Flaks

Anotace

Tato Bakalářská práce se zabývá průběhy hladin při dokonalém (nezatopeném) přepadu přes širokou korunu v obdélníkovém korytě za různých poloh hladin spodní vody. Práce porovnává vykreslení a výpočty průběhu hladin v literatuře hydrauliky a průběhy zaznamenaných při reálném měření na modelech. Tato práce je zaměřena na jasně vyhraněné spektrum jak rozměrů a geometrie široké koruny, tak typů proudění definujících vlnovitý vodní skok. Součástí práce je posouzení vzniku vlnitého vodního skoku nad korunou, porovnání součinitelů výškové kontrakce s obecnou rovnicí vzájemných hloubek vodního skoku a jejich posouzení.

Klíčová slova

široká koruna, měření průběhů hladin, vliv spodní vody, vlnovitý vodní skok

Annotation

This Bachelor's thesis is focused on water surface profiles over non-submerged broad-crested weir in rectangular mangle influenced by different levels of water surface under the weir. The thesis compares water surface profiles and equations in literature of hydraulics with the measurements of water surface profiles on the models. This work is focused on predefined dimensions and geometry of broad-crested weir and on types of flow causing the undular hydraulic jump. The main parts of the thesis are assessment of the creation of undular hydraulic jump above the weir and comparison and evaluation of height contraction coefficients with general equation of mutual depths of hydraulic jump.

Key words

broad-crested weir, measurements of the water surface profile, influence of water under the weir, undular hydraulic jump

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval za výborné konzultace, výpomoc a rady Ing. Tomáši Pickovi, Ph.D., jehož trpělivá ruka mě vedla po celou dobu mé práce.

Dále bych rád poděkoval mým rodičům a M.D. za podporu. V neposlední řadě patří poděkování Z.V. za její pomoc.

Obsah

Anotace	1
Klíčová slova	1
Annotation	1
Key words.....	1
Poděkování.....	2
Obsah	3
1. Úvod	5
2. Dokonalý přepad přes širokou korunu.....	6
2.1. Široká koruna	6
2.2. Dokonalý přepad	6
3. Hydraulika dokonalého přepadu přes širokou korunu	7
3.1. Základní typy průběhů hladin	7
3.2. Výpočet přepadu.....	9
4. Vodní skok	11
4.1. Obecný vztah mezi vzájemnými hloubkami.....	12
4.2. Vlnovitý vodní skok	12
5. Průběhy hladin při měření a jejich prezentace v literatuře	14
5.1. Schématické vykreslení průběhů hladin v literatuře.....	14
5.2. Průběhy hladin naměřených na modelech	17
6. Posouzení naměřených hodnot při přepadu přes širokou korunu bez vlivu spodní vody..	20
6.1. Základní meze přepadu a rozměry široké koruny	20
6.2. Porovnání měření a výpočtů	20
6.2.1. Přepočtení tabulky součinitelů kontrakce.....	20
6.2.2. Výpočet za pomoci tabulkových součinitelů kontrakce	21
6.2.3. Posouzení vzniku vodního skoku.....	24
7. Vlastní měření	28
7.1. Nastavení průtoku a měřicí nástroje.....	29
7.2. Naměřené hladiny.....	30
7.2.1. První měření	32
7.2.2. Druhé měření	33
7.2.3. Třetí měření.....	34
7.2.4. Čtvrté měření	35
7.2.5. Páté měření.....	36

7.2.6.	Šesté měření.....	37
8.	Vyhodnocení měření.....	38
8.1.	Průběh hladin pouze v bystřinném proudění nad korunou.....	38
8.1.1.	Navýšení hladiny u středu koruny.....	38
8.1.2.	Porovnání 1. měření s měřením od Zachovala.....	39
8.2.	Průběh hladin s říčním prouděním nad korunou.....	40
8.2.1.	Rovnice vodního skoku.....	40
8.2.2.	Posouzení zkrácené rovnice pro vlnovitý vodní skok.....	42
9.	Závěr.....	46
	Seznam použité literatury.....	48
	Seznam symbolů.....	50

1. Úvod

Práce se zabývá problematikou přepadu přes širokou korunu se zvláštním zaměřením na charakteristické hodnoty průběhu vodní hladiny nad korunou pro případ dokonalého přepadu. V úvodní části je popis široké koruny a její hydraulické vlastnosti. Následně jsou prezentovány průběhy hladin v literatuře. Ty jsou popsány a porovnány s převzatými měřeními. Následně jsou doplněny výpočty a grafické výsledky. Bylo provedeno posouzení vzniku vodního skoku bez vlivu spodní vody. Poté následuje kapitola vlastního měření průběhů hladin s vlivem spodní vody a vyhodnocení dat. Vyhodnocení naměřených průběhů hladin se zabývá pozorováním příčných vln, posouzení součinitelů výškové kontrakce, rovnicí vlnovitého vodního skoku, obecnou rovnicí vzájemných hloubek vodního skoku. V závěru práce je shrnuty výsledky celé práce a vyzorované nesrovnalosti.

2. Dokonalý přepad přes širokou korunu

Nejprve je třeba definovat terminologii, respektive rozdíl mezi přepadem a přelivem. Přepadem se nazývá hydraulický jev, který je způsoben vodou přepadající přes přeliv a přeliv je samotnou konstrukcí [1].

2.1. Široká koruna

Široká koruna je jeden z několika typů přelivů. Je to široký práh vystupující nade dno toku, jehož horní část je vodorovná a šířka tohoto objektu je dostatečně široká, aby proud přilnul ke koruně a procházel s ní přibližně rovnoběžně [2], [3], [4]. Tento jev byl vypořádán z pokusů a nastává dle literatury hydrauliky v případě, kdy je splněna tato podmínka:

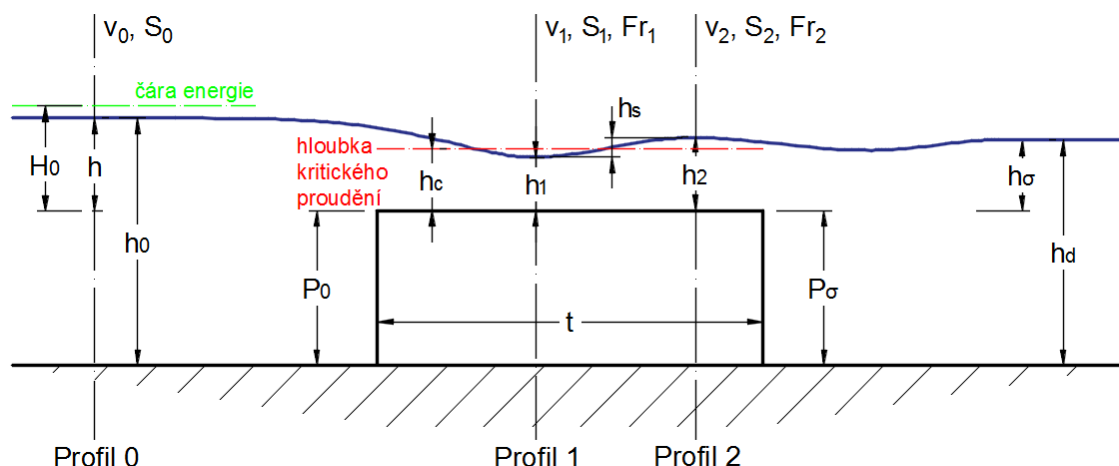
$$(2 \text{ až } 3)h \leq t \quad (2.1)$$

[1], [2], [4], [5], [6]

Jak uvádí Zachoval [7] dle ČSN ISO 3846, 2012, je široká koruna definována:

$$2.5h < t \leq 10h \quad (2.2)$$

Kde: h – přepadová výška
 t – tloušťka koruny



Obrázek 1 Vzorové schéma pro příčný řez dokonalým 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 práce se bude odkazovat na vykreslení přepadů široké koruny z různých zdrojů. V naskenovaných obrázcích průběhů hladin mohou být popisovány jednotlivé hodnoty rozdílně. Tyto obrázky budou vždy označeny slovem „sken“ aby nedocházelo k nedorozumění. Tyto obrázky nebyly alterovány z důvodu zachování přesného vykreslení tvaru hladin od daných autorů.

2.2. Dokonalý přepad

Neboť je tato práce zaměřena na dokonalý přepad, je nutné vyjádřit, jak je přepad z hydraulického hlediska definován a jaký je rozdíl mezi dokonalým a nedokonalým přepadem.

Dokonalým přepadem se rozumí, když hladina vody za přepadem neovlivňuje přepadový průtok, respektive nemá vliv na hladinu h_0 v přítokovém korytě [2], [7]. Neboli nedokonalý přepad nastává v případě, že hladina spodní vody h_d zatopí druhou vzájemnou hloubku na koruně h_2 [8]. Tento vztah lze vyjádřit:

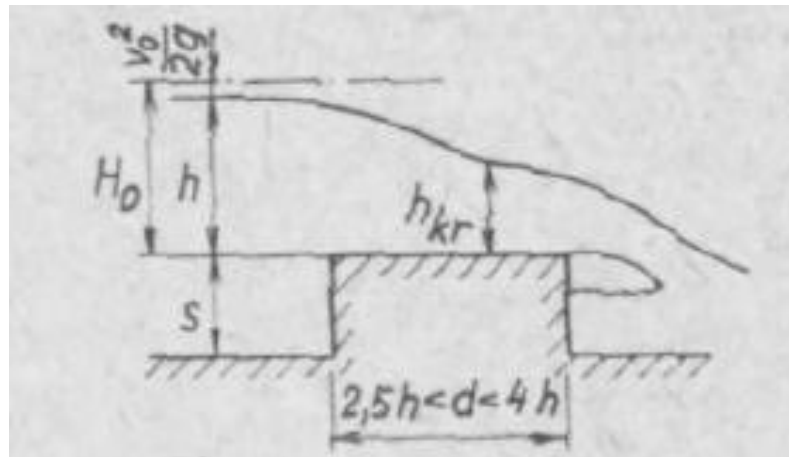
$$h_\sigma > h_2 \quad (2.3)$$

[1], [2], [3], [4], [8]

3. Hydraulika dokonalého přepadu přes širokou korunu

3.1. Základní typy průběhů hladin

Pro dokonalý přepad se rozeznávají dva základní průběhy hladin, které se dle literatury hydrauliky vyskytují v závislosti na délce koruny t a přepadové výšce h . Základní dělení budeme prezentovat od Koláře z roku 1966 [3]. Prvním z nich vypadá takto:



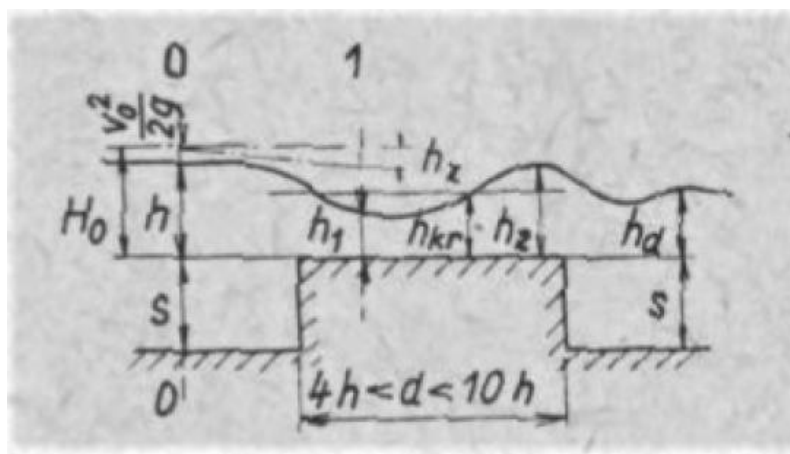
Obrázek 2 [3], Dokonalý přepad **Typ A** (sken) (čerchovaná čára znázorňuje čáru energie)

V tomto případě hladina nad korunou klesne pod kritickou hloubku a dále probíhá v bystřinném proudění až na konci přepadá. Tento přepad se vyskytuje v rozmezí:

$$2.5h < t \leq 4h \quad (3.1)$$

[3]

Druhý případ základního průběhu hladiny vypadá takto:

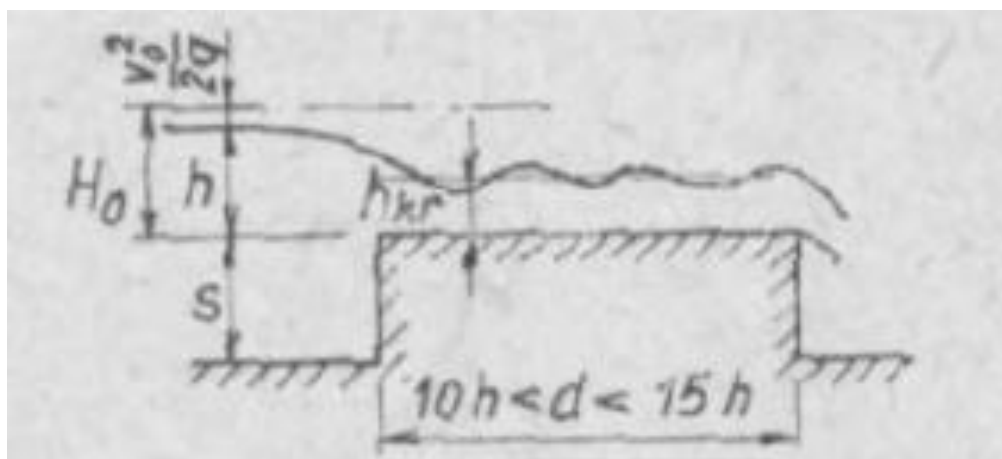


Obrázek 3 [3], Dokonalý přepad **Typ B** (sken) (čerchovaná čára znázorňuje čáru energie)

V tomto případě hladina dle literatury nejdříve klesne pod hloubku kritického proudění $h_c > h_1$ a následně vystoupá nad hloubku kritického proudění $h_c < h_2$ (Obrázek 1). Tento typ průběhu hladin se dle literatury [3], [8], pohybuje v rozmezí:

$$4h < t < 10h \quad (3.2)$$

Za zmínku stojí ještě třetí průběh hladin, který uvádí pouze autor Kolář [3], [8].



Obrázek 4 [3], Dokonalý přepad **Typ C** (sken) (čerchovaná čára znázorňuje čáru energie)

Kolář konstatuje, že široká koruna je definována až do hodnoty $t < 14 \div 15h$, tudíž zahrnul 3. druh průběhu hladin při dokonalém přepadu. A to že na hladině se vytvoří vlněný povrch, jež osciluje nad a pod h_c . Tento případ platí pro rozmezí:

$$[3], [8] \quad 10h < t < 15h \quad (3.3)$$

Průběhům hladiny se budeme věnovat důkladněji v 5. kapitole, ovšem základní dělení je třeba uvést pro orientaci v následujících kapitolách.

3.2. Výpočet přepadu

Přepad přes širokou korunu lze počítat dvěma způsoby. Oba dva způsoby vyplývají z upravené Bernoulliho rovnice, kterou v první případě vyjádříme pro profily 0 a 1 (viz Obrázek 1):

$$h + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} = h_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + Z \quad (3.4)$$

[1], [2], [3], [4], [5], [6]

Kde: h – přepadová výška [m]

h_1 – hloubka v daném profilu [m]

v_0 – přítoková rychlost [m/s]

v_1 – střední průřezová rychlost v daném řezu [m/s]

g – gravitační zrychlení [m/s²]

α – Coriolosovo číslo, neboli součinitel kinetické energie [-]

Uvažujeme že $\alpha_0 = \alpha_1 = 1$.

Poslední veličinou je Z , která reprezentuje ztrátu mechanické energie proudu z důvodu úplavu a odporů způsobených zúžením průřezu [2]. V této práci se nezabýváme boční kontrakcí, tudíž uvažujeme pouze s vertikálním snížením průtočného pole způsobeným přelivem samotným. Ztráty tedy lze vyjádřit tímto způsobem:

$$Z = \Sigma \xi \frac{v_1^2}{2g} \quad (3.5)$$

[1], [2], [3], [4], [5], [6], [8]

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

Rychlostní výškou se rozumí výraz $\frac{\alpha v^2}{2g}$. Ten nám určuje výšku čáry energie nad hladinou vody.

Pro čáru energie před přelivem nad úrovní koruny tedy platí:

$$H_0 = h + \frac{\alpha v_0^2}{2g} \quad (3.6)$$

[1], [2], [3], [4], [5], [6], [8]

V tento moment lze do Bernoulliho rovnice (3.4) implementovat rovnice (3.5) a (3.6).

$$H_0 = h_1 + \frac{\alpha v_1^2}{2g} + \Sigma \xi \frac{v_1^2}{2g} \quad (3.7)$$

[1], [2], [3], [4], [5], [6], [8]

Z toho jednoduchou úpravou vyjádříme pro v_1 :

$$v_1 = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi}} \sqrt{2g(H_0 - h_1)} \quad (3.8)$$

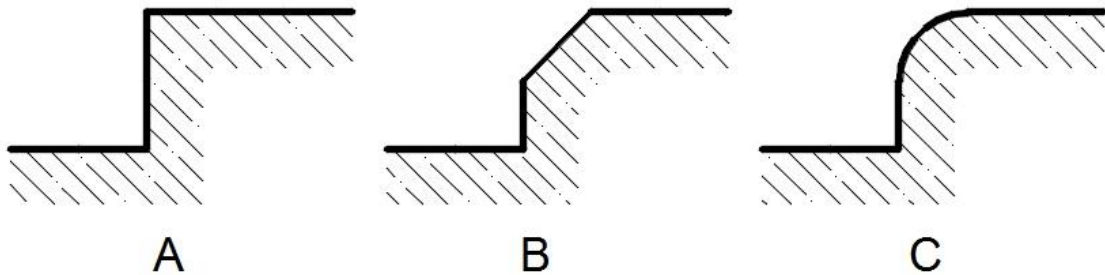
[1], [2], [3], [4], [5], [6], [8]

To lze vyjádřit jako:

$$v_1 = \varphi \sqrt{2g(H_0 - h_1)} \quad (3.9)$$

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

Součinitel φ je závislý především na tvaru nátokové hrany u které rozeznáváme 3 základní typy:



Obrázek 5 A – ostrá vstupní hrana, B – zkosená vstupní hrana, C – zaoblená vstupní hrana

Dále lze do rovnice (3.9) aplikovat rovnici spojitosti pro obdélníkové koryto, která zní:

$$Q = v_i \cdot S_i = v_i \cdot b \cdot h_i = konst. \quad (3.10)$$

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 (3.9) a (3.10) lze vyjádřit první vztah pro výpočet průtoku přepadu přes širokou korunu:

$$Q = \varphi \cdot b \cdot h_1 \sqrt{2g(H_0 - h_1)} \quad (3.11)$$

Nyní zavedeme výrazy:

$$\varepsilon_1 = \frac{h_1}{H_0}; \quad \varepsilon_2 = \frac{h_2}{H_0} \quad (3.12)$$

Přičemž prozatím využijeme pouze první z nich pro h_1 . Tedy:

$$Q = \varphi \cdot b \cdot \varepsilon_1 \cdot H_0 \sqrt{2g(H_0 - \varepsilon_1 \cdot H_0)} = \varphi \cdot \varepsilon_1 \sqrt{1 - \varepsilon_1} \cdot b \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2} \quad (3.13)$$

Dále složky ε_1 a φ zavedeme pod jednotný součinitel m a tím dostaneme druhou základní rovnici nezatopeného přepadu, která je aplikovatelná pro oba dva typy průběhu hladin (Obrázek 2, Obrázek 3):

$$Q = mb\sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2} \quad (3.14)$$

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

Tato rovnice odpovídá tvaru rovnice přepadu používané u jezových přelivů.

