



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

# TENKOSTĚNNÝ PRAVOÚHLÝ PŘELIV BEZ BOČNÍHO ZÚŽENÍ OVLIVNĚNÝ ŠÍŘKOU KORYTA

FULL-WIDTH THIN-PLATE RECTANGULAR WEIR INFLUENCED BY CHANNEL WIDTH

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Jakub Zmítko**

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**doc. Ing. ZBYNĚK ZACHOVAL, Ph.D.**

**BRNO 2020**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Jakub Zmítko
Název	Tenkostěnný pravoúhlý přeliv bez bočního zúžení ovlivněný šířkou koryta
Vedoucí práce	doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2019
Datum odevzdání	10. 1. 2020

V Brně dne 31. 3. 2019

## **PODKLADY A LITERATURA**

ČSN ISO 1438, 2012. Hydrometrie – Měření průtoku vody v otevřených korytech pomocí tenkostěnných přelivů. Praha: ÚNMZ.

Kindsvater, C. E., Carter, R. W., 1957. Discharge Characteristics of Rectangular Thin-Plate Weirs. Journal of the Hydraulics Division, Vol. 83, Issue 6, Pg. 1-36.

Schoder, E. W., Turner, K. B., 1929. Precise Weir Measurements. Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 93, Issue 1, Pg. 999-1110.

## **ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ**

Při přepadu vody přes tenkostěnný přeliv situovaný na celé šířce koryta pravoúhlého profilu (přeliv bez bočního zúžení) dochází vlivem tření o boční stěny koryta k ovlivnění jeho kapacity. Cílem práce je stanovení vlivu šířky přelivu (koryta) na součinitel přepadu. Pro identifikaci vlivu bude provedeno měření geometrických a hladinových charakteristik přelivu a koryta. Koryto bude instalováno na hydraulickém okruhu LVV s kalibrovaným průtokoměrem. Požadovanými součástmi práce bude pojednání o tenkostěnných přelivech, popis experimentu, měření a vyhodnocení dat a doporučení pro výpočet kapacity přelivu ovlivněného třením o boční stěny.

## **STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce řeší propagaci šířky přelivu (koryta) na kapacitu přelivu. Míra ovlivnění je analyzována laboratorním měřením na modelech s šířkou přelivu (koryta) od 0,02 m po šířku 0,50 m. Jsou analyzovány různé přepadové výšky a průtoky, při kterých je počítán součinitel přepadu. Výsledky jsou porovnány s předchozími pracemi, především pak s prací Kindsvatera a Cartera (1957) a Schodera a Turnera (1929), kdy jsou použity stejné postupy k výpočtu součinitele přepadu. Práce obsahuje teoretické uvedení do problému tenkostěnných přelivů a otázky vzniku mezní vrstvy při proudění kapaliny, navazuje analytická část. V analytické části jsou publikovány výsledky měření, jejich porovnání a zhodnocení. Práce je zakončena zhodnocením a doporučením.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Tenkostěnný přeliv, mezní vrstva, přepadový paprsek, šířka koryta, měření průtoky, přepadový součinitel

## **ABSTRACT**

The diploma thesis deals with the propagation of a weir (channel) width on the weir capacity. The influence rate is analyzed by laboratory measurements on models with a weir (channel) width of 0,02 m to a width of 0,50 m. Different heads are analyzed and different discharges that calculate the discharge coefficient. The results are compared with previous works, especially with the work of Kindsvater and Carter (1957) and of Schoder and Turner (1929), where the same procedures are used to calculate discharge coefficients. The thesis contains a theoretical introduction to the problem of thin-plate weirs and the problem of the formation of the boundary layer in the flow of liquid, following with the analytical part. In the analytical part, the results of measurements, their comparison, and evaluation are published. The work is completed with evaluation and recommendations.

## **KEYWORDS**

Thin-plate weir, boundary layer, overflow nappe, channel width, discharge measurement, discharge coefficient

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Jakub Zmítko *Tenkostěnný pravouhlý přeliv bez bočního zúžení ovlivněný šířkou koryta*. Brno, 2019. 102 s., 0 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Tenkostěnný pravouhlý přeliv bez bočního zúžení ovlivněný šířkou koryta* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 16. 12. 2019

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval zejména panu doc. Ing. Zbyňku Zachovalovi, Ph.D., za jeho trpělivost, odborné vedení, cenné připomínky a vstřícnost v průběhu i po skončení měření. Pan docent je majoritním kontributorem pozitivní nálady a reálného optimismu, které malými krůčky popostrkovaly tuto práci ke zdárnému konci. Dále bych rád poděkoval panu doc. Ing. Jan Jandorovi, Ph.D. za umožnění zapsání této práce do systému a svým rodičům za podporu během studií. Měření by nemohlo být provedeno bez finanční podpory projektu FAST-S-5084 Proudění s úplavy v protékaných konstrukcích, tímto jim vyjadřuji poděkování za záštitu nad touto prací.

# Obsah

1	Úvod.....	11
2	Cíl práce a metoda řešení.....	12
3	Tenkostěnný pravoúhlý přeliv.....	13
3.1	Přístupy pro stanovení průtoku.....	14
3.2	Empirické stanovení průtoku - Schoder a Turner .....	17
3.2.1	Použité vybavení .....	17
3.2.2	Měřená data .....	18
3.2.3	Výpočet průtoku .....	19
3.2.4	Závěr .....	19
3.3	Práce Kindsvatera a Cartera.....	19
3.3.1	Význam geometrických poměrů .....	20
3.3.2	Význam hydraulických kritérií <i>Re</i> a <i>We</i> .....	21
3.3.3	Význam viskozity .....	22
3.3.4	Vliv povrchového napětí.....	22
3.3.5	Stanovení výpočtu přepadového součinitele.....	23
3.3.6	Zdroje dat pro vyjádření součinitele přepadu .....	23
	Experimenty provedené Henry Bazinem.....	23
	Experimenty provedené Schoderem a Turnerem .....	24
	Experimenty vykonané na United States Bureau of Reclamation.....	25
	Experimenty vykonané v Hydraulics Laboratory of Georgie Institute of Technology.....	26
3.3.7	Zhodnocení.....	28
	Výsledky experimentů .....	28
	Vliv zanedbání koeficientů <i>kh</i> a <i>kb</i> .....	28
	Horní limit <i>h/P</i> .....	29
	Vliv výšky přelivu <i>P</i> .....	29
4	Metodika měření.....	30
4.1	Konstrukční zásady pro tenkostěnné přelivy.....	30
4.2	Měření výšky hladiny .....	30
4.3	Měření průtoku.....	31
4.3.1	Indukční průtokoměr.....	31
4.3.2	Objemová metoda .....	32
4.4	Chyby a nejistoty měření.....	32