Vztahy mezi φ , m , ε_1 a ε_2 popisuje tato tabulka:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m	0.385	0.38	0.37	0.36	0.35	0.34	0.33	0.32	0.31	0.30
φ	1	0.987	0.968	0.951	0.936	0.923	0.912	0.90	0.891	0.881
m/ φ	0.385	0.384	0.382	0.379	0.373	0.368	0.363	0.356	0.348	0.340
ε_1	0.667	0.65	0.62	0.60	0.570	0.545	0.53	0.51	0.485	0.465
ε_2	0.667	0.68	0.71	0.73	0.76	0.775	0.79	0.805	0.820	0.830

Tabulka 1 [1], [2], [3], [4], [5], [6], [8], [9], **1** – přepad beze ztrát (nereálný případ), **4** – vstupní část dobře zaoblena, **5** – zaoblená vstupní hrana (Obrázek 5, C), **7** – seříznutá vstupní hrana (Obrázek 5, B), **8** – ostrá vstupní hrana (Obrázek 5, A), **10** – práh mimořádně drsný [9]

Základní rovnice přepadu (3.14) byla již mnohokrát řešena a její funkčnost byla potvrzena při mnoha měřeních. Výborný popis a porovnání přepadových součinitelů m uvádí Zachoval [10].

4. Vodní skok

Dle schématu na Obrázku 1 a Obrázku 3 dochází při přepadu přes širokou korunu k přechodu z bystřinného (nadkritického) proudění o hloubce h_1 do říčního (podkritického) proudění o hloubce h_2 . Tento přechod se odehrává vodním skokem. Vodní skok začíná první vzájemnou hloubkou h_1 a končí druhou vzájemnou hloubkou h_2 . Vzdálenost mezi těmito dvěma hloubkami se nazývá délka vodního skoku.

Vodních skoků rozeznáváme několik druhů v závislosti na Froudově čísle v nadkritickém proudění vztaženému k hloubce h_1 . Pro ně v obdélníkovém korytě platí vztah:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h_i}} \quad (4.1)$$

Kde: Fr – Froudovo číslo [-]

$Fr < 1$ – říční proudění

$Fr > 1$ – bystřinné proudění

Agroskin [6] uvádí, že nad širokou korunou bude vznikat zejména vlnovitý vodní skok. Ten se vyskytuje při tomto rozmezím Froudova čísla:

$$1 < Fr_1 < 1,7 \quad (4.2)$$

[8]

4.1. Obecný vztah mezi vzájemnými hloubkami

Vztah mezi vzájemnými hloubkami vodního skoku vychází z věty o hybnosti proudu kapaliny a pro obdélníkové koryto je popsán takto:

$$\frac{Q^2}{gbh_1} + \frac{bh_1^2}{2} = \frac{Q^2}{gbh_2} + \frac{bh_2^2}{2} \quad (4.3)$$

[8]

Pro zjednodušení vydělíme rovnici (4.3) výrazem b a zavedeme měrný průtok pro obdélníkové koryto, který zní:

$$q = \frac{Q}{b} = v \cdot h \quad (4.4)$$

Kde: q – měrný průtok [m^2/s]

Tudíž dostaneme:

$$\frac{2q^2}{g} = h_1 h_2 (h_2 + h_1) \quad (4.5)$$

[8]

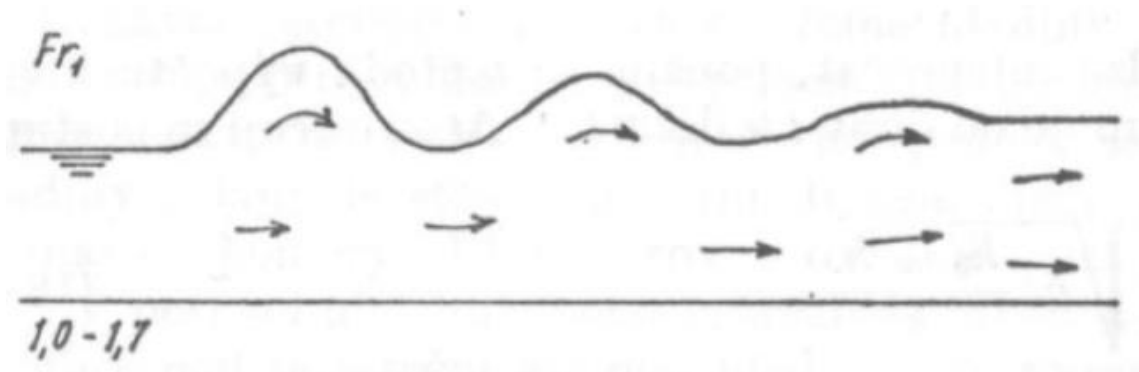
Z toho bychom následně vyjádřili základní rovnici pro 2. vzájemnou hloubku:

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{8q^2}{gh_1^3}} - 1 \right) \quad (4.6)$$

[8]

4.2. Vlnovitý vodní skok

Ve studovaném případě přepadu přes širokou korunu je dle literatury [6] malý rozdíl h_2 hladin 1. a 2. vzájemné hloubky. Jedná se o takzvaný vlnovitý vodní skok. Čelo tvoří několik se tlumících vln na hladině.



Obrázek 6 [8], Vlnovitý vodní skok

Pro popis vzájemných hloubek vlnovitého vodního skoku se vychází z rovnice (4.5), přičemž se vyjádří měrný průtok $q = v_1 h_1$.

$$\frac{2v_1^2 h_1^2}{g} = h_1 h_2 (h_2 + h_1) \quad (4.7)$$

[8]

Vyjádříme pro v_1 :

$$v_1^2 = g \frac{h_2}{2h_1} (h_2 + h_1) \quad (4.8)$$

[8]

Za h_1 dosadíme $h_1 = h_2 - h_s$

$$v_1^2 = g \frac{h_2}{2} \cdot \frac{2h_2 - h_s}{h_2 - h_s} \quad (4.9)$$

[8]

Kde h_s – výška vodního skoku [m]

Po úpravě dostaneme výraz:

$$v_1^2 = gh_2 \left[1 + \frac{h_s}{2(h_2 - h_s)} \right] \quad (4.10)$$

[8]

Přičemž v učebnici Hydrauliky Kolář uvádí: “Výška h_s vlnovitého vodního skoku je malá, hodnota druhého zlomku zanedbatelná“ [8] Tudiž přibližnou rychlost bystřinného proudění lze vyjádřit:

$$v_1 \approx \sqrt{gh_2} \quad (4.11)$$

[8]

Z toho jsou následně vyjádřeny tyto výrazy:

$$h_2 \approx \frac{v_1^2}{g} \quad (4.12)$$

[8]

$$h_2 \approx h_1 Fr_1^2 \quad (4.13)$$

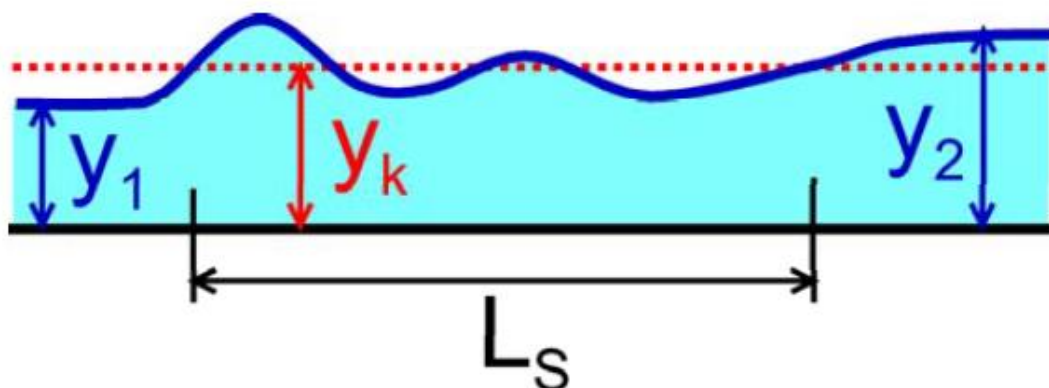
[8]

$$h_s \approx h_1 (Fr_1^2 - 1) \quad (4.14)$$

[8]

Zkrácením rovnice (4.10) bylo získáno vyjádření vzájemných hloubek pro vlnovitý vodní skok.

Délku vodního skoku lze určit komplikovaně, neboť se tvoří několik po sobě jdoucích vln zasahujících do podkritického proudění, jak ukazuje tento obrázek [8].



Obrázek 7 Délka vlnovitého vodního skoku [11]

Délku vlnovitého vodního skoku určil Dimitrijevič jako vzdálenost od první vlny až do konce výmolu, jež je vytvořen na poddajném dně [8]. Podle měření na modelu Dimitrijevič určil:

$$L_s \approx 10,6h_s \quad (4.15)$$

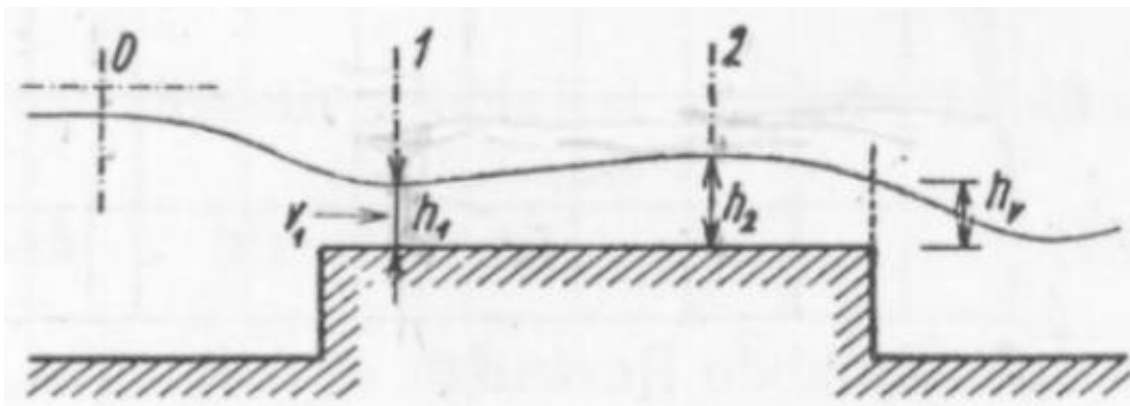
[8]

5. Průběhy hladin při měření a jejich prezentace v literatuře

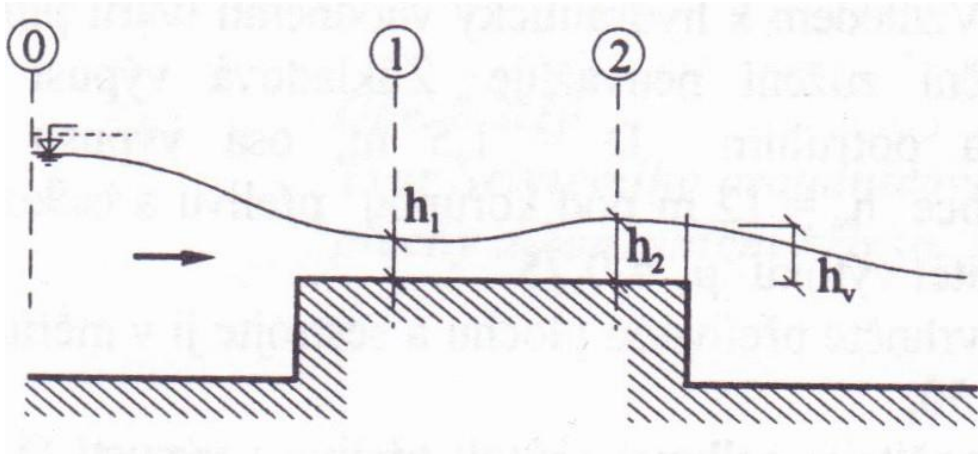
Nejprve si ukážeme příklady z literatury a poté výsledky naměřených hodnot na modelech. Následně posoudíme podobnosti a rozdíly.

5.1. Schématické vykreslení průběhů hladin v literatuře

Pro širokou korunu o rozměrech $4h < t < 10h$ lze v zásadě v literatuře hydrauliky pozorovat 3 druhy vykreslení průběhu hladin s výskytem vodního skoku nad korunou. Prvním z těchto vykreslení je případ, kdy je vodní skok vykreslen bez vlivu spodní hladiny h_d respektive hladina za přelivem je nižší než výška přelivu samotného $h_d < P_\sigma$ (viz kótování Obrázek 1). Na konci voda volně přepadá.

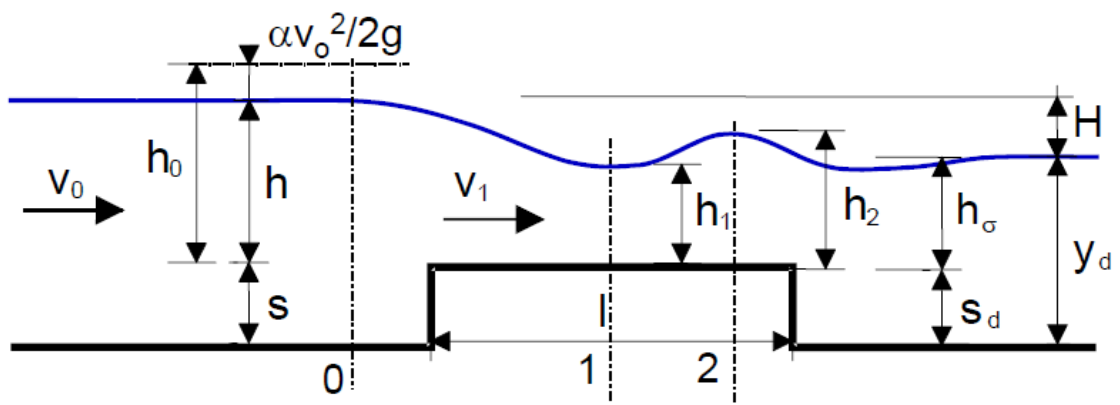


Obrázek 8 [8], Vykreslení průběhu hladiny Kolář, Patočka, Bém 1983 (sken)

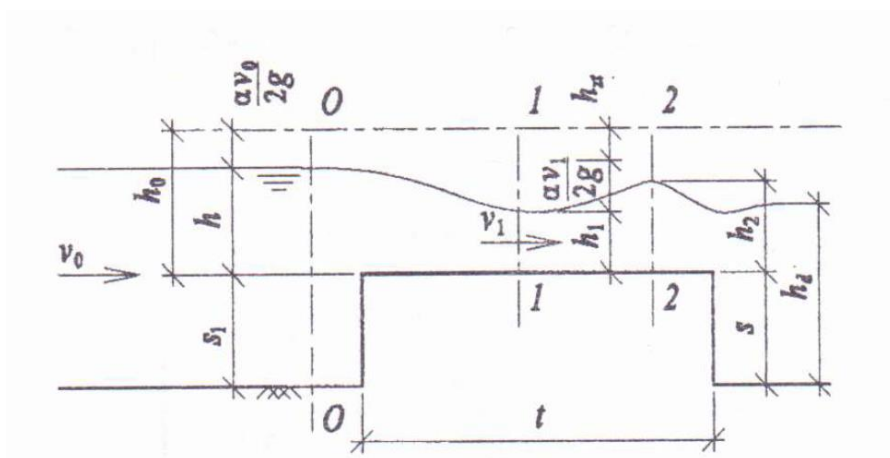


Obrázek 9 [12], Vykreslení průběhu hladiny (sken)

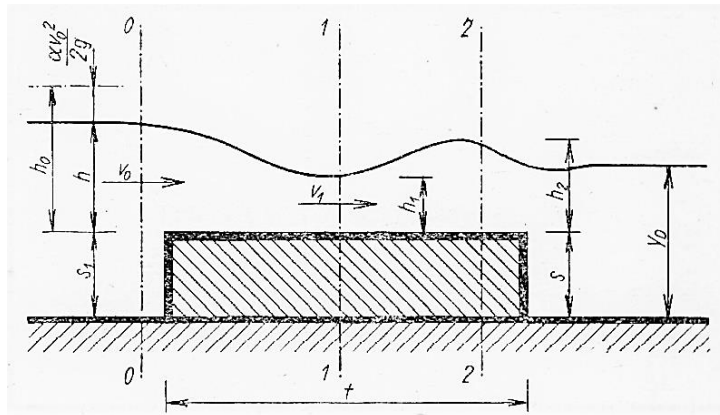
Druhým vykreslením je, kdy hladina spodní vody vystupuje nad korunu $h_d > P_\sigma$ a je vidět, že hladina spodní vody je ztelně niž než hloubka vody v 2. profilu $h_\sigma < h_2$. Příklad za h_2 následuje ztelný pokles hladiny, která následně vystoupá na h_d . Tento případ lze vidět na Obrázku 3 prezentovaný od autorů Kolář, Smetana, Eliáš a další v roce 1966. Další případy lze vidět zde:



Obrázek 10 [1], Vykreslení průběhu hladiny Havlík, Písek 1983 (sken)

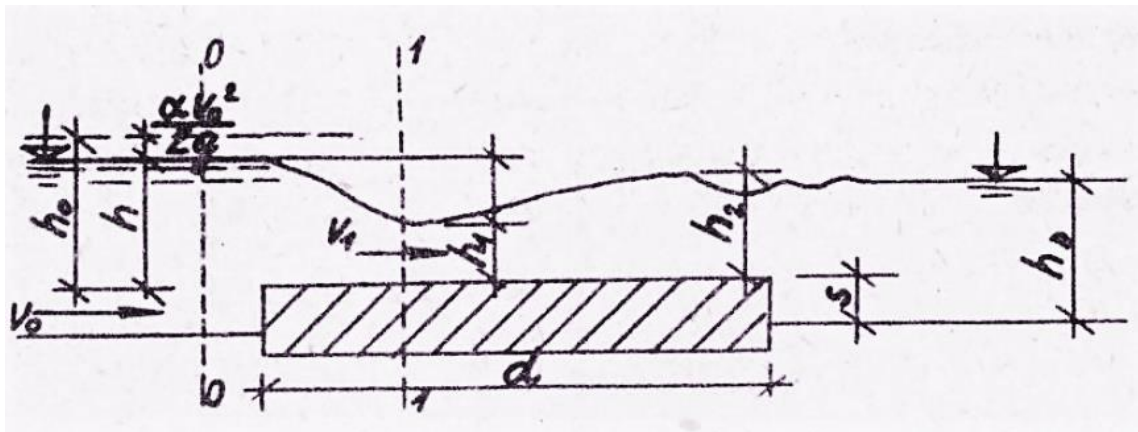


Obrázek 11 [3], Vykreslení průběhu hladiny Jandora, Šulc 2007 (sken)

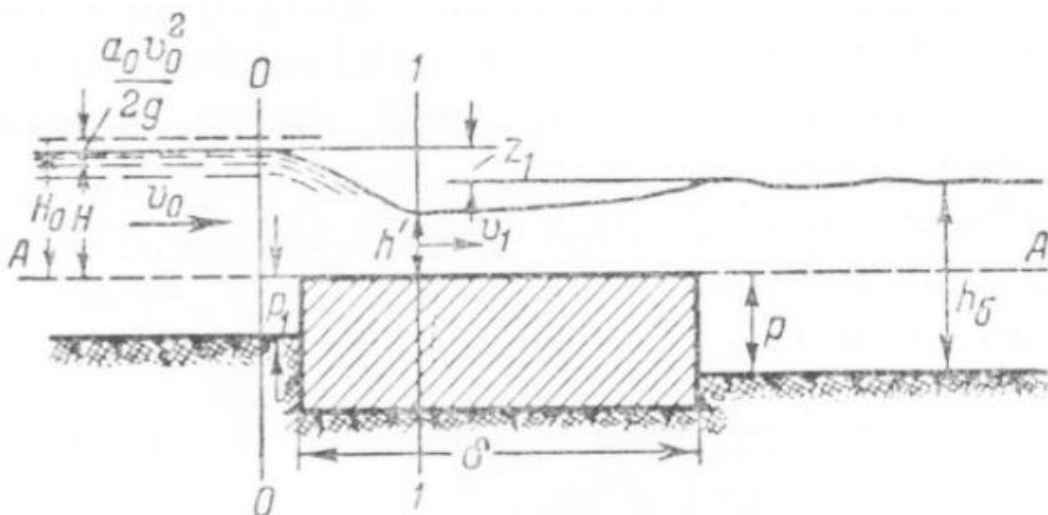


Obrázek 12 [5], Vykreslení průběhu hladiny Boor, Kunštátský, Patočka 1966 (sken)

Třetím a posledním typem vykreslení je, když se hladina za přelivem pohybuje v přibližně stejné výšce jako hloubka vody v druhém profilu $h_\sigma \approx h_2$. Mezi 2. profilem a ustálenou hladinou h_d je vykresleno zvlnění hladiny. Tuto prezentaci lze vidět v těchto případech:



Obrázek 13 [2], Vykreslení průběhu hladiny Patočka 1965 (sken)

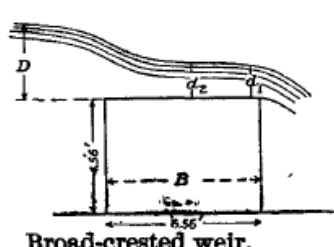
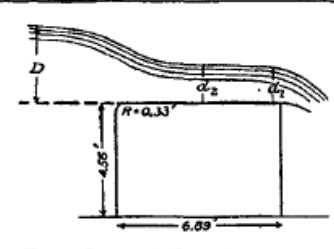


Obrázek 14 [6], Vykreslení průběhu hladiny Agroskin, Dimitrije, Pikalov 1954 (sken)

Vykreslení hladin na horním obrázku (Obrázek 14) indikuje, že by se 2. vzájemná hloubka vodního skoku mohla vyskytovat až za přelivem. Ovšem to nelze tvrdit s přesností, neboť 2. vzájemná hloubka není v tomto vykreslení značena.