4.4.1	Chyby měření .....	32
4.4.2	Nejistoty měření.....	32
	Standartní nejistota typu A a B.....	32
	Kombinace standartních nejistot A a B .....	34
	Rozšířená nejistota měření.....	34
	Kombinace nejistot měření pro tenkostěnný pravoúhlý přeliv.....	34
<b>5</b>	<b>Experiment.....</b>	<b>34</b>
5.1	Laboratoř, hydraulické okruhy a měrné tratě .....	35
5.1.1	Hydraulický okruh č. 4 .....	35
	Měrná trať č. 1 .....	36
5.1.2	Hydraulický okruh č. 5 .....	40
	Měrná trať č. 2 .....	40
5.2	Použitá technika .....	41
5.2.1	Hrotové měřidlo.....	41
5.2.2	UVP Monitor .....	43
5.2.3	Měření průtoků.....	44
5.3	Metodika .....	44
5.4	Postup měření .....	45
5.4.1	Měrná trať č.1 .....	46
5.4.2	Měrná trať č. 2.....	51
<b>6</b>	<b>Výsledky měření .....</b>	<b>53</b>
6.1	Trať č. 1 – šířka od 0,05 m po 0,50 m .....	53
6.1.1	Rychlostní profil v přítokovém korytě .....	58
6.2	Trať č. 2 – šířka od 0,02 m po 0,05 m .....	59
6.3	Vyhodnocení průtoků.....	62
<b>7</b>	<b>Analýza výsledků měření.....</b>	<b>63</b>
7.1	Nejistoty měření .....	63
7.1.1	Standartní nejistoty typu B pro měření úrovně hladin .....	63
7.1.2	Nejistota ze srovnávací roviny .....	64
7.1.3	Nejistoty pro měření úrovně hladiny .....	65
7.1.4	Nejistota z měření šířky.....	68
7.1.5	Nejistoty průtoků.....	70
7.1.6	Nejistota součinitele přepadu .....	71

7.2	Součinitelé přepadu .....	75
7.2.1	Komparace přístupů k výpočtu součinitele přepadu.....	75
7.2.2	Míra ovlivnění přepadového součinitele .....	77
7.2.3	Bod zlomu .....	83
7.2.4	Vyjádření součinitele přepadu pomocí naměřených rychlostí.....	84
7.3	Průběh hladin .....	85
7.3.1	Ovlivnění průběhu hladiny .....	87
8	Vyhodnocení experimentem dosažených výsledků .....	90
8.1	Rešerše .....	90
8.2	Měření.....	90
8.3	Analýza vlivu .....	91
8.4	Komparace .....	92
8.5	Doporučení pro výpočet.....	92
9	Závěr a doporučení pro následující výzkum .....	93
10	Bibliografie .....	94
11	Seznamy .....	95
11.1	Seznam zkratk .....	95
11.2	Seznam veličin .....	96
11.3	Seznam obrázků.....	98
11.4	Seznam tabulek.....	100
11.5	Seznam grafů .....	101

# 1 Úvod

V oboru vodního hospodářství je jedním z důležitých faktorů informace o velikosti průtoku [1]. Velikost průtoku se stanovuje mnoha způsoby, jedním ze způsobů stanovení průtoku v systémech s volnou hladinou je využití znalostí o přepadu přes přelivy. Přelivem se rozumí hrací konstrukce, jež vzdouvá hladinu v konkrétním místě koryta nebo žlabu. Přes tuto konstrukci následně přepadá voda takzvaným přepadovým paprskem. Nejpodstatnější vliv pro charakteristiku přepadového paprsku má tvar přelivu (příčný i podélný), zvláště pak tvar koruny přelivu. Díky předchozím výzkumům je dnes možné relativně přesně stanovit průtok z charakteristik přelivu a přítokového koryta. Uvedeného se využívá jak při návrhu vodních děl, tak objektů pro stanovení průtoku, takzvaných měrných přelivů. Jedněmi z etablovaných systémů konstrukcí měrných přelivů pro stanovení průtoků jsou přelivy tenkostěnné. Experimentální prozkoumanost a popis přepadu je u těchto přelivů zdaleka největší a stanovení kapacity se považuje za nejpresnější. Výhodou je bezesporu i tvarová jednoduchost přelivu.

Jako tenkostěnné pravoúhlé přelivy s vodorovnou korunou jsou definovány přelivy, jejichž relativní tloušťka je  $t/h < 0,66$ , kde  $t$  je tloušťka stěny přelivu (délka přelivu ve směru proudění) a  $h$  je výška přepadového paprsku určená jako svislá vzdálenost mezi úrovní hladiny ve vzdálenosti  $3h$  až  $4h$  před návodní hranou koruny přelivu a úrovní koruny přelivu. Na kapacitu přelivu mají vliv vlastnosti konstrukční: tloušťka přelivu, šířka přelivu, výška přelivu nade dnem přítokového a odtokového koryta, šířka přítokového a odtokového koryta, tvar přelivné hrany a bočních závazání, souosost přítokového a odtokového koryta s přelivem a způsob zavzdušnění a dále materiálové: viskozita a povrchové napětí (ovlivnění prouděním vzduchu se zanedbává). Výše zmíněné vlastnosti ovlivňují hodnotu přepadového součinitele, jenž je unikátní pro každou přelivnou konstrukci. Základním vztahem pro výpočet přepadového součinitele je součinitel odvozený Bazinem [2]. Bazin zohledňuje zejména parametry výše zmíněné, šíři přítokového koryta nezohledňuje. Avšak dle výzkumů [3] a [4] je třeba od určitého bodu počítat i s šířkou koryta v přítokovém korytě, jelikož proud může být při určité šířce koryta ovlivněn mezní vrstvou. Uvedené je podrobně popsáno ve výzkumu Kindsvater a Carter [4]. Určit bod zlomu, kdy začne docházet k ovlivnění součinitele přepadu šířkou přelivu bez bočního zúžení, je cílem této práce.

## 2 Cíl práce a metoda řešení

Cílem diplomové práce bylo stanovení ovlivnění součinitele přepadu šířkou tenkostěnného přelivu, který má pravoúhlý výřez na plnou šířku koryta, jež má pravoúhlý příčný profil. Je požadováno, aby identifikace vlivu byla provedena na základě měření geometrických a hladinových charakteristik přelivů a koryt instalovaných na hydraulických okruzích v Laboratoři vodohospodářského výzkumu (LVV). Požadovaným výsledkem bylo doporučení pro výpočet kapacity přelivu ovlivněného třením o boční stěny.

V souladu s požadavky zadání byl zvolenou metodou řešení experimentální výzkum. Aby bylo možné vyjádřit vliv šířky přelivu na součinitel přepadu, bylo nutné použít takový přeliv, který není ovlivněn jinými veličinami než šířkou přelivu. Aby se neprojevil vliv relativní výšky přelivu nade dnem přítokového koryta, musel být žlab dostatečně vysoký. Aby se neprojevil vliv relativní šířky přelivu, musel být žlab dostatečně široký. Aby se neprojevil vliv tření o čelní stěnu přelivu, muselo být možné dosáhnout dostatečně velké přepadové výšky s plně zavzdušněným prostorem pod přepadovým paprskem. Aby se neprojevil vliv nerovnoměrného rozdělení přítokové rychlosti, musel být žlab dostatečně dlouhý, případně vybavený usměrňovači proudu, s dostatečně velkým příčným profilem. Aby bylo možné určit, jak se propaguje vliv výšky přelivu nade dnem přítokového koryta spolu s vlivem šířky, muselo být provedeno měření ve žlabu s menší výškou.

Zvolený způsob vyhodnocení se opíral o změnu součinitele přepadu v závislosti na změně šířky přelivu, na změně relativní šířky přelivu a na změně Reynoldsova čísla (kritéria). Na základě takto stanovených souvislostí byl poté vyhodnocen počátek vlivu šířky na součinitele přepadu a následně míra ovlivnění.

Zvolený postup řešení se skládal z následujících bodů:

- rešeršní činnost a analýza stávajících dat z měření,
- návrh experimentu,
- měření,
- zpracování dat,
- vyhodnocení dat,
- analýza a porovnání výsledků,
- doporučení pro výpočet průtoku.

### 3 Tenkostěnný pravoúhlý přeliv

Tenkostěnné přelivy jsou definovány rozsahem [1]

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

kde  $t$  je tloušťka přelivu a  $h$  je přepadová výška.