5.2. Průběhy hladin naměřených na modelech

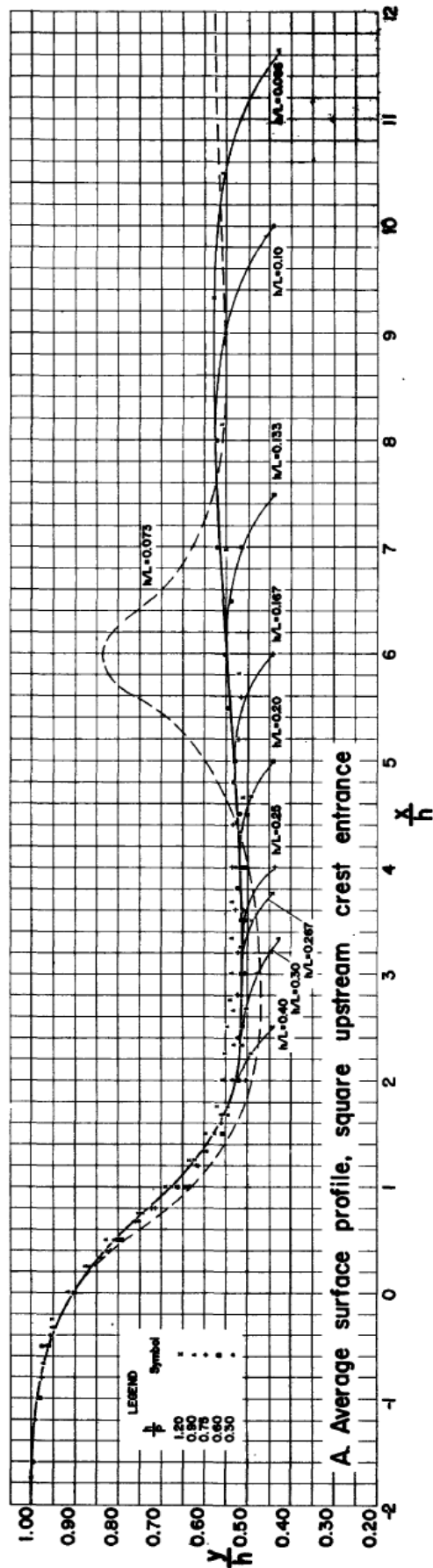
Průběhy hladin vycházejících z měření na fyzikálních modelech se výrazně liší od prezentovaných vykreslení v literatuře. Budeme prezentovat 3 práce, které obsahovaly měření v hranicích pro vytvoření vodního skoku ($4h < t < 10h$ respektive $0,1 < \frac{h}{t} < 0,25$). Tato měření mají společný faktor, a to že voda na konci koruny volně přepadá. Když bychom brali měření v průběhu let chronologicky, tak prvním z nich bude prezentace od autora Robert E. Horton z roku 1907 [13]:

		D	d_1	d_2	$K = \frac{d_2}{D}$
 <p>Broad-crested weir.</p>	1	0.90	0.35	0.52	0.58
	2	1.15	.45	.68	.59
	3	1.80	.75	1.14	.63
	4	2.60	1.20	1.75	.67
	5	3.55	1.72	2.52	.71
	6	5.15	2.20	3.15	.61
 <p>Broad-crested weir.</p>	1	1.00	.35	.50	.50
	2	1.32	.53	.70	.50
	3	1.98	.75	.98	.50
	4	2.85	1.08	1.70	.60
	5	3.90	1.50	2.50	.64
	6	4.65	2.10	3.10	.61

Obrázek 15 [13], Naměřené průběhy hladin Horton 1907 (sken) (naměřené hodnoty jsou uváděny ve stopách)

V tomto případě bereme pouze horní část tabulky, neboť spodní se týká přelivu se zaoblenou vstupní hranou. Do kritéria pro vytvoření vodního skoku (3.2) spadají měření číslo 1 a 2 ($1. h/t = 0,137$; $2. h/t = 0,175$). Kde hloubka d_2 byla měřena v prostředku koruny a hloubka d_1 byla měřena u koncové hrany koruny. Toto měření nepopisuje příliš dobře námi zkoumaný jev, protože hladiny mezi d_1 a d_2 nejsou naměřeny a nevíme jejich přesný průběh. Ovšem nakreslená prezentace přepadu vychází z pozorování a není na něm patrné zvyšování hladiny po délce koruny.

Dále budou tedy prezentovány přesnější měření publikované v roce 1957 autorem H. J. Tracy [14].

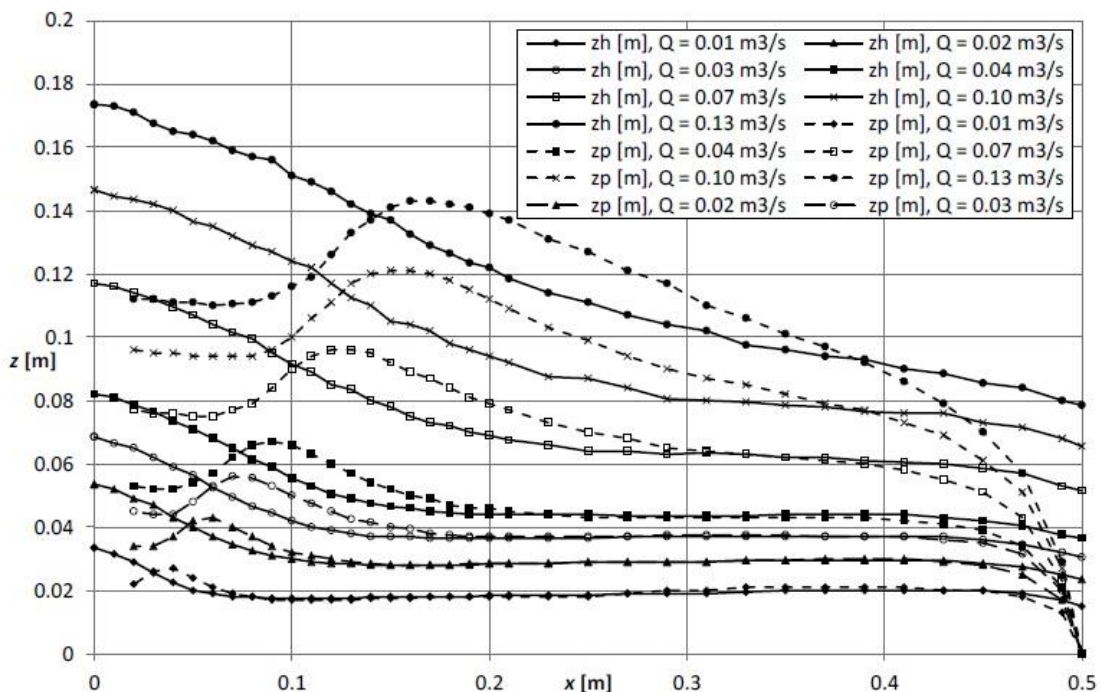


Obrázek 16 [14], Naměřené průběhy hladin Tracy 1957 (sken) (počátek souřadnicového systému je umístěn na nátokové hraně koruny)

Kde $\frac{y}{h}$ a $\frac{x}{L}$ jsou bezrozměrné souřadnice vodní hladiny.

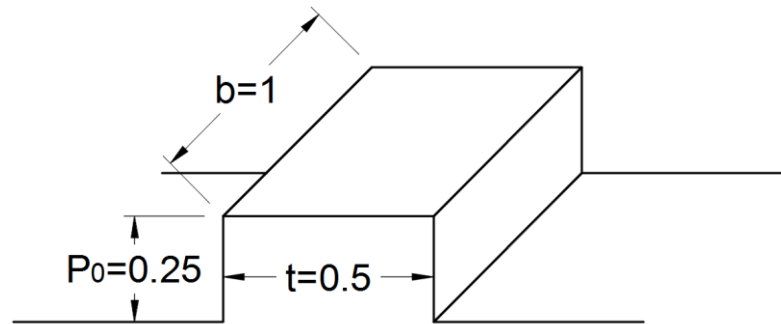
V tomto případě rozmezí pro možnost vytvoření vodního skoku dle rovnice (3.2) odpovídají tato měření $\frac{h}{L}$: 0,25; 0,20; 0,167; 0,133; 0,10. Kde h reprezentuje přepadovou výšku a L délku koruny (v našem případě t). Na tomto měření je již možné pozorovat nárůst hladiny ke konci koruny přelivu. Což nepopírá možnost vzniku vodního skoku v případě, že hladina při své maximální výšce nad korunou vystoupala nad hladinu kritického proudění h_c . To ovšem není na první pohled patrné, neboť autor neuváděl průtoky a jiné veličiny, při kterých měřil. Není tedy možné matematicky posoudit, zdali nám vznikne vodní skok. Vizualizace ovšem indikuje spíše opak, a to že nám vodní skok nevzniká. Pro posouzení bude potřeba přesněji zaznamenané měření.

K tomu poslouží poslední dohledané měření, jež bylo prezentováno v roce 2012 autorem Zbyňkem Zachovalem [15].



Obrázek 17 [15], Naměřené průběhy hladin Zachoval 2012 (sken)

V tomto případě rozmezí pro možnost vytvoření vodního skoku dle rovnice (3.2) odpovídají průtoky Q [m^3/s]: 0,02; 0,03; 0,04. Graf má počátek souřadnic na nátokové hraně koruny. Průběhy hladin jsou reprezentovány plnou čarou (výraz zh). Na tomto měření je také vidět malý nárůst hladiny předtím, než voda volně přepadá přes konec koruny přelivu. Pro výpočty a porovnání výsledků volíme toto měření, neboť proběhlo v nedávné době při jasně popsaných podmínkách a daných rozměrech zkoumaného přelivu. Rozměry zkoumaného přelivu jsou zde:



Obrázek 18 Široká koruna použita při měření [m], Zachoval (Obrázek 17)

6. Posouzení naměřených hodnot při přepadu přes širokou korunu bez vlivu spodní vody

6.1. Základní meze přepadu a rozměry široké koruny

Než přejdeme k výpočtům je potřeba zopakovat kritéria přepadu a přelivu, kterými se budeme zabírat. Zaměříme se na širokou korunu s ostrou vstupní hranou (Obrázek 5 – A). Délka koruny bude jen tak dlouhá, aby splňovala podmínku průběhu hladiny s vodním skokem (Obrázek 1, Obrázek 3). To znamená, že délka koruny bude v rozmezí $4h < t < 10h$. Dále se budeme držet v limitech pro vlnovitý vodní skok, kdy Froudovo číslo profilu první vzájemné hloubky bude mezi hodnotami $1 < F_r < 1,7$. Ve výpočtech se zanedbávají ztráty třením, neboť jsou v porovnání s místními ztrátami zanedbatelné. Součinitel kinetické energie α se ve výpočtech jednotlivých profilů uvažuje jednotný a to $\alpha = 1$.

6.2. Porovnání měření a výpočtů

Jak již bylo řečeno, výpočty budeme porovnávat s měřením podélných profilů hladiny, které provedl Zbyněk Zachoval (Obrázek 17). Zaměříme se na průtoky, jež odpovídají vymezeným hodnotám (viz. kapitola 6.1) a to 0,02, 0,03 a 0,04 m³/s. Hlavní otázkou v tento moment je, zdali výpočty budou odpovídat skutečným měřením, o kolik se výpočty budou lišit od skutečnosti a zda vznikne vodní skok bez vlivu spodní vody.

Výpočty budou vycházet z výše uvedených rovnic v kapitolách 3 a 4. a Tabulka 1 pro součinitele výškové kontrakce. Při bližším studování této tabulky ovšem vyšla najevo neshoda tabulkových součinitelů kontrakce a výsledků rovnic uváděných v učebnici od autorů *Agroskin, Dimitrijev a Pikalov* [6]. Tato neshoda vedla k ověření veškerých hodnot uváděných v této tabulce.

6.2.1. Přepočet tabulky součinitelů kontrakce

Při přepočtu se vycházelo ze součinitele rychlosti φ . Použité výrazy pro přepočet jednotlivých součinitelů byly:

$$\varepsilon_1 = \frac{2\varphi^2(2\varphi^2 - 1)}{1 + 2\varphi^2(2\varphi^2 - 1)} \quad (6.1)$$

[6]

$$\varepsilon_2 = \frac{2\varphi^2}{1 + 2\varphi^2(2\varphi^2 - 1)} \quad (6.2)$$

[6]

$$m = \frac{2\varphi^2(2\varphi^2 - 1)}{1 + 2\varphi^2(2\varphi^2 - 1)} \sqrt{\frac{2\varphi^2}{1 + 2\varphi^2(2\varphi^2 - 1)}} \quad (6.3)$$

[6]

Všechny tři výrazy byly odvozeny ze zkrácené rovnice pro vlnovitý vodní skok (4.11) a rovnice (3.9). Odvození proběhlo za předpokladu rovnosti ekvivalentních hloubek se vzájemnými hloubkami získaných z rovnice (3.11), kde ekvivalentní hloubky prezentují dva možné výsledky při využití rovnice (3.11). Tyto hloubky jsou následně uvažovány jako první a druhá vzájemná hloubka vodního skoku vznikající na koruně přelivu. Toto odvození se nachází v učebnici hydrauliky od autorů Agroskin, Dimitrijev a Pikalov [6] z roku 1954, tudíž je pochopitelné, že došlo k určitému zaokrouhlování. Upravená tabulka za pomoci výše zmíněných rovnic vypadá takto.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m	0.385	0.38	0.37	0.36	0.35	0.34	0.33	0.32	0.31	0.30
φ	1	0.987	0.968	0.951	0.936	0.923	0.912	0.90	0.891	0.881
m/ φ	0.385	0.384	0.382	0.378	0.373	0.368	0.362	0.354	0.347	0.339
ε_1	0.667	0.65	0.62	0.59	0.569	0.545	0.52	0.50	0.483	0.462
ε_2	0.667	0.68	0.71	0.73	0.76	0.775	0.79	0.808	0.821	0.836

Tabulka 2 Opravená tabulka součinitelů (počet desetinných míst zachován dle originálu)

Světle zvýrazněné jsou hodnoty, které se liší od Tabulky 1 o tisícinu a tmavě zvýrazněné hodnoty jsou ty, kde se jedná o rozdíl setinový. Jak je patrné o velké rozdíly se nejedná. Ale tato tabulka se vyskytuje ve většině učebnic hydrauliky ([1], [2], [3], [4], [5], [6], [8], [9]), tudíž je vhodné ji poupravit.

6.2.2. Výpočet za pomoci tabulkových součinitelů kontrakce

Při prvním výpočtu budeme vycházet z upravené Tabulky 2, jež popisuje závislost H_0 a h_i . V tomto případě při znalosti H_0 a součinitelích výškové kontrakce (ε_1 , ε_2) lze v tabulce jednoduše vyjádřit 1. a 2. vzájemnou hloubku za pomoci rovnice (3.12). Hloubku H_0 uvádí Zachoval pro jednotlivé průtoky poměrem $\frac{H_0}{P_0}$ a tedy při znalosti $P_0 = 0,25 \text{ m}$ lze jednoduše dopočítat jednotlivé hodnoty H_0 pro dané průtoky.

Využíváme tedy tyto hodnoty součinitelů:

φ	0.900
ε_1	0.501
ε_2	0.808
m	0.319
m/ φ	0.354

Při využití součinitelů pro ostrou vstupní hranu a výše uvedených rovnic dostaneme tyto výsledky:

	Q	H ₀ /P ₀	H ₀	h ₁	v ₁	Fr ₁	h ₂	v ₂	Fr ₂
č	[m ³ /s]	[-]	[m]	[m]	[m/s]	[-]	[m]	[m/s]	[-]
1	0.02	0.23	0.058	0.029	0.692	1.302	0.046	0.429	0.635
2	0.03	0.3	0.075	0.038	0.796	1.311	0.061	0.493	0.640
3	0.04	0.37	0.093	0.046	0.860	1.276	0.075	0.533	0.623

Tabulka 3 Výsledky výpočtu 1. a 2. vzájemné hloubky za pomoci upravených součinitelů výškové kontrakce z Tabulka 2

Nyní odečteme nejnižší a nejvyšší naměřenou hodnotu z Obrázku 17, jež by měly reprezentovat 1. a 2. vzájemnou hloubku vodního skoku nad korunou. Pokud tedy porovnáme naměřené hodnoty s hodnotami vypočtenými a určíme si velikost chyby, dostaneme tyto výsledky:

Porovnání výsledků s měřením						
Q	h ₁ -Zachoval	h ₁ -Výpočet	Chyba	h ₂ -Zachoval	h ₂ -Výpočet	Chyba
č [m ³ /s]	[m]	[m]	[%]	[m]	[m]	[%]
1 0.02	0.028	0.029	2.17	0.030	0.046	54.91
2 0.03	0.037	0.038	2.13	0.038	0.061	60.83
3 0.04	0.044	0.046	5.95	0.044	0.075	68.95

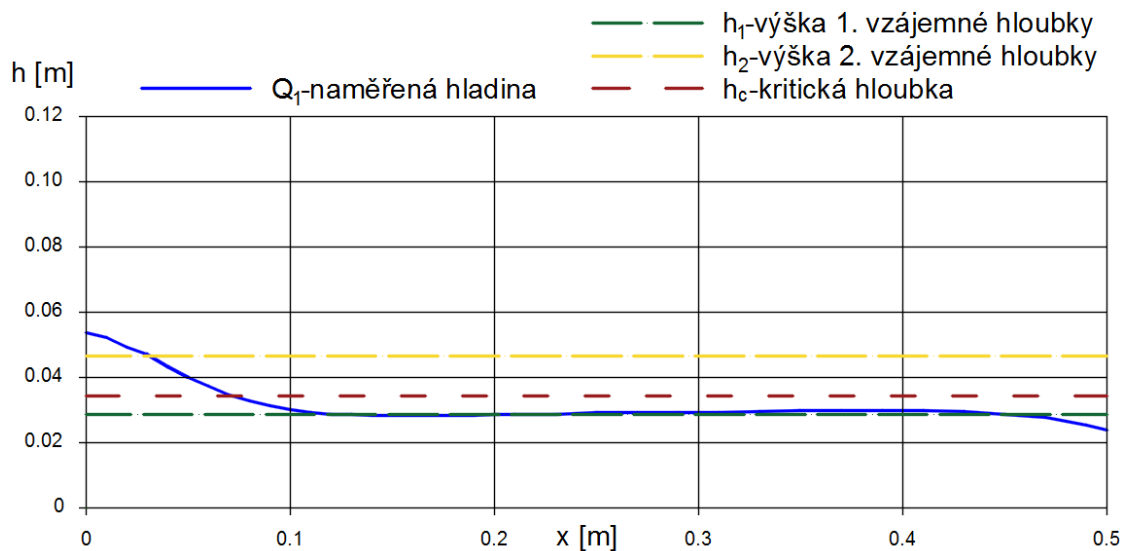
Tabulka 4 Porovnání hloubek vypočtených ze vztahu (3.12) a Tabulka 2 s měřením dle Zachovala [15]

Z výsledků lze vyzorovat, že u první vzájemné hloubky h_1 se chyba pohybuje v malých hodnotách až na 3. měření, kde mohlo dojít ke špatnému odměření hodnoty z grafu. Ovšem u druhé vzájemné hloubky h_2 dochází k enormním chybám, které narůstají se zvětšujícím se průtokem. Lze tedy zpochybnit, že se 2. vzájemná hloubka nad korunou vůbec vytvoří. To lze graficky posoudit proložíme-li naměřené hodnoty od Zachovala [15] kritickou hloubkou. Kritickou hloubkou pro obdélníkové koryto o šířce b lze vyjádřit touto rovnicí:

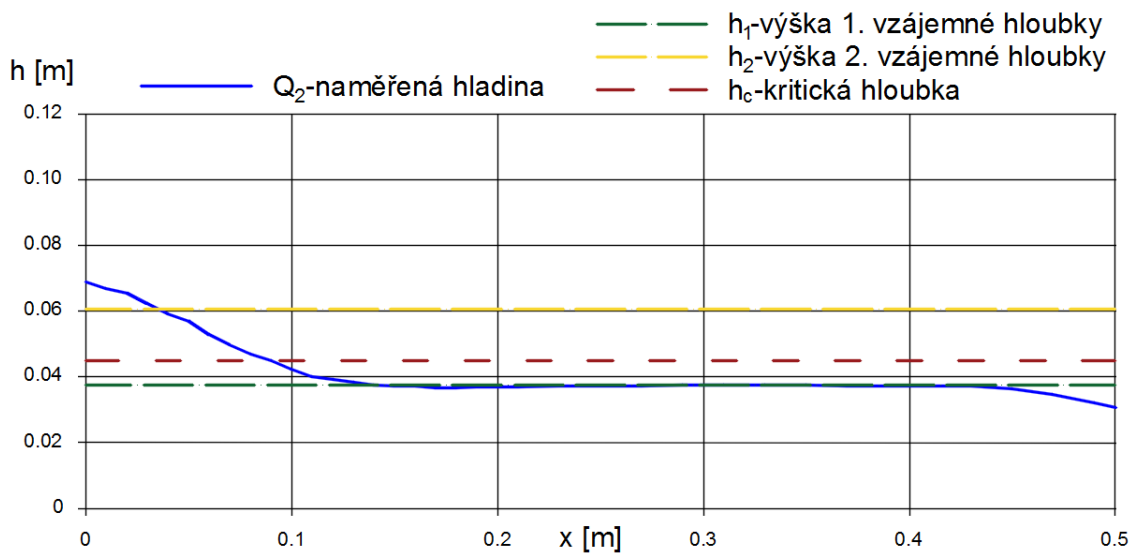
$$h_c = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}} \quad (6.4)$$

[9]

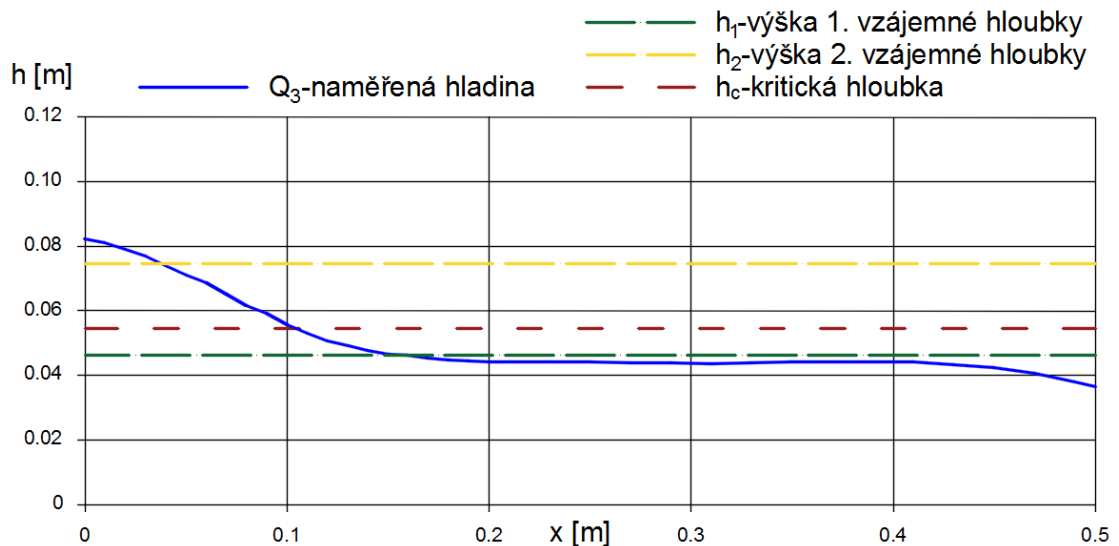
Pro grafické porovnání byly převedeny naměřené hodnoty od Zachovala do programu AutoCAD. To bylo provedeno za pomoci funkce *poliline*, kterou se naměřené hodnoty překreslily do digitální formy. Do ní jsme následně za pomoci souřadnic vložili vypočtené výsledky. Ty jsou prezentovány vodorovnými čarami.



Obrázek 19 Porovnání vypočtených hodnot s naměřenými hodnotami od Zachovala [15] pro $Q=0,02 \text{ m}^3/\text{s}$



Obrázek 20 Porovnání vypočtených hodnot s naměřenými hodnotami od Zachovala [15] pro $Q=0,03 \text{ m}^3/\text{s}$



Obrázek 21 Porovnání vypočtených hodnot s naměřenými hodnotami od Zachovala [15] pro $Q=0,04 \text{ m}^3/\text{s}$

Jak je patrné z grafů, vypočtené první vzájemná hloubky celkem odpovídají naměřeným hodnotám. Zatímco vypočtená druhá vzájemná hloubka se pohybuje mnohem výš než naměřená hladina. S porovnáním s vypočtenou kritickou hloubkou je patrná absence říčního proudění. Tudiž v těchto třech případech nedojde k přechodu z bystřinného do říčního proudění a vodní skok nevznikne. Protože byla využita pouhá 3 měření, je třeba posoudit, zdali se jedná o výjimečné případy, nebo vodní skok nevznikne v žádném případě.

6.2.3. Posouzení vzniku vodního skoku

Posouzení vzniku vodního skoku bylo provedeno následovně. Byly využity rozměry koruny od Zachovala (viz Obrázek 18). Pro ni byla zvolena přepadová výška v takové výšce, aby dle vztahu (3.2) měla koruna co největší relativní délku a vodní skok měl nejvíce prostoru na vytvoření. Tedy $h = \frac{t}{10} = \frac{0,5}{10} = 0,05 \text{ m}$. Následně se za pomoci standartního postupu výpočtu průběhu hladiny spočetl průběh hladiny pro bystřinné a říční proudění. Obecná metoda po úsecích se počítá tímto vzorcem:

$$\Delta z = \frac{\alpha Q^2}{2g} \left(\frac{1}{S_d^2} - \frac{1}{S_h^2} \right) + \frac{Q^2}{K_P^2} \cdot \Delta L + \xi \cdot \left| \frac{\alpha(v_d^2 - v_h^2)}{2g} \right| ; K_P = C_P \cdot S_P \cdot \sqrt{R_P} \quad (6.5)$$

[9]

- Kde: Δz – rozdíl mezi horní a dolní počítanou hladinou ($z_h - z_d$) [m]
 ΔL – vzdálenost mezi počítanými úseky [m]
 S_d, S_h – průtočná plocha dolního a horního příčného řezu [m^2]
 v_d, v_h – střední průřezová rychlost v dolním a horním příčném řezu [m/s]
 C – Chezyho rychlostní součinitel, $C = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6}$ [$\text{m}^{0.5}/\text{s}$]
 n – Manningův součinitel drsnosti koryta [$\text{s}/\text{m}^{1/3}$]
 R – hydraulický poloměr, $R = \frac{S}{O}$ [m]
 O – omočený obvod [m]
 K – modul průtoku [m^3/s]

ξ – součinitel místních ztrát způsobených změnou průřezu koryta [-]

K_p, C_p, S_p, R_p – průměrné hodnoty daných veličin obou počítaných úseků

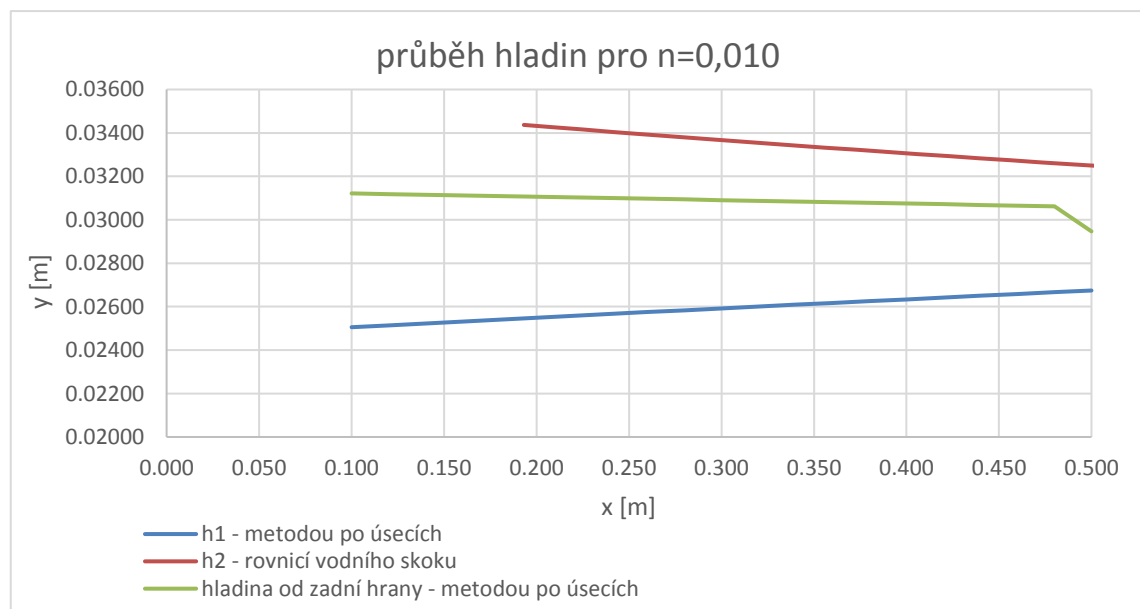
Počátek výpočtu pro bystřinné proudění byl dle Koláře [3] umístěn $2h$ od vstupní hrany ve výšce h_1 nad korunou. Výška počáteční hodnoty h_1 byla vypočtena za pomoci součinitele kontrakce z upravené Tabulky 2 (viz výpočet v kapitole 6.2.2). Průběh říčního proudění byl počítán od koncové hrany koruny, přičemž počáteční hodnota byla umístěna ve výšce h_c vypočtené z rovnice (6.4). Na koncové hraně je při reálné situaci hladina, níž než h_c [1], ovšem pro tento případ lze uvažovat hloubku kritickou. Průběh obou hladin byl počítán po úsecích $\Delta L = 2 \text{ cm}$. Následně pro každou vypočtenou hodnotu hloubky bystřinného proudění byla vypočtena druhá vzájemná hloubka h_2 rovnicí vodního skoku (4.6). Tato hodnota byla posunuta po proudu o délku vlnovitého vodního skoku L_s (4.15). Hledaným výsledkem je, zdali se nám v některé místě protnou hodnoty 2. vzájemné hloubky s vypočtenými průběhy říčního proudění. Při výpočtu byla zanedbána místní ztráta ($\xi = 0$).

Základní hodnoty byly vypočteny z h za pomoci rovnic uvedených v kapitolách 3 a 4:

H_0	Q	v_1	$v_1^2/2g$	S_0	h	q	h_1	h_c
m	m ³ /s	m/s	[-]	m ²	m	m ² /s	m	m
0.050	0.016	0.053	0.0001	0.300	0.050	0.016	0.025	0.029

Tabulka 5 Základní hodnoty pro posouzení vzniku vodního skoku

Další proměnnou, jež má vliv na průběh hladiny metodou po úsecích je Manningův součinitel drsnosti n . Pro první výpočet byla zvolena hodnota $n = 0,010$. Grafické výsledky vypadají takto:

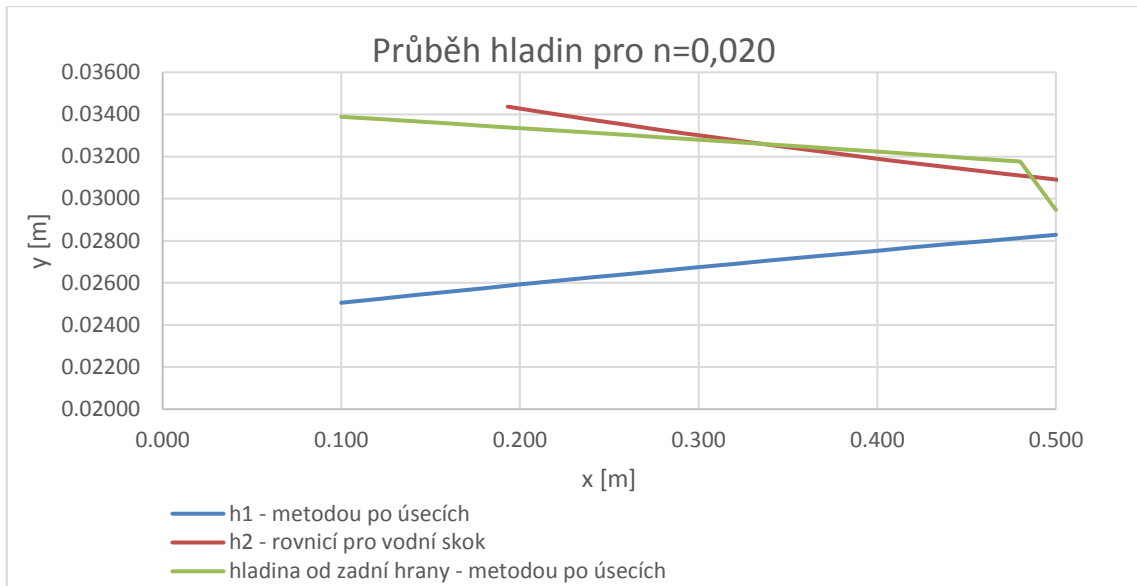


Obrázek 22 Průběh hladin pro $n=0,010$ (počátek souřadnic je na nátokové hraně koruny)

Jak je patrné z obrázku, křivky druhých vzájemných hloubek vodního skoku se s vypočtenými průběhy hladin říčního proudění neprotnou. Tudíž při hodnotě Manningova stupně drsnosti

$n = 0,010$ nevznikne vodní skok v žádném případě. Tato drsnost odpovídá například těmto povrchům: cementový, dřevěný a beton hlazený ocelovým hladítkem [16].

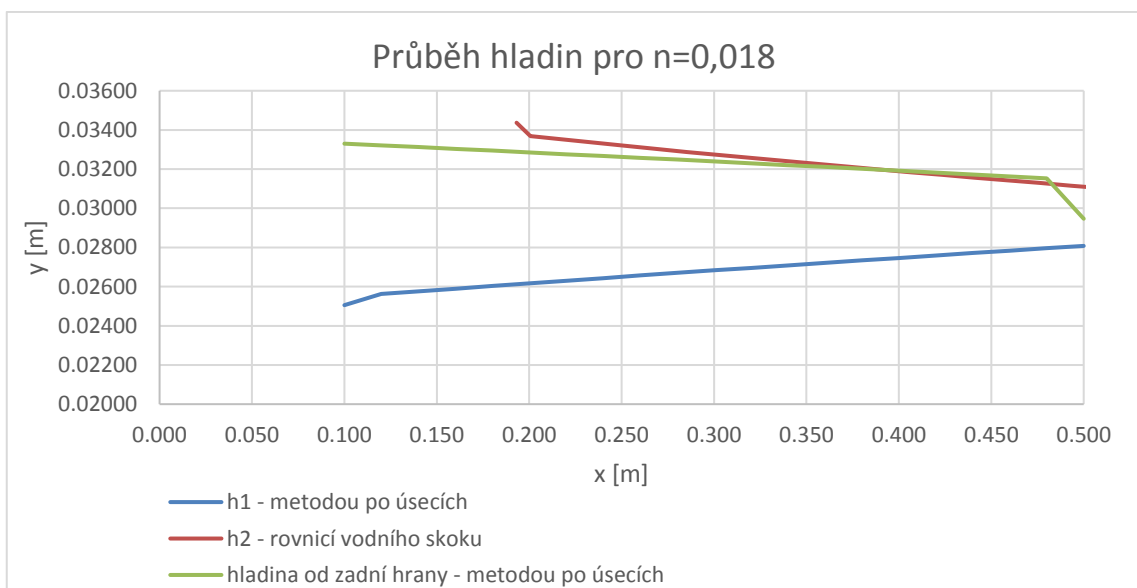
Další výpočet proběhl za drsnosti koryta $n = 0,020$. Výsledky vypadají takto:



Obrázek 23 Průběh hladin pro $n=0,020$ (počátek souřadnic je na nátokové hraně koruny)

Křivka druhých vzájemných hloubek vodního skoku a vypočtené průběhy hladiny říčního proudění se nám protnulý. Z toho vyplývá, že při vyšších drsnostech koryta je tedy možný vznik vodního skoku na koruně bez vlivu spodní vody. Tyto drsnosti odpovídají povrchům: beton na dobře vyhloubené skále, betonové dno se stěnami z lomového kamene, štěrkové dno se stěnami ze smíšeného kamene do betonu [16].