Tenkostěnné přelivy jsou přelivné konstrukce používající se zejména k měření průtoků. Výřez ve stěně přelivu může nabývat tvaru trojúhelníku, lichoběžníku, půlkruhu, obdélníku (s nebo bez bočního zúžení) případně složeného. Díky jednoduchosti konstrukce je možná rychlá instalace do inkriminovaného prostoru v hydraulickém okruhu. Základní rovnice pro výpočet průtoku na tenkostěnných přelivech založená na volném výtoku ve svislé stěně se získá integrací průtočného průřezu v mezích od koruny přelivu po hladinu (Obr. 1)

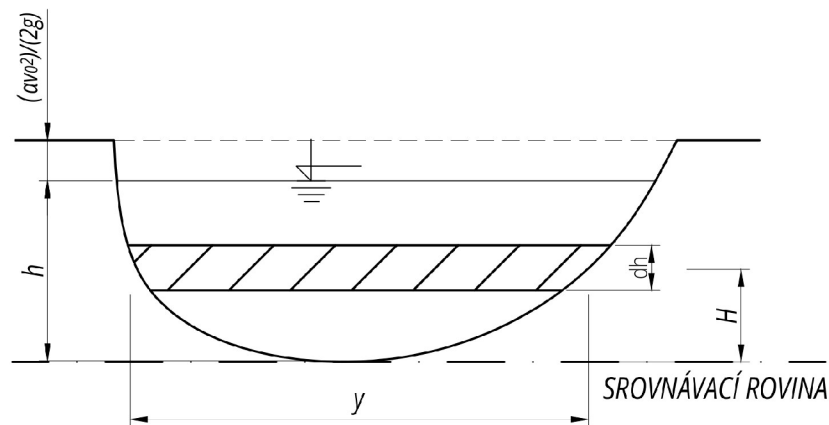
$$Q = \omega \sqrt{2g} \int_0^h \left( h + \frac{av_0^2}{2g} - H \right)^{1/2} y dh, \quad (3.2)$$

kde  $\omega$  je součinitel přepadu daného přelivu,  $g$  je tíhové zrychlení,  $y$  je šířka průtočného průřezu a je funkcí  $H$ ,  $v_0$  je přítoková rychlost,  $a$  je Coriolisovo číslo (nejčastěji se pohybuje v rozmezí 1,02 až 1,20).

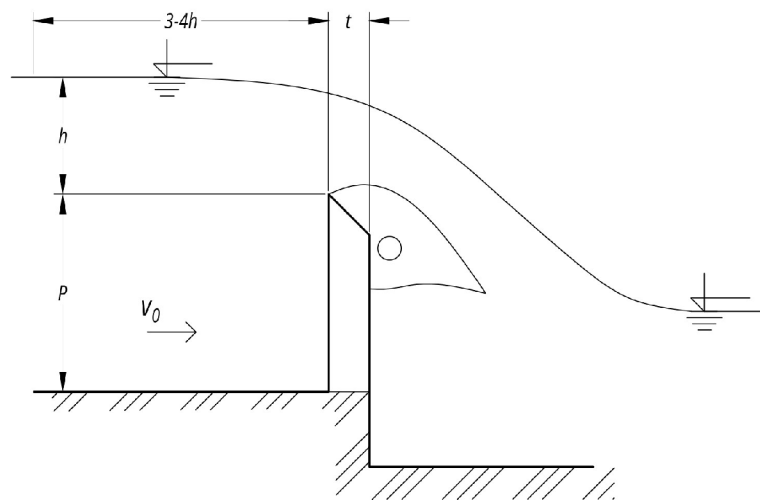
Pravoúhlý přeliv je určený pravoúhlým výřezem (výřez s vodorovnou korunou). Přeliv bez bočního zúžení je takový přeliv, je-li šířka přelivu stejná jako šířka přítokového i odtokového koryta  $B$ . Pak se jedná se o přeliv na plnou šířku koryta (Bazinův přeliv).

Výsledkem integrace vztahu (3.2) pro tenkostěnný přeliv s pravoúhlým výřezem, kdy  $y = b$  je tzv. Weisbachův vztah [4]

$$Q = \frac{2}{3} \omega \sqrt{2gb} \left[ \left( h + \frac{av_0^2}{2g} \right)^{3/2} - \left( \frac{av_0^2}{2g} \right)^{3/2} \right]. \quad (3.3)$$



Obr. 1: Přepad přes obecný přeliv [1]



Obr. 2: Tenkostěnný přeliv s definicí tloušťky a výšky přepadu [5]

Kapacita přelivu je závislá i na úrovni hladiny dolní vody [6]:

1. dokonalý přepad – kapacita není ovlivněna hladinou dolní vody;
2. nedokonalý přepad – kapacita je ovlivněna hladinou dolní vody.

V práci se uvažuje s přepadem dokonalým.

### 3.1 Přístupy pro stanovení průtoku

Pro výpočet průtoku lze použít poměrně značné množství vztahů [7], které byly odvozeny různými způsoby. Dva z nich jsou zde pro názornost a další použití v práci uvedeny.

Prvním vztahem pro výpočet průtoku založeným na energetické analýze je

$$Q = mb\sqrt{2gh}^{3/2}, \quad (3.1.1)$$

kde  $b$  je šířka přelivu a  $m$  je součinitel přepadu, který zahrnuje geometrické charakteristiky přelivu a přítokového koryta. Vztah je odvozen z rovnice (3.3), kdy je uvažováno, že rychlostní výška  $\frac{av_0^2}{2g}$  je vyjádřena v součiniteli přepadu.

Rovnici pro stanovení součinitele přepadu z geometrických charakteristik přelivu a přítokového koryta odvodilo značné množství autorů. Např. Bazin [8] odvodil na základě vlastního experimentálního měření vztah

$$m = \left( 0,405 + \frac{0,003}{h} \right) \left[ 1 + 0,55 \left( \frac{h}{h+P} \right)^2 \right], \quad (3.1.2)$$

kde  $P$  je výška přelivu nade dnem přítokového koryta. Vztah (3.1.2) platí pro podmínky:

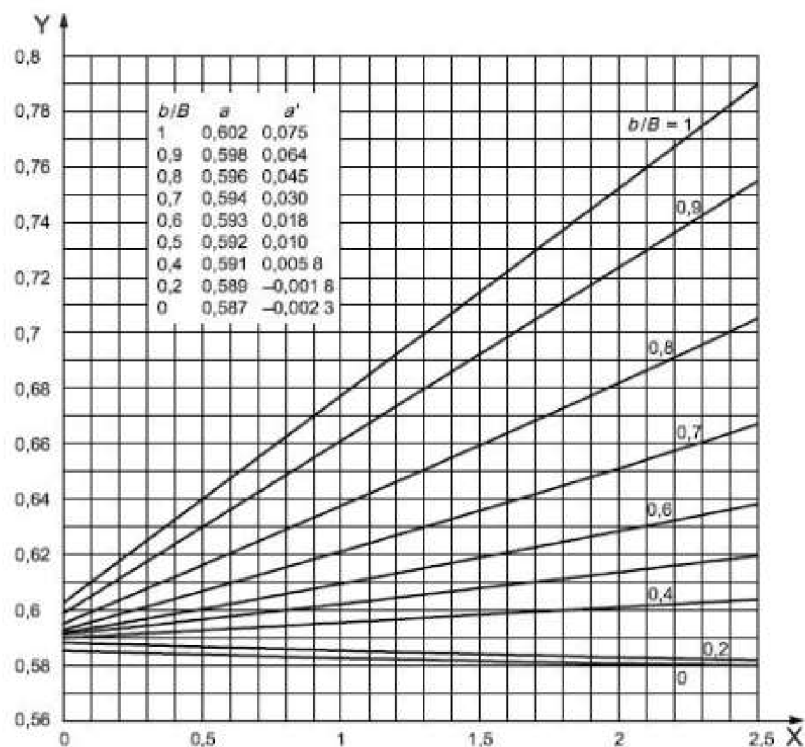
1.  $0,1 \text{ m} < h < 1,24 \text{ m}$ ,
2.  $0,2 \text{ m} < b < 2,0 \text{ m}$ ,
3.  $0,2 \text{ m} < P < 2,0 \text{ m}$ .

Mnozí autoři (Schoder a Turner [3], Kindsvater a Carter [4]) však upozorňují na nepřesnosti v jeho výzkumu a rovnici (3.1.2) nedoporučují k použití.

Druhým vztahem uvedeným i v ČSN ISO 1438 [6] je vztah zahrnující vliv tření vznikem mezních vrstev (a vliv povrchového napětí) zavedením účinných veličin. Zde je vztah uvedený ve tvaru pro přelivy s bočním zúžením

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} b_e h_e^{3/2}, \quad (3.1.3)$$

kde  $C_d$  je součinitel přepadu,  $b_e$  je účinná šířka a  $h_e$  je účinná přepadová výška. Součinitel přepadu, který je uveden v normě, byl experimentálně odvozen (Obr. 3).



Obr. 3: Součinitel přepadu  $C_d = a + a'(h/P)$  [6], kde  $X = h/P$  a  $Y = C_d$

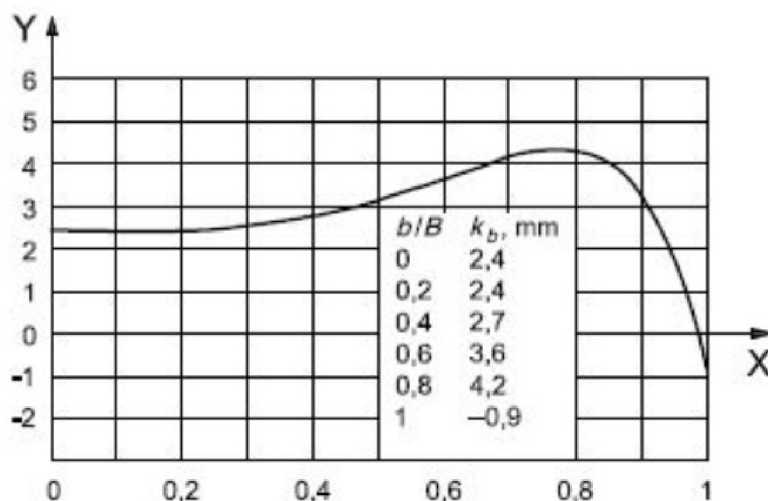
Na Obr. 3 osa X značí poměr  $h/P$ , osa Y vyjadřuje  $C_d$ .

Účinná šířka a výška jsou definovány rovnicemi

$$b_e = b + k_b, \quad (3.1.4)$$

$$h_e = h + k_h, \quad (3.1.5)$$

kde  $k_h$  a  $k_b$  jsou experimentálně stanovené hodnoty kompenzující účinky viskozity a povrchového napětí [6] pro vodu za běžné teploty. Norma doporučuje  $k_h = 0,001 \text{ m}$  a  $k_b$  uvádí graficky (Obr. 4). Obdobný vztah, avšak s jinou hodnotou  $k_h = 0,0012 \text{ m}$  uvádí norma jako vztah Rehbocka.



Obr. 4: Závislost  $k_b$  na  $b/B$  [6], kde  $X = b/B$  a  $Y = k_b$

Vztah pro výpočet proudění přes přeliv bez bočního zúžení používaný Rehbockem je

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} b h_{1e}^{3/2}, \quad (3.1.6)$$

kde  $h_{1e}$  je účinná přepadová výška. Součinitel přepadu pro Rehbockův vztah je

$$C_d = 0,602 + 0,083 \frac{h}{P}, \quad (3.1.7)$$

a účinná přepadová výška je

$$h_e = h + 0,0012. \quad (3.1.8)$$

Pro rovnici (3.1.7) platí podmínky platnosti:

1.  $\frac{h}{P} < 4,00$  ;
2.  $0,03 \text{ m} < h < 1,00 \text{ m}$  ;
3.  $b > 0,30 \text{ m}$  ;
4.  $0,06 \text{ m} < P < 1,00 \text{ m}$  ;

Rovnice pro stanovení součinitele přepadu (průtoku) jsou založeny na obsáhlých experimentálních výzkumech. Jejich množství je značné a mnohé pouze potvrzují starší provedená měření a nemají spojitost s vlivem šířky. Mezi nejpresnější měření zohledňující vliv šířky a s podrobným popisem je práce Schodera a Turnera [3] a práce Kindsvatera a Cartera [4] (obsahující podrobnou analýzu provedených měření jiných autorů), které jsou níže uvedeny a použity pro porovnání v práci.



## 3.2 Empirické stanovení průtoku - Schoder a Turner

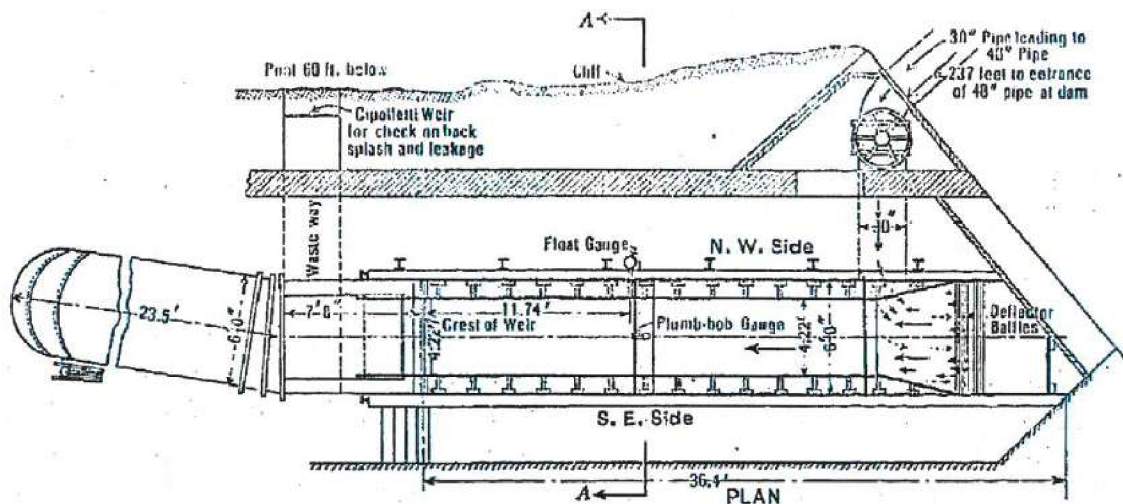
Výzkum byl provedený Ernestem W. Schoderem a Kennethem B. Turnerem v letech 1913 až 1920. Autoři provedli 2438 měření pro 1512 různých poloh hladin. Výzkum byl především zaměřen na zkoumání vlivu rozložení přítokové rychlosti. Badatelé poukazují na to, že v dosavadních výzkumech byla tato veličina opomenuta.