Hranice pro vznik vodního skoku pro tento případ byla vypočtena při $n = 0,018$. Tento případ vypadá takto:



Obrázek 24 Průběh hladin pro $n=0,018$ (počátek souřadnic je na nátokové hraně koruny)

Při menších drsnostech koryta n již k vodnímu skoku dle výpočtu nedojde. Těmto drsnostem odpovídají přibližně stejné materiály jako v předchozím případě.

Možnost vytvoření vodního skoku zde tedy je, ale pouze v případech velice zdrsněných povrchů. Tudíž se nezdá vhodné brát Obrázek 8 a Obrázek 9 jako reprezentativní případ reálného průběhu hladiny pro širokou korunu v rozmezí $4h < t < 10h$.

Pro posouzení ostatních prezentovaných hladin bude zapotřebí vlastního měření, neboť nebylo nalezeno vhodné již vypracované měření s vlivem spodní hladiny.

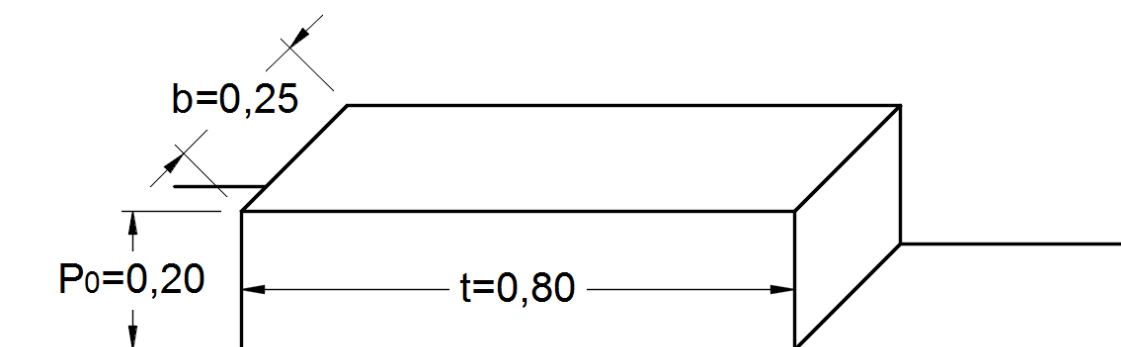
7. Vlastní měření

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



Obrázek 25 Měrný žlab

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



Obrázek 26 Rozměry široké koruny použité pro měření [m]

Byla zvolena střední hodnota pro přepad přes širokou korunu **Typ B** viz Obrázek 3 a rovnice (3.2), tedy $t = \frac{4+10}{2}h = 7h$. Tomu odpovídá přepadová výška $h = \frac{t}{7} = \frac{0,8}{7} = 0,1143\text{ m}$. Tedy $h_0 = h + P_0 = 0,1143 + 0,1994 = 0,3137\text{ m}$.

Nejprve proběhlo pozorování vlivu hladiny spodní vody h_σ na průběh hladiny nad korunou. Navýšení spodní vody bylo docíleno za pomoci posunu dvou na sobě přilehlých desek s otvory. Tyto desky se při regulaci začaly překrývat a hladina spodní vody byla navýšena.



Obrázek 27 Regulace odtoku (vlevo) , uchycení široké koruny ve žlabu (vpravo)

Po vyzkoušení mnoha variant vlivu hladiny spodní vody na průběh hladiny nad korunou se vytyčilo několik specifických průběhů hladin. Ty se následně naměřily. Bylo provedeno celkem 6 detailních měření průběhů hladin. K naměření průběhů hladin bylo nejdříve nutno nastavit správný průtok a následně byly hladiny měřeny za pomoci několika nástrojů.

7.1. Nastavení průtoku a měřicí nástroje

Voda byla do žlabu čerpána odstředivým čerpadlem. Pro nastavení 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 průtoku pro dosažení přesné hodnoty $h = 11,43 \text{ cm}$. Tato hodnota byla přeměřena v doporučené vodorovné vzdálenosti $3 \sim 4h$ od nátokové hrany přelivu [15]. Následně byl změřen průtok, který byl čerpán do žlabu. Proběhla dvě měření průtoku. V prvním z nich byl průtok naměřen objemově dle proteklého množství vody za určitou časovou jednotku za pomoci indukčního průtokoměru Badger Meter umístěného na vtokovém potrubí do žlabu. Druhý průtok byl naměřen na Thomsonovu měrném ostrohranném přelivu umístěném za odtokem ze žlabu. Výsledný průtok byl uvažován jako průměr z takto naměřených průtoků.



Obrázek 28 Ventily s osazeným průtokoměrem (vlevo) , Vyhodnocovací jednotka průtokoměru (uprostřed) , Thomsonův přeliv (vpravo)

K ustálení proudu a rovnoměrnosti nátoky sloužily dva děrované plechy, za kterými jsou osazeny voštiny. Na hladině je 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 pulzaci 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 ukazuje průměrnou hodnotu. Tímto lze objektivně odečíst průměrnou výšku rozkolísané hladiny.



Obrázek 29 Hrotové měřítko (vlevo) , Elinka-001 (vpravo)

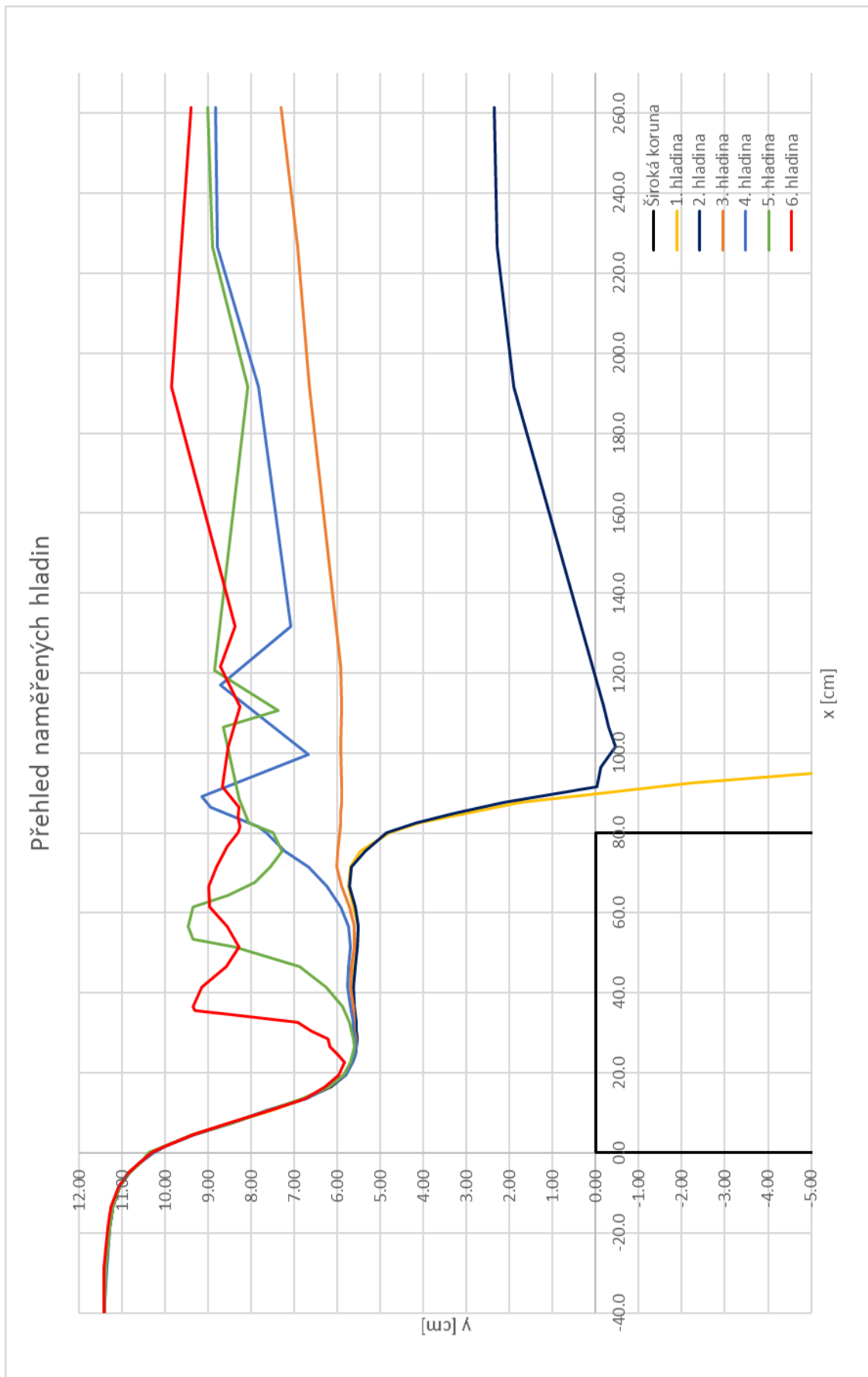
7.2. Naměřené hladiny

Jak již bylo zmíněno, proběhlo celkem 6 měření průběhů hladiny. Tato měření proběhla při specifických průbězích hladiny. Základní hodnoty přepadu pro měření jsou tyto:

h	0.1143 m
H_0	0.1160 m
P_0	0.1994 m
b	0.2510 m
Q	0.0146 m ³ /s
q	0.0580 m ² /s
v_0	0.1849 m/s
$y_c=h_c$	0.07 m

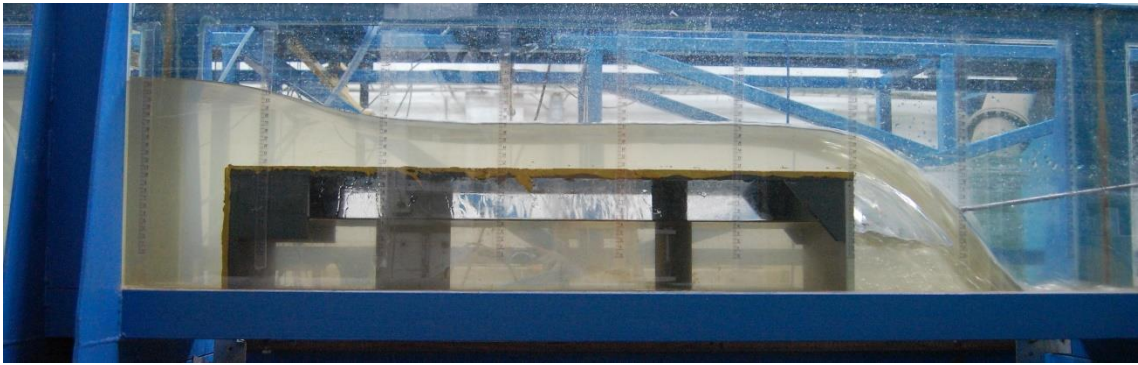
Tabulka 6 Základní hodnoty při měření

Nejprve si prezentujeme grafické výsledky měření a porovnání všech šesti měření hladiny. Následně se budeme věnovat postupně jednotlivým měřením.

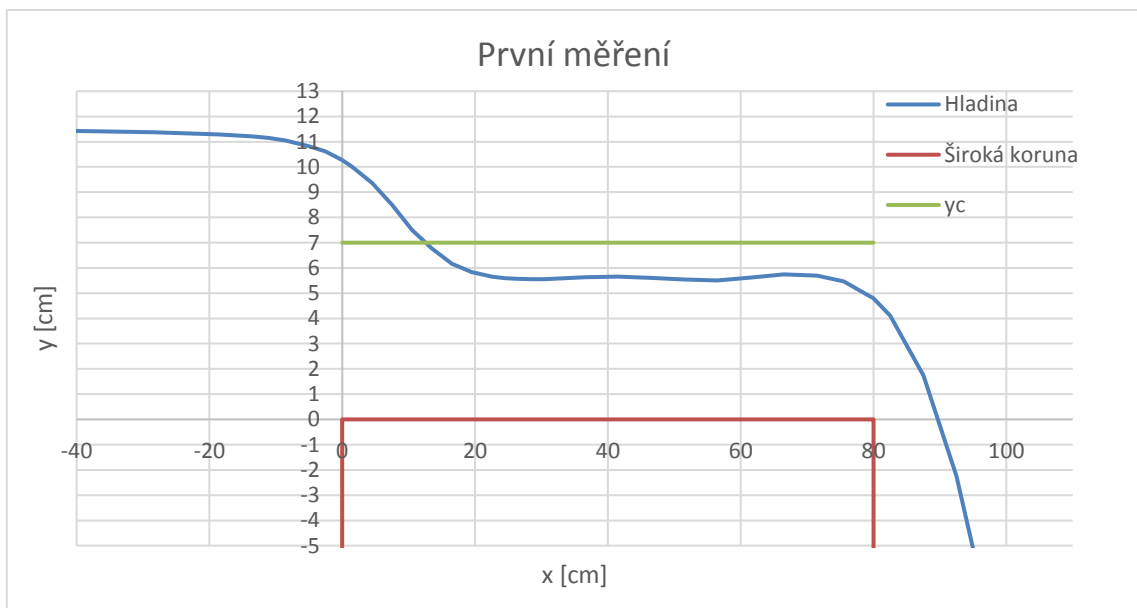


Obrázek 30 Porovnání naměřených hladin při vlivu spodní vody (počátek souřadnic je na horní nátokové hraně koruny)

7.2.1. První měření



Obrázek 31 Fotografie prvního měření



Obrázek 32 Naměřená data (počátek souřadnic na nátokové hraně koruny)

První měření probíhalo bez vlivu spodní vody. Tedy $P_\sigma \gg h_d$. Přičemž prostor pod paprskem přepadající vody za korunou byl řádně zavzdušněn. Jak lze vidět, hladina se nám po celé délce koruny pohybuje pod výškou hladiny kritického proudění a následně volně přepadá. Je tedy patrné, že nám vodní skok nad korunou nevznikne a proudění spočine po celou dobu v bystrinném proudění. Nejnížší místo hladiny bylo naměřeno nad korunou ve výšce $h_1 = 5,56 \text{ cm}$. Výška hladiny nad koncem koruny byla naměřena $y_e = 4,79 \text{ cm}$.

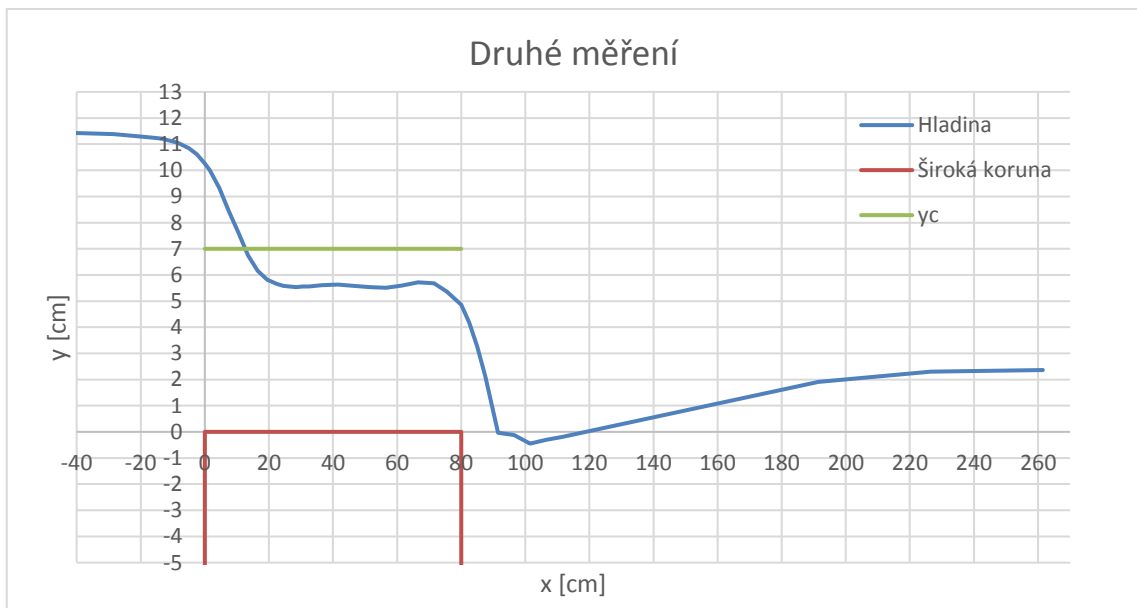
Nad koncem koruny dochází při bystrinném proudění ke snížení hladiny. Lze vyjádřit snížení vzhledem ke kritické hloubce. Z naměřených dat vyjde tato hodnota: $\frac{y_e}{h_c} = \frac{4,79}{7} = 0,684$.

Průběh hladiny odpovídá průběhům hladin naměřených Zachovalem [15] (viz Obrázek 17), podrobnější porovnání bude provedeno v kapitole 8.1.2. Jednoznačně toto měření neodpovídá žádnému prezentovanému vykreslení v učebnicích hydrauliky (viz Obrázek 3 a Obrázek 8 až Obrázek 14).

7.2.2. Druhé měření



Obrázek 33 Fotografie druhého měření



Obrázek 34 Naměřená data (počátek souřadnic na nátokové hraně koruny)

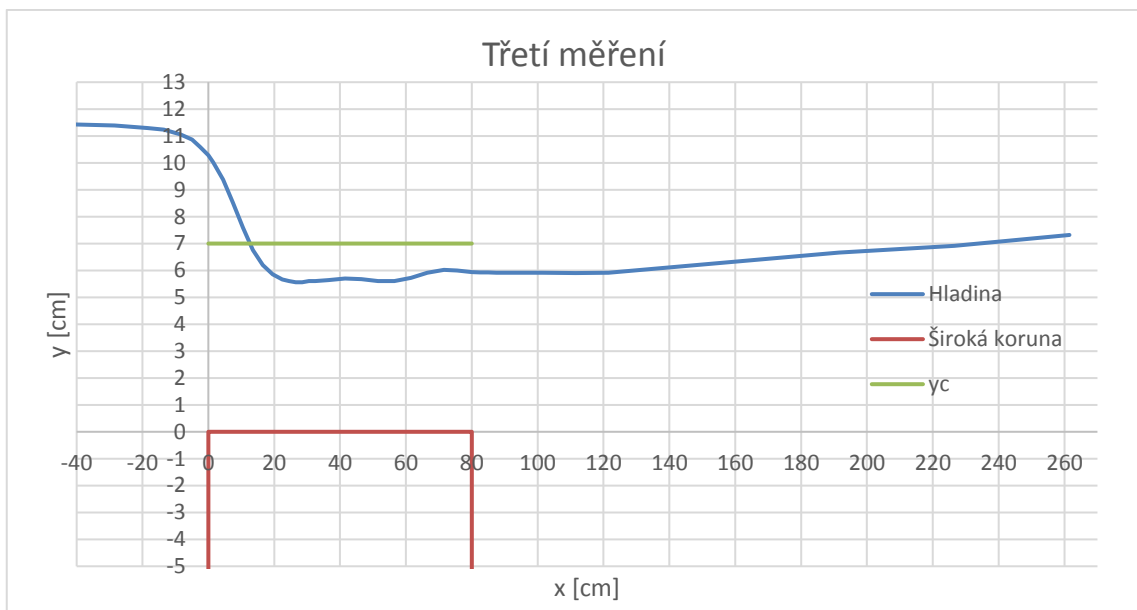
Druhé měření bylo vzato v moment, kdy hladina spodní vody začne ovlivňovat výšku přepadající přes zadní konec koruny y_e . Přičemž v tento moment bylo naměřeno $y_e = 4.86 \text{ cm}$. Tento jev vzniká v momentě, kdy výška hladiny spodní vody bezprostředně za přelivem je přibližně ve stejné výšce jako P_σ .

Hladina vody nad korunou se v tomto případě stále pohybuje pod výškou hladiny kritického proudění. Je tedy patrné, že proudění spočine po celou dobu v bystřinném proudění. Nejnižší výška hladiny nad korunou je $h_1 = 5,54 \text{ cm}$. Toto měření tedy také neodpovídá žádnému z prezentovaných případů v literatuře hydrauliky (viz Obrázek 3 a Obrázek 8 až Obrázek 14).

7.2.3. Třetí měření



Obrázek 35 Fotografie třetího měření



Obrázek 36 Naměřená data (počátek souřadnic na nátokové hraně koruny)

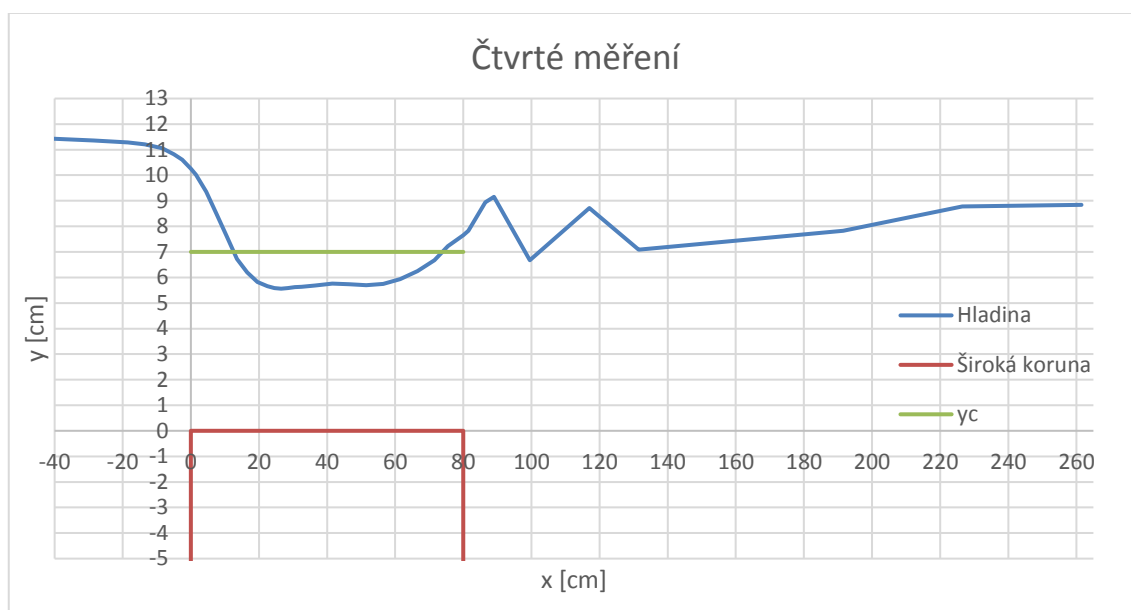
Třetí měření bylo specifické tím, že průběh hladiny před koncem koruny ($x = 66.5 \text{ cm}$) a za korunou ($x = 121.5 \text{ cm}$) je téměř vodorovný s rozdílem $\Delta y \leq 1,2 \text{ mm}$. Hladina vody nad korunou je pod úrovní kritického proudění. Probíhá tedy po celou dobu v bystrinném proudění. Tyto dva faktory implikují, že vodní skok probíhá pod hladinou za korunou. Patrně je průběh hladiny rovný z důvodu pozvolného rozšiřování proudu kvůli úplavu za korunou. Přechod do říčního proudění je tedy za korunou a vzniká vodní skok s povrchoým režimem. Díky tomu může být průběh hladiny za korunou vodorovný.

Nejnižší naměřená hladina je $h_1 = 5,56 \text{ cm}$. Toto měření také neodpovídá žádnému prezentovanému vykreslení v učebnicích hydrauliky (viz Obrázek 3 a Obrázek 8 až Obrázek 14).

7.2.4. Čtvrté měření



Obrázek 37 Fotografie čtvrtého měření



Obrázek 38 Naměřená data (počátek souřadnic na nátokové hraně koruny)

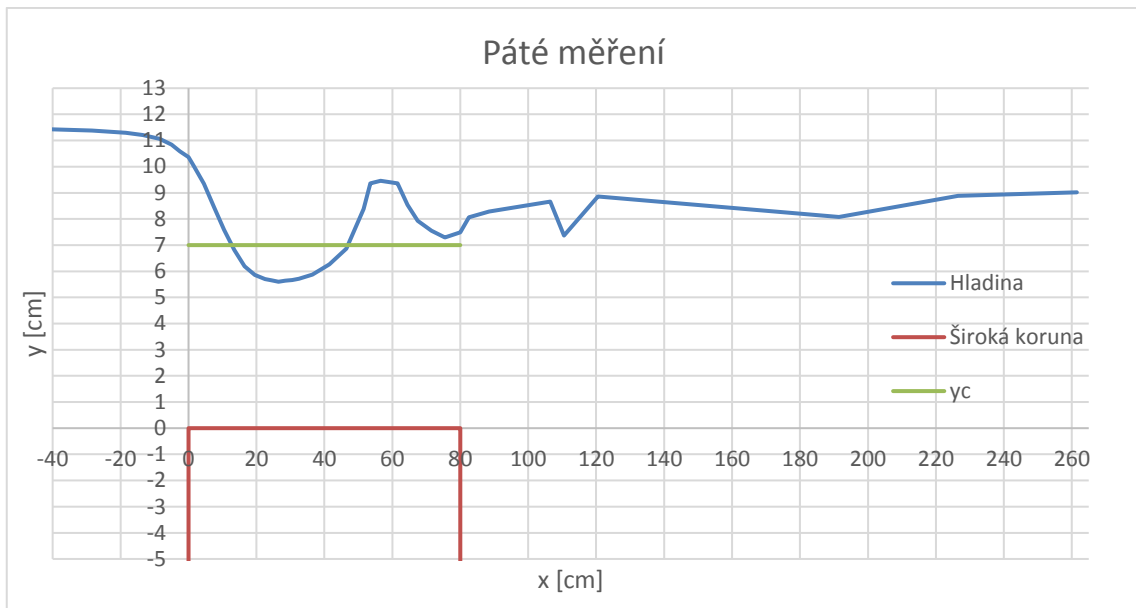
Hladina spodní vody se u tohoto měření pohybuje těsně pod výškou hladiny spodní vody u 5. měření. Respektive při sebemenším navýšení hladiny spodní vody se nám vodní skok přesune nad korunu přelivu, jak je patrné na Obrázku 30. V tomto případě nám již vzniká patrný vodní skok s vlnami na hladině, což indikuje, že se nejedná o vodní skok s čistě povrchovým režimem. Hladina přechází z bystřinného do říčního proudění ve vzdálenosti $x = 73.5 \text{ cm}$. Nejnižší výška nad korunou je $h_1 = 5,56 \text{ cm}$.

Tento průběh hladiny odpovídá průběhu hladin v literatuře hydrauliky od autorů Agroskin, Dimitrijeva a Pikalova [6] prezentovaném na Obrázku 14., kde první vlna vodního skoku se nachází těsně za koncem koruny. Za ní následuje rozvlněná hladina. Zde ovšem následuje problém určení 2. vzájemné hloubky vodního skoku, neboť se nachází až za korunou.

7.2.5. Páté měření



Obrázek 39 Fotografie pátého měření

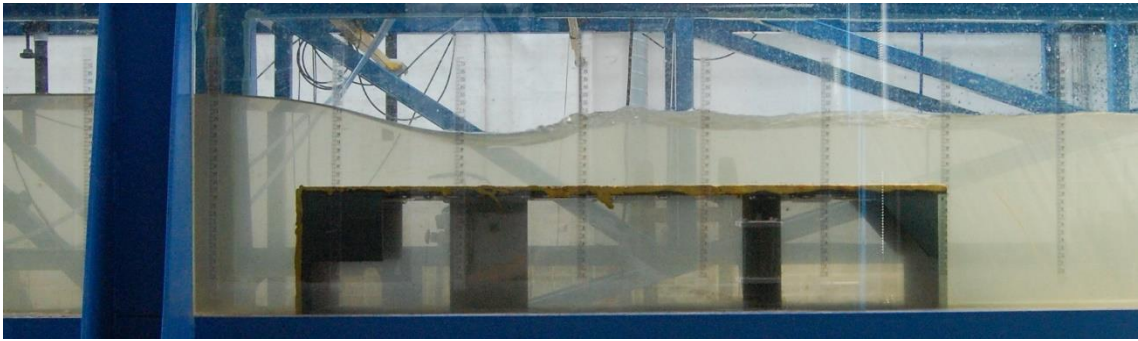


Obrázek 40 Naměřená data (počátek souřadnic na nátokové hraně koruny)

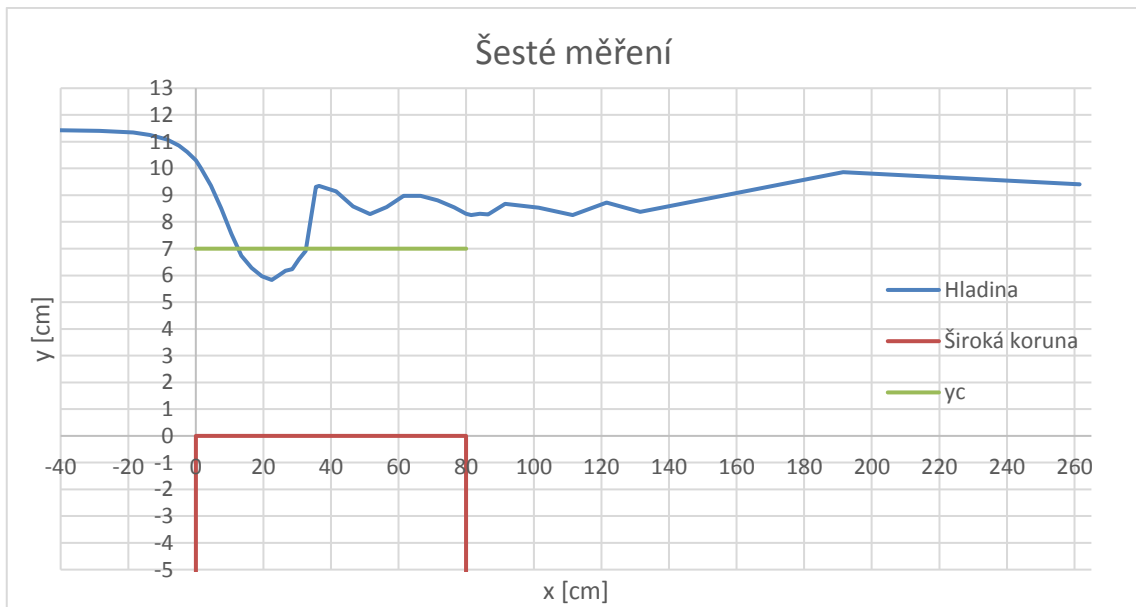
Jak již bylo zmíněno, tento průběh hladiny nastává při sebemenším navýšení hladiny spodní vody u čtvrtého měření. Vodní skok se přesune zpoza koruny nad korunu. Tento jev lze vysvětlit tím, že podmínkou, aby se vytvořil vodní skok tak potřebuje oporu jednak od spodní vody tak i ode dna. V případě, že snížíme spodní vodu, vodní skok by se měl posunout pouze o kousek, ale vzhledem k tomu že posunutím ztratí potřebnou oporu od koruny tak se vodní skok utrhne a začne se vytvářet až za korunou (viz 4. měření). Při tomto měření byla nejmenší naměřená hloubka $h_1 = 5,60 \text{ cm}$. K přechodu do říčního proudění dochází ve vzdálenosti $x = 47 \text{ cm}$.

Tato naměřená hladina je podobná vykreslení na Obrázku 13 od Patočky [2]. S tím, že se první vlna vyskytuje v určité vzdálenosti od konce koruny a prohlubeň hladiny za první vlnou se stále vyskytuje nad korunou. Ze stejného důvodu se vykreslení vodního skoku na Obrázku 3, Obrázku 10, Obrázku 11 a Obrázku 12 nezdá pravděpodobné, neboť by se vodní skok dle pokusů neudržel na této pozici a posunul by se za korunu (viz čtvrté měření).

7.2.6. Šesté měření



Obrázek 41 Fotografie šestého měření



Obrázek 42 Naměřená data (počátek souřadnic na nátokové hraně koruny)

Tento průběh hladiny byl naměřen při výšce hladiny spodní vody těsně předtím, než bude mít měřitelný vliv na hladinu vody před přelivem. Respektive hladina spodní vody je v nejvyšší možné poloze předtím, než se přepad stane zatopeným. Tohoto se dosáhlo tak, že byla hladina spodní voda navýšena natolik, až byl naměřen nárůst h a následně byla hladina spodní vody a malinko snížena. Pravděpodobně, ale byl přepad již mírně zatopený, neboť při měření byla zaznamenána navýšená hladina první vzájemné hloubky a to $h_1 = 5,83 \text{ cm}$. Přejít do říčního proudění byl při tomto měření ve vzdálenost $x = 32,6 \text{ cm}$.

Tento naměřený průběh hladiny také neodpovídá žádnému z prezentovaných vykreslení průběhů hladin v literatuře hydrauliky. Je zde ovšem velmi dobře vidět průběh vlnovitého vodního skoku, kde první vlna je nejvyšší a následně se hladina uklidňuje několika stále se zmenšujícími vlnami až na 2. vzájemnou hloubku hladiny h_2 . Přesně jak je to prezentováno pro vlnovitý vodní skok viz Obrázek 6 a Obrázek 7.

8. Vyhodnocení měření

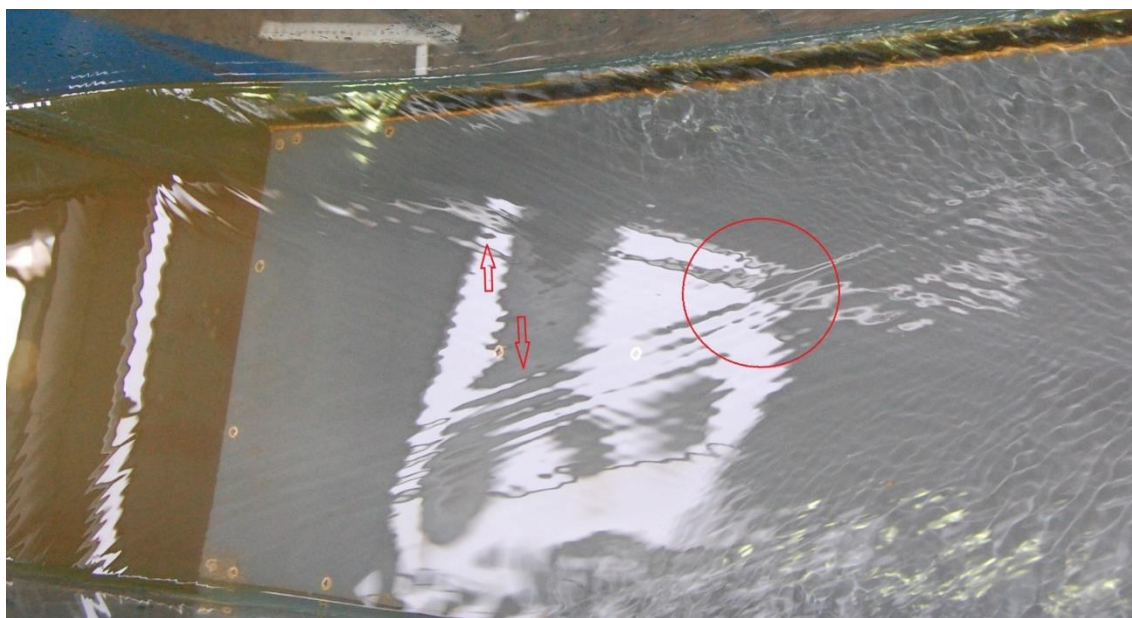
U všech měření byl zásadní problém definice hladiny spodní vody, neboť hladina vody za přelivem začíná stoupat a následně se ustaluje a začíná klesat. Toto je pravděpodobně způsobováno úplavem tvořícím se za korunou, o kterém byla zmínka v kapitole 7.2.3. Za korunou dochází k rozšiřování proudu a tím ke zvyšování hladiny. Není tedy jednoznačné, kde brát hodnoty pro hladinu spodní vody. Neboť hodnota hladiny spodní vody se využívá například pro definici dokonalého či nedokonalého přepadu viz rovnice (2.3), mělo by se jednoznačně určit, kde tuto hodnotu vzít.

Například u šestého měření, kdy je předpoklad mírného vzduť hladiny h , se hladina v rozmezí $80 < y < 130 \text{ cm}$ pohybuje v přibližně stejné výšce jako druhá vzájemná hloubka h_2 , ale následně začne stoupat na mnohem vyšší hodnotu než je h_2 . Zde není tedy jasné kde vzít hodnotu h_0 a není možné rovnicí (2.3) posoudit, o jaký typ přepadu se jedná.

8.1. Průběh hladin pouze v bystrinném proudění nad korunou

8.1.1. Navýšení hladiny u středu koruny

Zajímavým aspektem těchto průběhů je, že zhruba ve středu koruny dojde k mírnému navýšení hladiny. Tento jev je způsoben takzvanými příčnými vlnami. Tyto vlny se vytvářejí při změně směru proudnic způsobených překážkou či změnou koryta, v našem případě širokou korunou [17]. Navýšení hladiny vzniká, kdy se příčné vlny šířící se od stěn žlabu setkají ve středu koryta. Neboť měření probíhalo ve středu žlabu, tak jsou zde tyto vlny zaznamenány.