Publikace je napsána v imperiálních jednotkách. Ke správnému vyhodnocení zobrazených dat je třeba převodu do soustavy SI. Použité jednotky v této práci jsou feet [ft] a inch [in], jejichž poměr k jednotkám SI je následující:

1. 1 ft = 0,3048 m
2. 1 in = 0,0254 m
3. 1 m = 3,2808 ft
4. 1 m = 39,3701 in

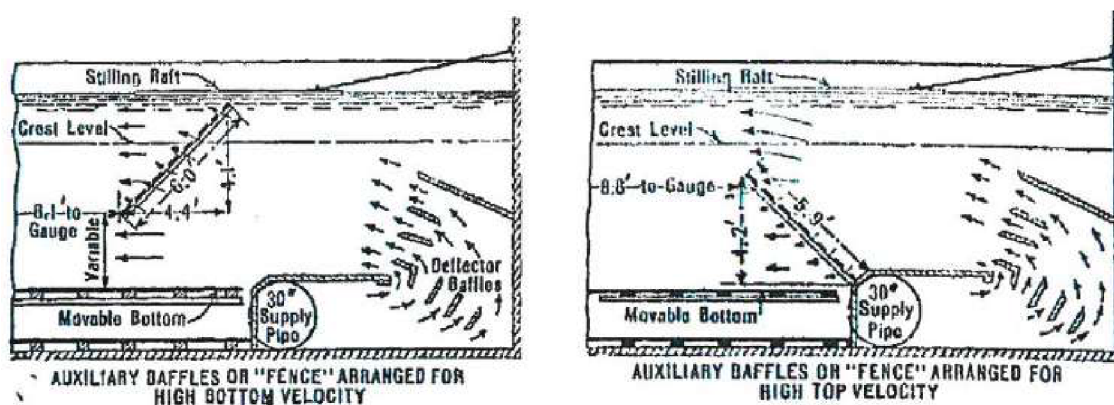
### 3.2.1 Použité vybavení

Výzkum byl prováděn v hydraulickém žlabu o šířce 1,295 m a délce 10,729 m, viz Obr. 5.



Obr. 5: Půdorys hydraulického žlabu použitého k experimentům [3]

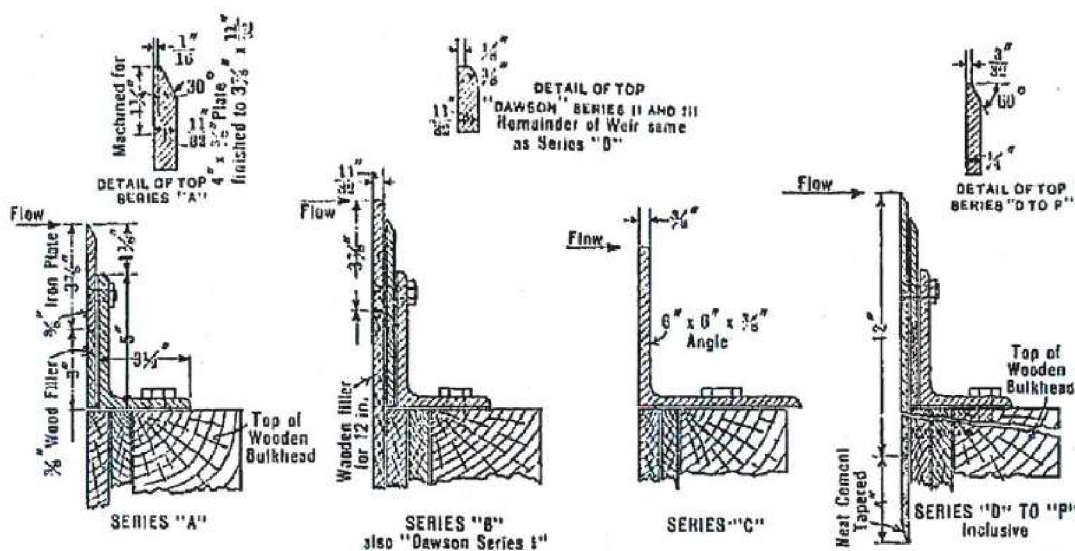
Žlab byl opatřen usměrňovacími zařízeními pro rovnoměrné rozložení rychlostí v proudu (Obr. 6). Pro simulaci různých výšek přelivu se přistoupilo k instalaci pohyblivého dna, které umožňovalo změnu výšky přelivu. K ovládání průtoku sloužil šoupátkový uzávěr na přítokovém potrubí.



Obr. 6: Použité usměřovače proudu [3]

K měření rychlostního pole byl použit Priceův anemometr a k měření hladin systém plováků, který neovlivněn prouděním vody ve žlabu měřil úroveň hladiny v samostatném měrném válci. Měření průtoku probíhalo objemově pomocí ad hoc sestaveným měrným zařízením na výtokovém potrubí.

Přeliv byl tenkostěnný s vícero typy úpravy koruny přelivu (Obr. 7). Tyto typy byly osazeny po delší dobu a podléhaly korozi, autoři toto ovlivnění ve svém výzkumu zohlednili.



Obr. 7: Typy použitých přelivných korun [3]

### 3.2.2 Měřená data

Autoři měřili několik sérií s rozdílnými charakteristikami. Série jsou děleny dle použité koruny přelivu a dle výšky přelivu na Série A až P a na Dawsonovu sérii I. až III.

V korelaci velikostí naměřených průtoků byla zohledněna veličina průtoku prosáklé vody. Průsak byl měřen na bočním odtoku z betonového koryta. Naměřené hodnoty nebyly nikterak výrazné tak, aby negativně ovlivnily měření. Dominantním byl zejména průsak na měřicím zařízení. Daný průsak byl tím výraznější, čím nižších hladin v měřicím žlabu bylo použito.

Měření rychlosti probíhalo odlišně pro různé série, lišilo se umístěním hydrometrické vrtule a počtem uskutečněných měření. Měření probíhalo ve stejném měrném profilu jako samotné měření hladiny.

- Série A až P – ve většině případů (vyjma případů zmíněných níže) bylo měření rychlostí prováděno pouze na jedné svislici v ose žlabu.
  - Série F – rychlost měřena 0,1524 m od bočních stěn.
  - Série K – pět svislic pro hladinu 0,6096 m.
  - Série N – pro přeliv šířky 0,2286 m a pro 0,1676 m bylo přidáno měření ve vzdálenostech 1,829 m a 3,578 m.

Při výpočtu průtoku za pomoci hydrometrických vrtulí došlo k mírné odchylce od hodnot změřených objemovou metodou, autoři museli provést korekci na základě  $Q-h$  křivek.

### 3.2.3 Výpočet průtoku

Na základě vlastních měření autoři odvozují vztah, který má zohlednit rozdělení rychlostí v přítokovém korytě. V jejich výzkumu je přesnost vztahu deklarována jako nejvyšší ze všech zkoumaných (imperiální jednotky)

$$Q = 3,33b \left[ \left( h + \frac{v_a^2}{2g} \right)^{3/2} + \frac{h}{3,33} \times \frac{v_b^2}{2g} \right], \quad (3.2.1)$$

kde  $v_b$  je střední rychlost na přítokovém kanále pod korunou přelivu a  $v_a$  je střední rychlost na přítokovém kanále nad korunou přelivu.

### 3.2.4 Závěr

Průtok je značně ovlivněn povrchovou úpravou a přesností výroby použitých konstrukcí (přeliv, stěny koryta, spojení přelivu a koryta). Struktura povrchu smáčených částí konstrukce může ve výsledku celkovou velikost průtoku přes přeliv ovlivnit o 1 % až 2 %.

Rozložení rychlostí v profilu na přítoku k přelivu značně ovlivňuje průtok přes daný přeliv. Pokud se uvažuje standardní rozložení rychlostního pole, je možné použít vztahu (3.1.6). K dosažení standardních podmínek (rovnoměrné rozložení rychlostí) přítoku na přeliv autoři doporučují provést taková opatření, aby bylo dosaženo daného požadavku, a to např. použitím rozrážečů, usměřovačů, dostatečná délka nátoku atp.