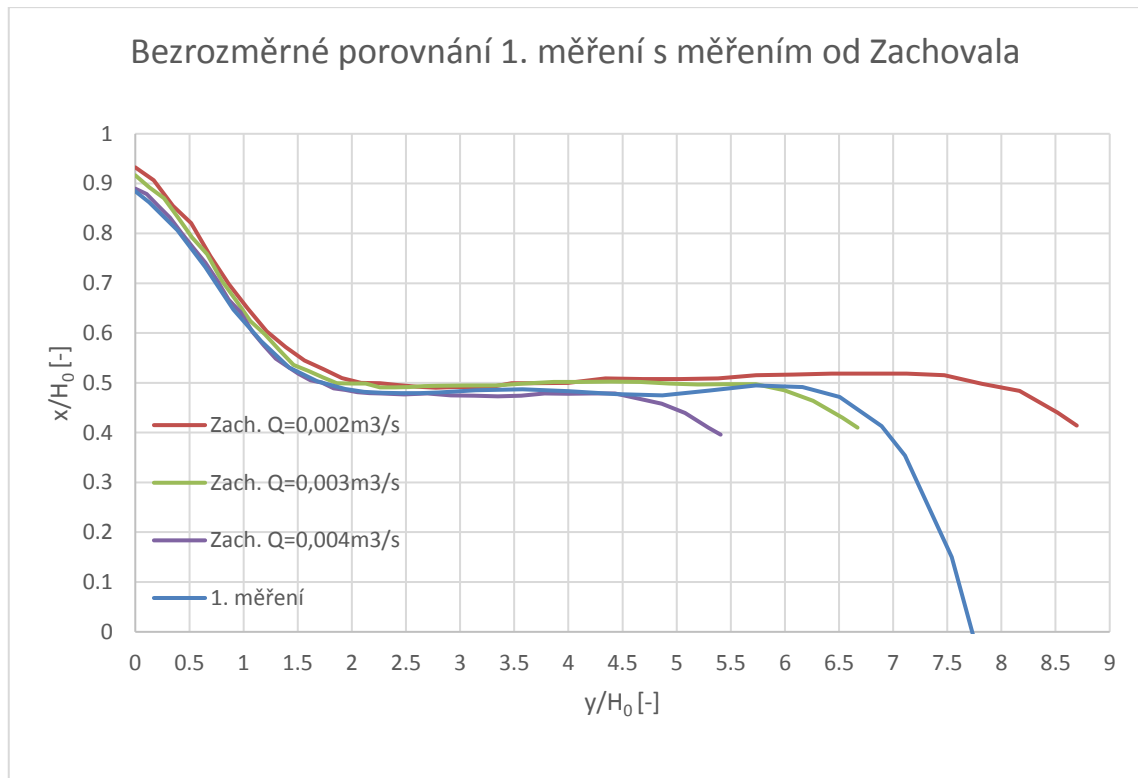


Obrázek 43 Fotografie příčných vln (znázorněno šipkami) s jejich střetem ve středu žlabu (znázorněno kruhem)

Jak lze vypořadovat, tak tento jev je ještě patrný u čtvrtého měření, kde hladina spodní vody ještě neovlivňuje průběh hladin uprostřed koruny.

8.1.2. Porovnání 1. měření s měřením od Zachovala

Porovnání bylo provedeno vykreslením průběhů hladin v bezrozměrných souřadnicích. Veškeré souřadnice byly poděleny výškou H_0 (tj. přepadovou výškou navýšenou o rychlostní výšku). Tím bylo docíleno dobrého porovnání i přes rozdílné rozměry přelivů.



Obrázek 44 Bezrozměrné porovnání 1. měření s měřením od Zachovala [15] (začátek souřadnic na nátokové hraně koruny)

Z grafických výsledků je patrné, že měření si poměrně odpovídají. Rozchod jednotlivých měření může být zaokrouhlenými hodnotami H_0 převzatých od Zachovala [15]. Také je patrné, že u měření od Zachovala není vidět nárůst hladiny uprostřed koruny, jako tomu je u našich měření. Toto může být tím, že Zachoval měřil na korytě o šířce $b = 1 \text{ m}$ a výše zmíněné příčné vlny mají jiný charakter.

Pokud z naměřených hodnot vypočteme a porovnáme součinitel výškové kontrakce ε_1 (3.12) pro minimální hloubku h_1 , tak dostaneme: $\varepsilon_1 = \frac{h_1}{H_0} = \frac{5,56}{11,60} = 0,479$. Tento součinitel vychází menší než v Tabulce 1 resp. Tabulce 2. Z hodnot uvedených v Tabulce 6 lze vyjádřit z výrazu (3.11) součinitel rychlosti přepadu $\varphi = \frac{Q}{b \cdot h_1 \sqrt{2g(H_0 - h_1)}} = 0,959$. Pokud porovnáme součinitel φ s Tabulkou 1 resp. Tabulkou 2 odpovídá výsledek koruně s dobře zaoblenou vstupní hranou i přesto, že při měření byla využita ostrá vstupní hrana. Ověřit můžeme i součinitel přepadu m a to z výrazu (3.14), kde po úpravě dostaneme $m = \frac{Q}{b \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2}} = 0,331$. To dle Tabulky 1 resp. Tabulky 2 odpovídá seříznuté vstupní hraně koruny což opět není tento případ. Pokud bychom vyjádřili ztrátový součinitel ξ z výrazu $\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi}}$ s předpokladem $\alpha = 1$, tak při součiniteli z Tabulky 1 ($\varphi = 0,9$) dostaneme součinitel místních ztrát o hodnotě $\xi = 0,235$ a pro

součinitel vypočteného z měření ($\varphi = 0,959$) získáme součinitel místních ztrát o hodnotě $\xi = 0,089$. To činí téměř trojnásobný rozdíl.

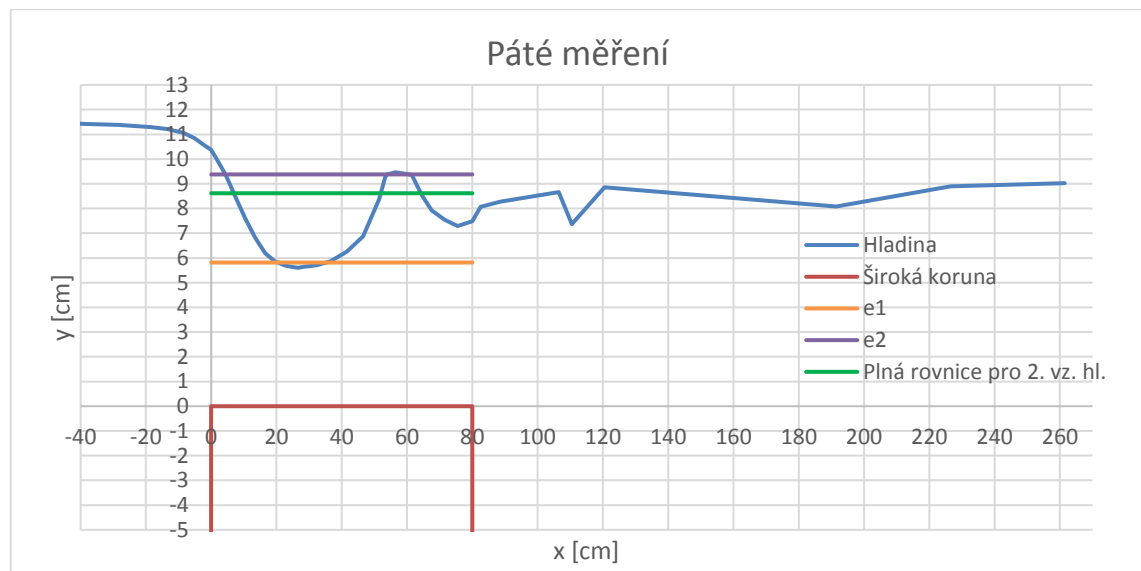
Pokud přepočtem přepadový součinitel m na přepadovým součinitelem od Zachovala C_d [10], kde $C_d = \left(\frac{3}{2}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{2} \cdot m = 0,861$ a $\frac{h}{P_0} = 0,573$, tak tato hodnota poměrně dobře koresponduje s výsledky od Zachovala [10] na rozdíl od Tabulky 1 resp. Tabulky 2.

8.2. Průběh hladin s říčním prouděním nad korunou

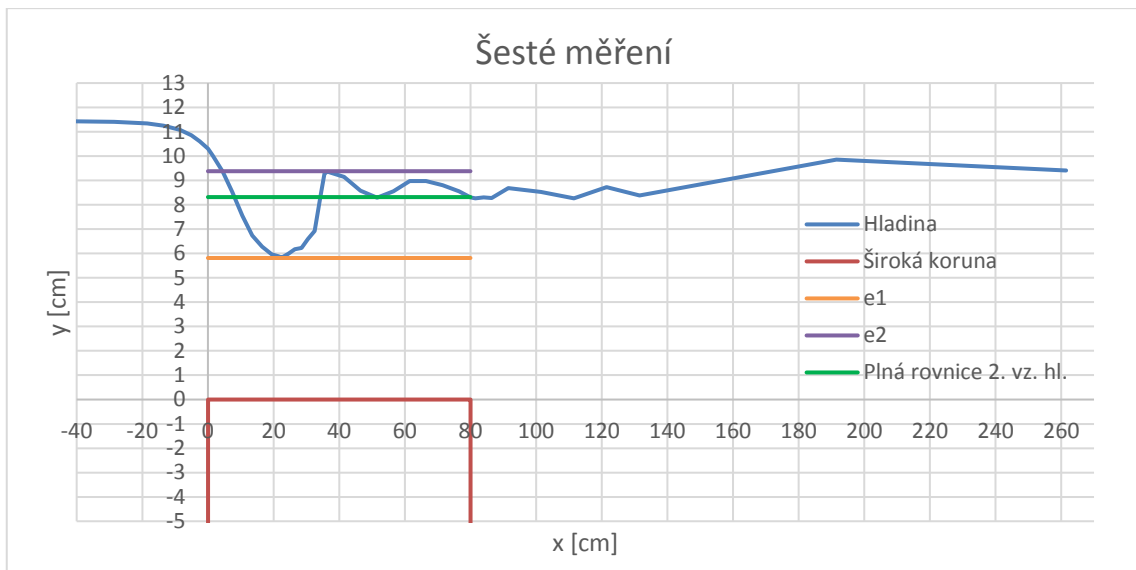
U těchto průběhů bude zhodnocena rovnice pro vlnovitý vodní skok (4.11) a z ní vyplývající součinitele kontrakce. K posouzení výpočtů využijeme hodnoty získané z pátého a šestého měření.

8.2.1. Rovnice vodního skoku

Pro páté a šesté měření bylo využito upravených součinitelů kontrakce z Tabulky 2 a výpočet byl proveden stejně jako v kapitole 6.2.2. Dále byl proveden výpočet druhé vzájemné hloubky h_2 za pomoci plné rovnice (4.6), neboť při aplikaci součinitelů kontrakce vycházely kontroverzní hodnoty a bylo potřeba jejich porovnání. Jak lze vidět na těchto výsledcích:



Obrázek 45 Porovnání vypočtených hodnot s pátým měřením, vodorovné čáry znázorňují výšky vypočtených hladin, kde linie e_1 resp. e_2 odpovídá vypočtené hloubce h_1 resp. h_2 při využití součinitelů ε_1 resp. ε_2 z Tabulky 2



Obrázek 46 Porovnání vypočtených hodnot s šestým měřením, vodorovné čáry znázorňují výšky vypočtených hladin, linie e1 resp. e2 odpovídá vypočtené hloubce h_1 resp. h_2 při využití součinitelů ε_1 resp. ε_2 z Tabulky 2

Z výsledků je patrné, že za použití součinitelů výškové kontrakce z upravené Tabulky 2 dostaneme velmi přesný výškový popis první vlny vlnovitého vodního skoku. Rozdíl naměřené výšky první vlny a výšky vypočtené ze součinitelů výškové kontrakce je v obou případech $\Delta h_{vlny} \leq 0,8 \text{ mm}$. Což svým způsobem dobře popisuje vykreslení na Obrázek 8 až Obrázek 12.

Ovšem jak je lze vidět na Obrázku 7 druhá vzájemná hloubka vlnovitého vodního skoku není definována jako jeho první vlna, ale jako ustálená hladina za vlnami. Ani v jednom z těchto měření nebyla hladina ustálená, ale z obou obrázků (Obrázek 44 a Obrázek 45) je patrné, že při využití plné rovnice vzájemných hloubek (4.6) se výsledná výška přibližuje druhé vzájemné hloubce, nacházející se až dál za první vlnou, mnohem lépe než při využití součinitelů výškové kontrakce. Toto je vyloženě dobře patrné u 6. měření. U 5. měření se druhá vzájemná hloubka nachází pravděpodobně již za koncem koruny a je patrné, že výška hladiny se pohybuje spíše pod hodnotou při využití plné rovnice (4.6).

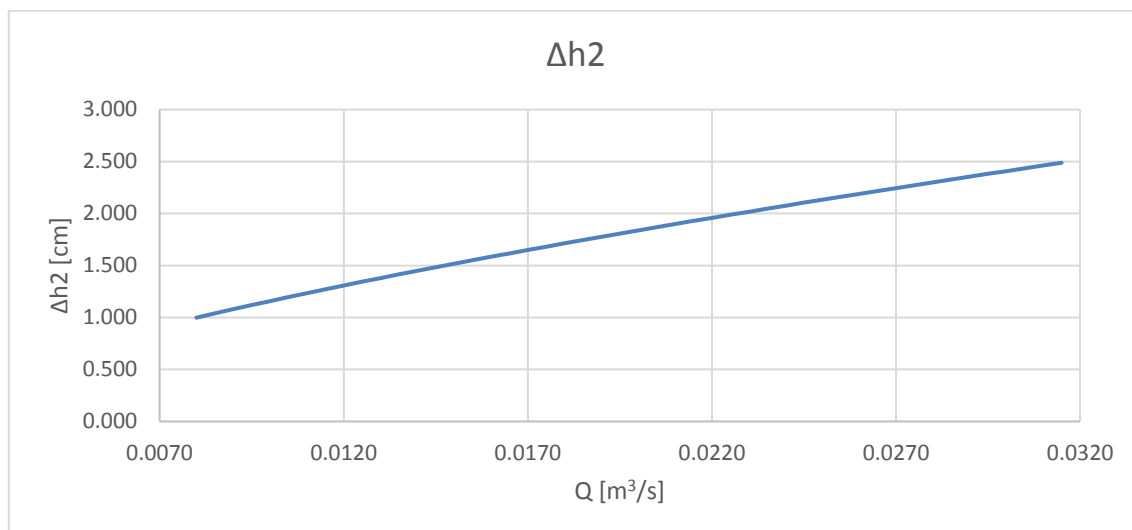
Pro určení přibližné vzdálenosti 2. vzájemné hloubky vodního skoku byl využit výraz pro délku vlnovitého vodního skoku (4.15). Pro 5. měření místo 2. vzájemné hloubky odpovídá hodnota $x = 58,5 \text{ cm}$ a u 6. měření je tato hodnota $x = 48,9 \text{ cm}$. U pátého měření odpovídá tato hodnota pozici 2 cm za vrcholem první vlny vodního skoku a u šestého měření je tato hodnota 10 cm. Z naměřených hladin je ale zřejmé, že k uklidnění hladiny dochází mnohem dál a to klidně i o trojnásobnou délku, než je uváděna ve výrazu (4.15). Tento rozdíl mohl vzniknout vzhledem k podmínkám při kterých tato hodnota byla měřena. Dimitrijevič měřil tuto vzdálenost na poddajném dnu a zkoumal, kde vlnovitý skok vytvoří poslední výmol [8]. Jelikož ale bylo dno poddajné, výmoly by se vytvořily po celé délce vlnovitého vodního skoku a proudnicový stav vlnovitého vodního skoku by byl alterován dle tvaru dna. Určením délky vlnovitého vodního skoku jsme si tedy nepomohli k výpočtu polohy druhé vzájemné hloubky a spokojíme se tedy s grafickými výsledky.

Naopak první vzájemná hloubka h_1 vyšla ze součinitelů kontrakce dobře. U 5. měření tvoří rozdíl vypočtené a naměřené první vzájemné hloubky $\Delta h_1 = 2,15 \text{ mm}$ a u 6. měření $\Delta h_1 = 0,15 \text{ mm}$.

Velmi důležitým poznatkem je ovšem velký rozdíl vypočtených druhých vzájemných hloubek při využití plné rovnice vzájemných hloubek (4.6) a součinitelů výškové kontrakce vyplývajících ze zkrácené rovnice pro vlnovitý vodní skok (4.11). U pátého měření tento rozdíl tvořil $\Delta h_2 = 7,6 \text{ mm}$ a u 6. měření $\Delta h_2 = 10,6 \text{ mm}$. Je třeba tedy posoudit, zda lze pro přepad přes širokou korunu využít zkrácenou rovnici pro vlnovitý vodní skok.

8.2.2. Posouzení zkrácené rovnice pro vlnovitý vodní skok

Posouzení bude provedeno tak, že pro sérii průtoků, jež se pohybují v mezích vztahu přepadové výšky a délky koruny $4h < t < 10h$, bude vypočtena druhá vzájemná hloubka tabulkovým součinitelem výškové kontrakce z Tabulky 2 a plnou rovnicí vzájemných hloubek (4.6). Následně se vyjádří v závislosti na průtoku rozdíl těchto hloubek Δh_2 . Využije-li se k výpočtu koruna použitá při měření (viz *Obrázek 26*) odpovídají tomu přibližně průtoky $0,0080 - 0,0315 \text{ m}^3/\text{s}$. První vzájemná hloubka bude vypočtena také z tabulkového součinitele výškové kontrakce. Pro tuto řadu průtoků vyjdou tyto výsledky:



Obrázek 47 Rozdíl hloubek při využití tabulkového součinitele výškové kontrakce a plné rovnice vzájemných hloubek vodního skoku

V tomto případě pro širokou korunu mohou vycházet rozdíly ve výškách hladin až $\Delta h_2 = 2,5 \text{ cm}$. To představuje chybu o velikosti 18,2%.

Při tomto výpočtu byla také nalezena nesrovnalost při vyjádření čar energie jednotlivých profilů. Výšku čáry energie nad korunou lze počítat totožně jako v rovnici (3.6). Tedy:

$$Ed_i = h_i + \frac{\alpha v_i^2}{2g} \quad (8.1)$$

Kde Ed_i – výška čáry energie nade dnem koryta (koruny) [m]

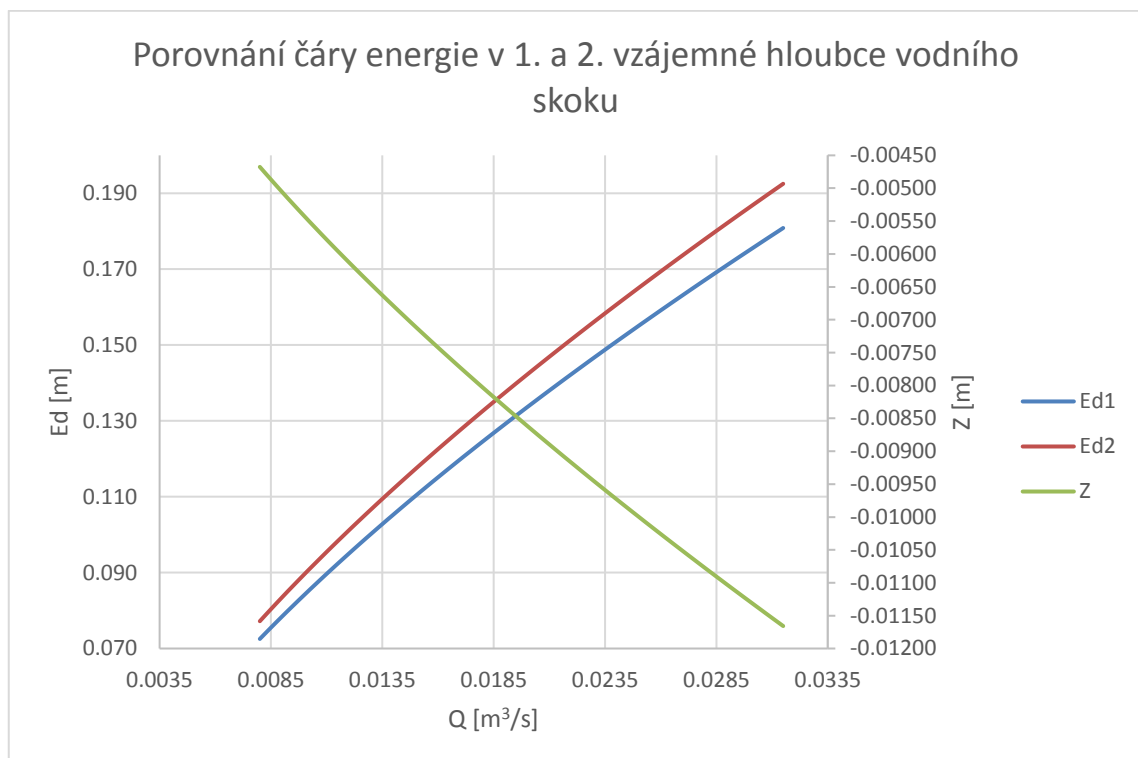
Pro využití více reprezentativních průtoků využijeme vypočtené výsledky z Tabulky 3 v kapitole **6.2.2**, kterých bylo dosaženo za pomoci tabulkových součinitelů kontrakce. Na tyto výsledky aplikujeme rovnici (8.1).

č	Q [m ³ /s]	H ₀ /P ₀ [-]	H ₀ [m]	h ₁ [m]	v ₁ [m/s]	Ed ₁ [-]	h ₂ [m]	v ₂ [m/s]	Ed ₂ [-]
1	0.02	0.23	0.058	0.029	0.692	0.053	0.046	0.429	0.056
2	0.03	0.3	0.075	0.038	0.796	0.070	0.061	0.493	0.073
3	0.04	0.37	0.093	0.046	0.860	0.084	0.075	0.533	0.089

Tabulka 7 Vyjádření čáry energie ve vzájemných hloubkách vlnitého vodního skoku za využití naměřených hodnot od Zachovala [15]

Z výsledků je vidět, že v případě využití tabulkových součinitelů výškové kontrakce vyplývajících ze zkrácené rovnice (4.11) nám v těchto třech případech vychází fyzikální nesmysl. Čára energie v druhé vzájemné hloubce vodního skoku nám vychází výš než v první. To by znamenalo, že nám energie přibývá, což není možné.

Vyzkoušíme-li stejný postup na pro větší množství průtoků a to 0,0080 – 0,0315 m³/s, vyjde nám tento graf:



Obrázek 48 Vykreslení výšky čáry energie pro 1. a 2. vzájemnou hloubku vodního skoku a velikost ztrát Z

Z grafu vyplývá, že veškeré ztráty mechanické energie nám při těchto průtocích budou vycházet záporné. Dále lze vypořádat to, že s narůstajícím průtokem se od sebe budou energetické výšky jednotlivých profilů vzdalovat a tím záporné hodnoty zvětšovat. Pokusíme se tedy nalézt chybu, která se s největší pravděpodobností vyskytuje ve zkrácení rovnice vlnitého vodního skoku (4.10) → (4.11) a pokusíme se ji matematicky vyjádřit.

Bernoulliho rovnice (3.4) platí mezi libovolnými profily na toku. Součinitel kinetické energie uvažujeme $\alpha = 1$. V tomto případě se zaměříme na oblast mezi profily 1 a 2 a pokusíme si vyjádřit ztrátovou výšku z Bernoulliho rovnice:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} - h_2 - \frac{v_2^2}{2g} = Z$$

aplikujeme rovnici (4.13) pro h_2 a rovnici (4.4) pro v_1 a v_2

$$h_1 + \frac{q^2}{2g \cdot h_1^2} - h_1 \cdot Fr_1^2 - \frac{q^2}{2g \cdot h_2^2} = Z$$

objevilo se ještě jedno h_2 použijeme tedy ještě jednou rovnici (4.13)

$$h_1 + \frac{q^2}{2g \cdot h_1^2} - h_1 \cdot Fr_1^2 - \frac{q^2}{2g \cdot h_1^2 \cdot Fr_1^4} = Z$$

rovnici roznásobíme h_1^2

$$h_1^3 + \frac{q^2}{2g} - h_1^3 \cdot Fr_1^2 - \frac{q^2}{2g \cdot Fr_1^4} = Z \cdot h_1^2$$

Pro levou část rovnice využijeme rovnici:

$$h^3 = \frac{q^2}{g \cdot Fr^2}$$

Tudíž:

$$\frac{q^2}{g \cdot Fr_1^2} + \frac{q^2}{2g} - \frac{q^2}{g} - \frac{q^2}{2g \cdot Fr_1^4} = Z \cdot h_1^2$$

A upravíme

$$\begin{aligned} \frac{q^2}{g} \cdot \left(\frac{1}{Fr_1^2} + \frac{1}{2} - 1 - \frac{1}{2Fr_1^4} \right) &= Z \cdot h_1^2 \\ \frac{q^2}{g} \cdot \left(\frac{2Fr_1^2 + Fr_1^4 - 2Fr_1^4 - 1}{2Fr_1^4} \right) &= Z \cdot h_1^2 \\ \frac{q^2}{2g \cdot h_1^2 \cdot Fr_1^4} \cdot (-Fr_1^4 + 2Fr_1^2 - 1) &= Z \\ -\frac{q^2}{2g \cdot h_1^2 \cdot Fr_1^4} \cdot (Fr_1^4 - 2Fr_1^2 + 1) &= Z \end{aligned}$$

Z toho dostaneme výraz:

$$-\frac{q^2}{2g \cdot h_1^2 \cdot Fr_1^4} \cdot (Fr_1^2 - 1)^2 = Z \quad (8.2)$$

Tudíž je patrné, že při využití zkrácené rovnice (4.11) nám vyjde záporná ztrátová výška pro 2. profil v jakémkoliv případě při $Fr_1 > 1$. Proto využití vzorce (4.11) není vhodné a lépe bude využívat plný vzorec pro obecný vodní skok (4.6).

Pro prezentaci byl vypočten poměr druhých vzájemných hloubek vodního skoku spočítaných podle vztahu pro vlnovitý vodní skok (4.13) a dle nezjednodušeného výrazu (4.6). Výpočet byl proveden v závislosti na Froudově čísle Fr_1 první vzájemné hloubka h_1 . Přičemž rovnici (4.6) lze napsat i v tomto tvaru:

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{8q^2}{gh_1^3}} - 1 \right) = \frac{h_1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \quad (8.3)$$

Z poměru rovnic (4.13) ku (8.3) lze tedy vyjádřit výraz vztažený k Fr_1 toto:

$$\frac{h_{2-vln}}{h_{2-plna}} = \frac{h_1 Fr_1^2}{\frac{h_1}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1)} = \frac{2Fr_1^2}{(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1)} \quad (8.4)$$

Pokud rovnici (8.4) využijeme pro výpočet základní řady Froudových čísel dostaneme tyto výsledky:

Fr_1	h_{2-vln}/h_{2-plna}	Fr_1	h_{2-vln}/h_{2-plna}
1	1.00	1.8	1.55
1.1	1.07	1.9	1.62
1.2	1.13	2	1.69
1.3	1.20	2.1	1.76
1.4	1.27	2.2	1.83
1.5	1.34	2.3	1.90
1.6	1.41	2.4	1.97
1.7	1.48	2.5	2.04
		2.6	2.11
		2.7	2.18
		2.8	2.25
		2.9	2.32

Tabulka 8 Poměr výpočtu vlnovitého a prostého vodního skoku v závislosti na Froudově čísle

Levá tabulka je vypočtena do maximální hodnoty Fr_1 pro vznik vlnovitého vodního skoku (4.2) dle učebnic hydrauliky. Ale dle publikace od autorů Chanson a Montes [17] lze pozorovat vytvoření vlnovitého vodního skoku až do $1 < Fr_1 < 2,9$.

V obou případech nám vycházejí veliké rozdíly. V případě levé tabulky až 1,5x větší hodnoty než ve skutečnosti a u pravé tabulky nám vycházejí rozdíly více než dvojnásobné. Z toho lze jednoznačně vyvodit, že tabulku zkrácenou rovnicí pro vlnovitý vodní skok nelze využívat.

9. Závěr

Cílem práce byla literární rešerše průběhů hladin nezatopeného přepadu. Rozbor a posouzení přístupů vedoucích ke stanovení charakteristických hloubek. Případný návrh úprav ve stávajících postupech či navržení postupů nových.

Nejdříve byl představena problematika široké koruny, hydraulické charakteristiky přepadu a představení vlnovitého vodního skoku vznikajícího nad korunou. Bylo prezentováno několik průběhů hladin použitých v literatuře hydrauliky, jejich charakteristické rysy a dělení. Následně se práce zaměřila na nalezená měření od různých autorů, jež by vyhovovala charakteristikám široké koruny, při kterých by měl vznikat vodní skok. Tato měření byla provedena bez vlivu spodní vody.

Tato převzatá měření byla popsána a následně posouzena na vznik vodního skoku, neboť naměřené průběhy hladin nenaznačovaly jeho vznik. Z výsledků bylo patrné, že vodní skok nad korunou u těchto měření nevznikl. Byl proveden i výpočet vzájemných hloubek ze součinitelů kontrakce pro vyjádření možné chyby, která by mohla nastat při takto zvoleném výpočtu. Při tomto ověřování chyby byla nalezena nesrovnalost tabulkových součinitelů kontrakce s výsledky přepočtených součinitelů kontrakce dle vzorců uváděných v literatuře hydrauliky. Tyto tabulky byly alterovány. Poté byl ověřeno, zdali se vodní skok vůbec vytvoří nad korunou bez vlivu spodní vody nebo ne. Z výsledků vyšlo, že se může vytvořit ale pouze při větším Manningově stupni drsnosti a to $n > 0,018$.

Následně proběhlo vlastní měření pro zjištění průběhů hladin při různých polohách hladiny spodní vody. Proběhlo celkem 6 detailních měření průběhů hladin. Tato měření byla porovnána mezi sebou a následně jednotlivě popsána a porovnána s vykreslením průběhů hladin v literatuře hydrauliky. U prvních třech měření nevznikl vodní skok nad korunou a u zbytku ano.

Ve vyhodnocení měření byl nejdříve popsán problém při definici spodní vody, neboť za korunou hladina u všech měření stoupá. Tento jev není zaznamenán v žádné z učebnic hydrauliky v souvislosti se širokou korunou a případný odečet h_o není nikde upřesněn. Poté byl popsán zvláštní jev nárůstu výšky hladiny uprostřed koruny. Tento jev vzniká vlivem příčných vln vznikajících při bystrinném proudění za překážkou v korytě. Poté byla ověřena podobnost prvního měření s měřením od Zachovala, jež vyšla pozitivně. Přičemž při výpočtů jednotlivých součinitelů m , φ a ε_1 vyšli rozporné hodnoty s Tabulkou 1 resp. Tabulkou 2. Kontrakce zúžené hloubky je výraznější, než předpokládá Tabulka 1 resp. Tabulka 2. Naopak vyšší hodnota φ resp. nižší hodnota ξ indikuje menší ztráty mechanické energie, což potvrzuje vyšší hodnota přepadového součinitele m .

Následně byly překontrolovány součinitelé výškové kontrakce pro 2. vzájemnou hloubku vlnovitého vodního skoku. Kontrola byla provedena na 5. a 6. měření s výskytem vlnovitého vodního skoku nad korunou. Z výsledků vyplývá, že za použití součinitelů výškové kontrakce dostaneme velmi přesný popis výšky první vlny vlnovitého vodního skoku, která ovšem neodpovídá jeho 2. vzájemné hloubce. Pro kontrolu byla vypočtena 2. vzájemná hloubka z plné rovnice pro vodní skok. Ta vycházela níž a lépe popisovala výšku průběhu zazřích vln v předpokládaném místě druhé vzájemné hloubky. Pro bližší výpočet byl proveden pokus o lokaci pozice 2. vzájemné hloubky ze vztahu pro délku vlnovitého vodního skoku. Ta však byla

těsně za první vlnou, což také neodpovídá popisu vlnovitého vodního skoku. Předpokládanou příčinou je pevné dno, zatímco pro odvození rovnice délky vlnovitého vodního skoku byl pokus prováděn na dně poddajném. Na základě provedených experimentů lze usoudit, že délka vlnovitého vodního skoku v korytě s pevným dnem je větší, oproti délce vyjádřené dle výrazu Dimitrijeva (4.15).

Nejvíce zarážejícím zjištěním byl relativně velký rozdíl mezi druhými vzájemnými hloubkami vodního skoku vypočítanými podle plného výrazu pro prostý vodní skok a zjednodušeného výrazu pro vlnovitý vodní skok. Pro sérii průtoků byl proveden orientační výpočet z obou rovnic, jež ukázal, že na koruně využitě při měření by v krajních podmínkách vycházel rozdíl hladin až 2,5 cm což reprezentuje chybu o velikosti 18,2 %. Při tomto výpočtu bylo také zjištěno, že čára energie 2. vzájemné hloubky vodního skoku vychází výš než v 1. vzájemné hloubce. Chyba byla předpokládána ve zkrácení z obecné rovnice vzájemných hloubek na rovnici pro vlnovitý vodní skok. Tudíž byla vyhotovena matematická úprava za pomoci Bernoulliho rovnice pro oba profily, aby se ověřila ztrátová výška při využití rovnice pro vlnovitý vodní skok. Z výsledků vyplývá, že rovnice pro vlnovitý vodní skok je fyzikální nesmysl a že rozdíl ztrát v jednotlivých profilech bude vždy záporný. Pro zjištění možné chyby byl na závěr proveden výpočet poměru výšek hladin z rovnic pro vlnovitý vodní skok a z obecné rovnice vzájemných hloubek v závislosti na Froudově čísle první vzájemné hloubky. Bylo dokázáno, že za využití chybné rovnice pro vlnovitý vodní skok by při $Fr_1=1,7$ došlo ve stanovení druhé vzájemné hloubky k chybě až 50 %.

Z práce vyplývá několik důležitých závěrů. Nejdůležitější je pravděpodobně fyzikální nesmyslnost rovnice vyjadřující vztah mezi vzájemnými hloubkami vlnovitého vodního skoku, která by se neměla ve výpočtech využívat. Součinitele výškové kontrakce pro 2. vzájemnou hloubku jsou chybné, ale dobře popisují výšku první vlny vlnovitého vodního skoku. Další je prezentace průběhů hladin v literatuře hydrauliky, která ve většině případech neodpovídá naměřeným hladinám. Mělo by se tedy zvolit nové reprezentativní vykreslení pro výuku této látky. Posledním výsledkem je jev zvyšování hladiny za korunou. Tento jev by měl být také popsán v učebnicích hydrauliky zabývajících se širokou korunou a měla by být určena přesná definice a pozice pro měření hladiny spodní vody.

Seznam použité literatury

1. **Havlík, Aleš a Pícek, Tomáš.** HY2V_06_Přepady. *Hydraulika 141 HYA*. [Online] [Citace: 15. Únor 2016.]
<http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/prednasky.htm>.
2. **Patočka, Cyril.** *Hydraulika 1. část*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1965.
3. **Kolář, Václav, a další.** *Technický Průvodce - Hydraulika*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1966.
4. **Jandora, Jan a Šulc, Jan.** *Hydraulika MODUL 01*. Brno : Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2007.
5. **Boor, Boris, Kunštánský, Jiří a Patočka, Cyril.** *Hydraulika pro vodohospodářské stavby*. Praha : Nakladatelství technické literatury, 1968.
6. **Agroskin, I. I., Dimitrijevič, G. T. a Pikalov, F. I.** *Гидравлика*. Moskva, Leningrad : Государственное Энергетическое издательство, 1954.
7. **Zachoval, Zbyněk.** *Přelivy se širokou korunou pravoúhlého příčného průřezu*. Brno : VUTIUM, 2015.
8. **Kolář, Václav, Patočka, Cyril a Jiří, Bém.** *Hydraulika*. Praha : Vydavatelství technické a ekonomické literatury - Alfa, 1983.
9. **Havlík, Aleš a Pícek, Tomáš.** HY2V_05_Proudění v korytech. *Hydraulika 141 HYA*. [Online] [Citace: 15. Únor 2016.]
<http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/prednasky.htm>.
10. **Zachoval, Zbyněk, a další.** Discharge coefficient of a rectangular sharp-edged broad-crested weir. *DE GRUYTER*. [Online] 4. Duben 2014.
<https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/johh.2014.62.issue-2/johh-2014-0014/johh-2014-0014.xml>.
11. **Havlík, Aleš a Pícek, Tomáš.** HY2V_07_Vodní skok. *Hydraulika 141 HYA*. [Online] [Citace: 15. Únor 2016.]
<http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/prednasky.htm>.
12. **Havlík, Vladimír a Marešová, Ivana.** *Hydraulika 20, Příklady*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2001. 80-01-02355-9.
13. **Horton, Robert E.** *Wier experiments, coefficients, and formulas*. Washington : Government printing office, 1907.
14. **Tracy, H. J.** *Discharge characteristics of broad-crested weirs*. Washington, D. C. : autor neznámý, 1957.

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. **Havlík, Aleš a Píček, Tomáš.** Tabulky 1. *Hydraulika 141 HYA*. [Online] [Citace: 1. Květen 2017.]

http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/Hya/ke_stazeni/cviceni/tabulky_1.pdf.

17. **Chanson, H. a Montes, J. S.** Characteristics of Undular Hydraulic Jumps: Experimental Apparatus and Flow Patterns. *Journal of hydraulic engineering*. místo neznámé : ASCE, 1995.

Seznam symbolů

b – šířka přelivu/koryta [m]

C – Chezyho rychlostní součinitel [$m^{0.5}/s$]

C_d – součinitel průtoku (Zachoval) [-]

E_d – výška čáry energie nade dnem koryta [m]

Fr – Froudovo číslo [-]

g – gravitační zrychlení [m/s^2]

h – přepadová výška [m]

h_1 – výška hladiny vody první vzájemné hloubky vodního skoku nebo nejnižší výška hladiny nad korunou v případech bez vodního skoku [m]

h_2 – výška hladiny vody druhé vzájemné hloubky vodního skoku

h_{2-vln} – vypočítaná výška druhé vzájemné hloubky vodního skoku z rovnice pro vlnovitý vodní skok [m]

h_{2-plna} – vypočítaná výška druhé vzájemné hloubky vodního skoku z obecné rovnice pro prostý vodní skok [m]

h_c – kritická hloubka [m]

h_d – výška hladiny spodní vody [m]

h_s – rozdíl první a druhé vzájemné výšky vodního skoku [m]

h_o – výška hladiny spodní vody nad korunou [m]

H_0 – energetická přepadová výška

K – modul průtoku [m^3/s]

L_s – délka vlnovitého vodního skoku [m]

m – součinitel přepadu [-]

n – Manningův součinitel drsnosti koryta [$s/m^{1/3}$]

O – omočený obvod [m]

P_0 – výška nátokové hrany přelivu [m]

P_o – výška zadní hrany přelivu [m]

q – měrný průtok [m^2/s]

Q – průtok [m^3/s]

R – hydraulický poloměr [m]

S_i – průtočná plocha daného profilu [m²]

t – tloušťka (délka) koruny [m]

v_0 – přítoková rychlost [m/s]

v_i – střední průřezová rychlost v daném profilu [m/s]

Z – ztráta mechanické energie proudu [m]

α – Coriolosovo číslo, neboli součinitel kinetické energie [-]

ξ – součinitel místních ztrát [-]

φ – součinitel rychlosti [-]

ε - součinitel kontrakce [-]

ΔL – vzdálenost mezi počítanými úseky [m]

Δz – rozdíl mezi horní a dolní počítanou hladinou [m]

Δh_{viny} – rozdíl naměřených hloubek první vlny a vypočtené hodnoty za součinitelů výškové kontrakce [m]

Δh_2 – rozdíl výšek vypočtených z rovnice plného vodního skoku a součinitelů kontrakce [m]

Δy – rozdíl výškových souřadnic [m]