Vliv tření, potažmo mezní vrstvy, na velikost hodnoty průtoku se zvyšuje s tím, jak klesá výška přelivu a roste výška přepadového paprsku. Ovlivnění průtoku může dosahovat až 1,5 % ( $\frac{h}{p} = 4$ ) z celkové hodnoty.

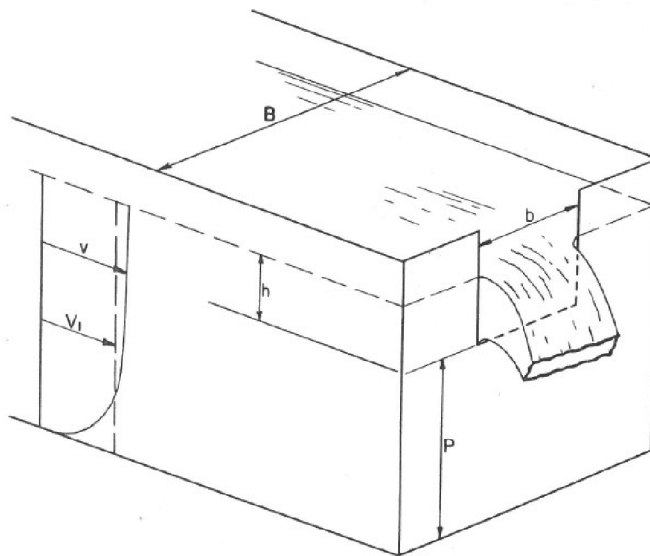
Autoři se jen okrajově zmiňují, že navazují na práci studenta Williama F. Martina (1906), který prováděl výzkum vlivu šířky koryta na velikost průtoku přes ostrohranný přeliv. Tato práce bohužel není podrobena širší rešerši, jsou zmíněny výsledky pouze pro jednu šířku kanálu. Závěrečnou práci nebylo možné dohledat.

## 3.3 Práce Kindsvatera a Cartera

Ve své práci se Kindsvater s Carterem zmiňují, že předchozí výzkum se nezabýval podrobněji vlivem šířky  $b$  a  $B$  (Obr. 8) na hodnotu přepadového součinitele. Pomocí experimentů autoři ověřují vliv hydraulických veličin (povrchové napětí, viskozita, hustota) a vliv geometrických veličin, s ohledem na šířky  $b$  a  $B$ , na přepadový součinitel  $C_d$ .

Publikace je napsána v imperiálních jednotkách. Ke správnému vyhodnocení zobrazených dat je třeba převodu do soustavy SI. Použité jednotky v této práci jsou feat [ft] a inch [in], jejichž poměr k jednotkám SI je následující:

5. 1 ft = 0,3048 m
6. 1 in = 0,0254 m
7. 1 m = 3,2808 ft
8. 1 m = 39,3701 in



Obr. 8: Tenkostěnný přeliv s bočním zúžením [4]

Velikost průtoku přes přeliv byla stanovena jako funkce nezávislých proměnných

$$Q = f_1(b, B, P, h, \gamma, \rho, \mu, \sigma), \quad (3.3.1)$$

kde  $\gamma = \rho g$  je specifická hmotnost.

Z rovnice (3.3.1) je možné odvodit vztah pomocí bezrozměrných veličin, kde první tři poměry charakterizují geometrické vlastnosti a poslední dvě hydraulická kritéria

$$\frac{Q}{bh\sqrt{gh}} = f_2\left(\frac{b}{B}, \frac{b}{h}, \frac{h}{P}, Re, We\right), \quad (3.3.2)$$

kde  $Re$  je Reynoldsovo číslo (kritérium) a  $We$  je Weberovo číslo (kritérium).

Základní vztahy pro výpočet průtoku a přepadového součinitele  $C = C_d g^{1/2}$  jsou uvedeny vztahy

$$C = \frac{Q}{bh^{3/2}} = f_3\left(\frac{b}{B}, \frac{b}{h}, \frac{h}{P}, Re, We\right), \quad (3.3.3)$$

$$Q = Cbh^{3/2}. \quad (3.3.4)$$

### 3.3.1 Význam geometrických poměrů

Největší pozornost při výpočtech přepadového součinitele by dle autorů měla být věnována faktoru poměru šířky  $\frac{b}{B}$  v kombinaci s poměrem  $\frac{h}{P}$  tato kombinace významně přispívá ke kontrakci paprsku a

následně k velikosti průtoku. Autoři tuto vlastnost přirovnávají ke kontrakci při výtoku otvorem. Poměr šířky přelivu k výšce paprsku  $\frac{b}{h}$  byl dle tvrzení autorů ve většině předchozích studií zanedbán kvůli svému malému vlivu na přepadový součinitel, nebo nebyl uvažován jako nezávislá proměnná. K práci předchozích autorů, kteří počítají s vlivem  $\frac{h}{p}$ , se staví kriticky, jelikož tvrdí, že kontrakci, kterou tento poměr vyvolává, je možné z hlediska rychlosti na přítoku zanedbat. Tento poměr má být považován pouze za geometrický parametr a doplněk k faktoru šířky. Pro experiment bylo nutné dodržet rovnoměrné rozložení rychlostního pole pomocí dostatečné délky přítokového koryta.

### 3.3.2 Význam hydraulických kritérií $Re$ a $We$

Značného významu autoři přisuzují Reynoldsově  $Re$  a Weberově číslu (kritériu)  $We$  v případě, kdy se jedná o přelivy s malými rozměry  $h$  a  $b$ . Reynoldsovo číslo je

$$Re = \frac{VL}{\nu}, \quad (3.3.5)$$

kde  $V$  je charakteristická rychlost,  $L$  je charakteristická délka a  $\nu$  je kinematická viskozita. Charakteristickou rychlost je možné stanovit za předpokladu proudění ideální kapaliny, tedy  $V = \sqrt{2gh}$ . Při malých rozměrech přelivné konstrukce jsou dominantní jak šířka přelivu, tak přepadová výška. Tudíž při výpočtu Reynoldsova čísla pro malé rozměry je třeba použít za charakteristickou délku oba rozměry

$$Re_h = \frac{\sqrt{2gh}h}{\nu}, \quad (3.3.6)$$

$$Re_b = \frac{\sqrt{2gh}b}{\nu}. \quad (3.3.7)$$

Weberovo číslo  $We$  je kritérium zhodnocující vliv povrchového napětí

$$We = \frac{V\sqrt{L}}{\sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}}, \quad (3.3.8)$$

kde  $\sigma$  je povrchové napětí. U Weberova čísla  $We$  je, stejně jako v případě Reynoldsova čísla  $Re$ , nutné uvažovat při malých rozměrech přelivu s dominancí obou rozměrů  $b$  i  $h$ , tedy

$$We_h = \frac{\sqrt{2gh}\sqrt{h}}{\sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}} \quad (3.3.9)$$

$$We_b = \frac{\sqrt{2gh}\sqrt{b}}{\sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}}. \quad (3.3.10)$$

Relativní vliv složek  $\nu$  a  $\sigma$  výše zmíněných kritérií klesá, jak roste samotná hodnota kritéria. Proto vliv složek  $Re$  a  $We$  se snižuje tím více, čím více rostou hodnoty pro  $h$  a  $b$ . U vysokých hodnot  $b$  a  $h$  se poté vlivy kinematické viskozity  $\nu$  a povrchového napětí  $\sigma$  mohou zanedbat. Přepadový součinitel  $C_d$  je v takových případech nezávislý na  $\nu$  a  $\sigma$ .

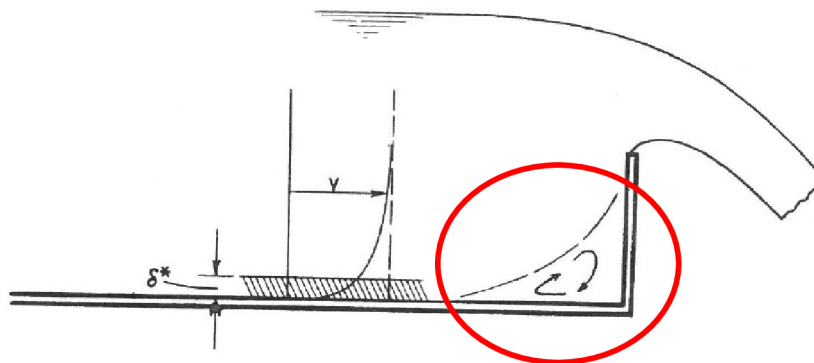
Autoři za předpokladu proudění vody při běžné teplotě nahrazují kritéria  $Re$  a  $We$  hodnotami  $b$  a  $h$  (3.3.11), tedy

$$C_d = f_4\left(\frac{b}{B}, \frac{h}{P}, h, b\right). \quad (3.3.11)$$

Problémem rovnice (3.3.11) je, že pro zobrazení všech závislostí vcelku, vznikne komplikovaná soustava grafů. Příhodně se proto funkce výšky  $h$  a šířky  $b$  nahradí empirickými rovnicemi a součinitel  $Cd$  jako funkce  $\frac{b}{B}, \frac{h}{P}$ .

### 3.3.3 Význam viskozity

Vliv viskozity autoři porovnávají se vzorovým potenciálním prouděním. Nejvýznamnější je vliv viskozity při styku s povrchem koryta či kanálu a v místech, která jsou odkloněna od přímého proudu.



Obr. 9: Vliv viskozity [4]

Jedním z míst, kde je vliv viskozity značný, je prostor vyobrazený na (Obr. 9). V tomto prostoru vzniká vír, který má vliv zejména na přelivy s malou hodnotou poměru  $P/h$ . U přelivů s malou hodnotou poměru  $P/h$  má viskozita a vznik víru za následek zvětšení součinitele přepadu  $C_a$ .

Na (Obr. 9) a (Obr. 10) je dále zobrazena mezní vrstva a její vliv na rychlostní pole v okolí přelivu. Velikost vlivu mezní vrstvy na součinitel přepadu  $Cd$  je možné přirovnat ke změně hodnot  $b$  a  $h$ . Mezní vrstva se také propaguje do součinitele kontrakce paprsku.

Viskozita má dále vliv na přelivy, kde šířka přelivu  $b$  je menší než šířka koryta  $B$ . Viskozita v tomto případě způsobuje změnu boční kontrakce paprsku.

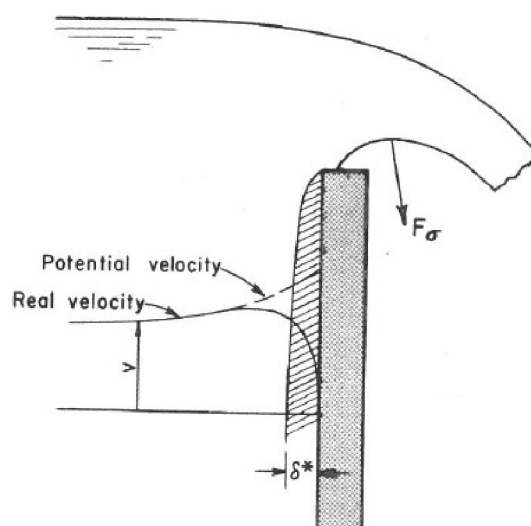
Vliv mezní vrstvy v přítokovém korytě, která vzniká zejména na dně a stěnách kanálu, roste s tím, jak vzrůstají hodnoty poměrů  $\frac{b}{B}, \frac{h}{P}$ . Efekt na přepadový součinitel je podobný jako snížení šířky přelivu  $b$ . Mezní vrstva se chová tak, že zmenšuje šířku koryta a výšku přelivu.

Je však podstatné zdůraznit, že tloušťka mezní vrstvy a vznik úplavů (viz vír před přelivem) nejsou v přímém vztahu s přepadovou výškou  $h$ , nebo velikostí přelivu. Avšak relativní vliv absolutní mezní vrstvy je odvislý od absolutních hodnot  $h, b$  a  $P$ .

### 3.3.4 Vliv povrchového napětí

Autoři v úvodu zmiňují návaznost na práci E. Lundqista, který poukazuje na vliv povrchového napětí na součinitel kontrakce paprsku.

Jako první stav uvádí vliv povrchového napětí na ulpívání přepadového paprsku na koruně přelivu. Toto má za následek snížení trajektorie paprsku a zvýšení součinitele kontrakce oproti potenciálnímu proudění.



Obr. 10: Schéma přepadu přes ostrohranný přeliv [4]

Druhým stavem je vliv povrchového napětí na ulpívání paprsku ke konstrukci přelivu. Povrchové napětí  $\sigma$  se propaguje jako dostředivá síla  $F_\sigma$  působící na paprsek, viz (Obr. 10), tato síla tlačí paprsek směrem ke konstrukci přelivu. Její vliv se zvětšuje se zmenšující se  $h$ .

Jako v případě viskozity je relativní vliv povrchového napětí odvislý od charakteristik  $h$  a  $b$ . Čím jsou tyto hodnoty větší, tím se snižuje vliv povrchového napětí  $\sigma$ .

### 3.3.5 Stanovení výpočtu přepadového součinitele

Na základě předchozí analýzy autoři stanovili rovnice, které uvažují s vlivem výše zmíněných veličin. Zavedli efektivní hodnoty šířky  $b_e$  a výšky  $h_e$ , které definovali jako

$$b_e = b + k_b, \quad (3.3.12)$$

$$h_e = h + k_h, \quad (3.3.13)$$

kde  $k_b$  a  $k_h$  jsou součinitelé hydraulických vlivů (viskozity, povrchového napětí).

Efektivní součinitel přepadu  $C_e$ , který je nezávislý na hodnotách přepadové výšky a šířky přelivu, je poté určen rovnicí

$$C_e = \frac{Q}{b_e h_e^{3/2}} = f_5 \left( \frac{b}{B}, \frac{h}{P} \right). \quad (3.3.14)$$

Průtok se stanoví z rovnice

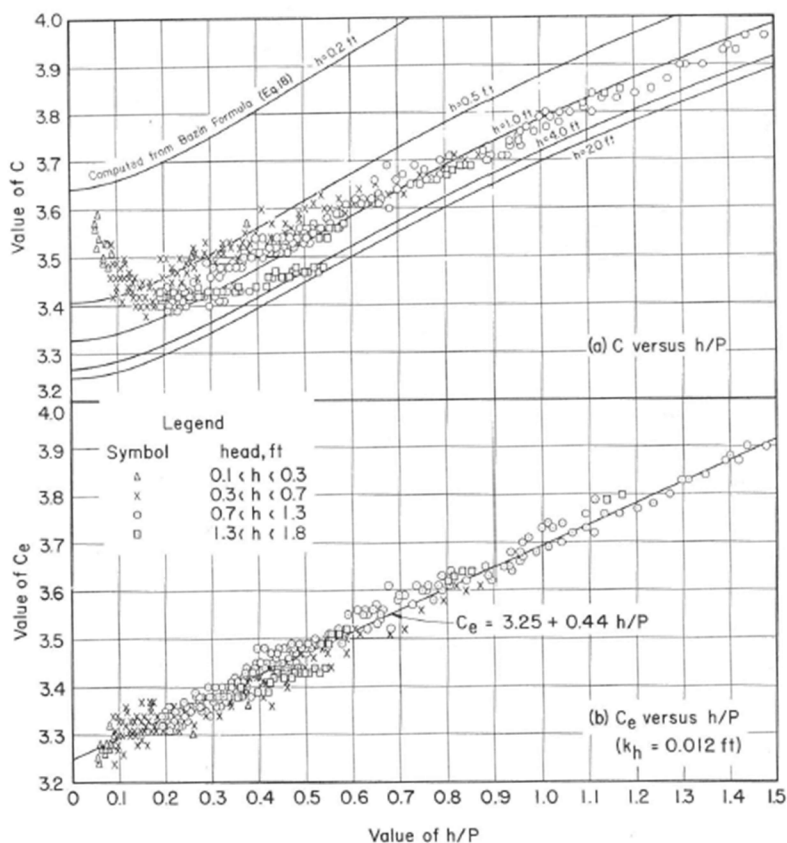
$$Q = C_e b_e h_e^{3/2}. \quad (3.3.15)$$

### 3.3.6 Zdroje dat pro vyjádření součinitele přepadu

#### Experimenty provedené Henry Bazinem

Autoři navazují na práci provedenou Henry Bazinem v roce 1886 a 1887 na Burgundském kanále poblíž Dijonu. Kanál měl šířku 2 m, délku 213,5 m. Na tomto kanále Bazin umístil několik tenkostěnných přelivů, které měly být svými charakteristikami srovnatelné. Bazin ovšem realizoval svoje měření pouze pro hodnotu  $b/B = 1,0$ .

Naměřená data byla vynesena do grafu (Obr. 11) a proložena spojnicí. Na obrázku 11 a) je zobrazen součinitel  $C$  (imperiální jednotky) jako funkce  $h/P$  pro přeliv ostrohranný bez bočního zúžení. Na obr. 11 b) je potom efektivní součinitel  $C_e$  funkcí  $h/P$ . Hodnota součinitele hydraulického vlivu  $k_h$  je 0,00366 m, tato hodnota byla zvolena na základě pokusných výpočtů tak, aby eliminovala korelaci mezi přepadovou výškou a přepadovým součinitelem. Součinitel hydraulického vlivu  $k_b$  byl zanedbán z důvodu malého vlivu ( $b/B = 1$ ).



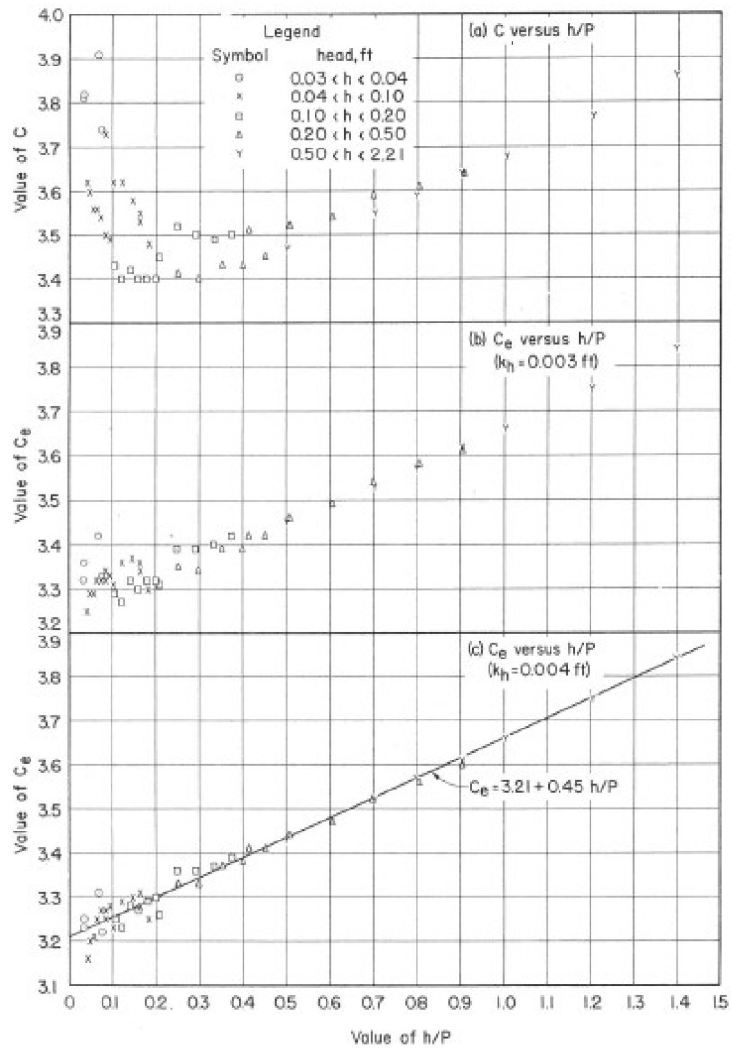
Obr. 11: Bazinova série měření pro  $b/B = 1$  [4]

#### Experimenty provedené Schoderem a Turnerem

Schoder a Turner provedli výzkum, při kterém bylo realizováno téměř 2500 pokusů. Pro účely práce byly použity testovací série E a F. Pokusy byly provedeny ve žlabu 1,286 m širokém a 9,14 m dlouhém. V tomto výzkumu byla měněna výška  $P$ , přeliv byl bez bočního zúžení  $b/B = 1$ .

Naměřená data v Obr. 12 (imperiální jednotky) zobrazují závislost  $C$  a  $C_e$  na  $h/P$ . V grafu a) obr. 12 jsou data v surovém, neupraveném formátu, kdy je součinitel  $C$  systematicky vztažen k přepadové výšce  $h$ . V grafu b) a c) obr. 12 jsou poté hodnoty násobeny koeficientem  $k_h$  ( $k_{hb} = 0,00091$  m,  $k_{hc} = 0,00122$  m). Zde je patrné potlačení korelace mezi jinými veličinami.

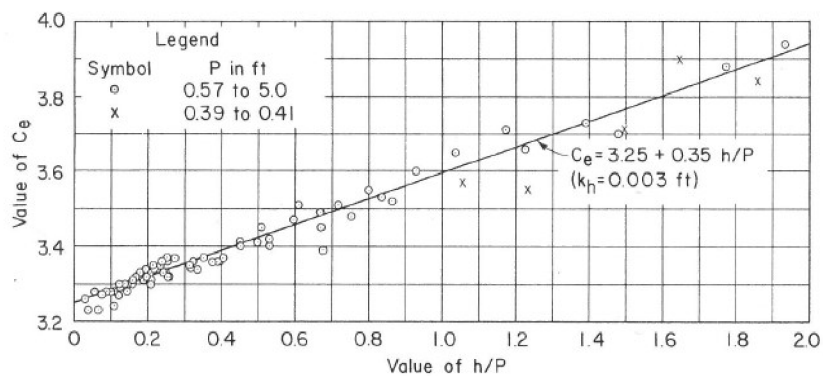




Obr. 12: Série E a F měření Schodera a Turnera [4]

Experimenty vykonané na United States Bureau of Reclamation

Použit byl tenkostěnný přeliv bez boční kontrakce  $b/B = 1$ . Rozměry měrného žlabu byly 0,6096 m šířky a 5,486 m délky. Probíhala změna výšky  $P$ . Na Obr. 13 (imperiální jednotky) je zobrazen efekt použitého koeficientu  $k_h$ , kdy je díky jeho použití zlepšena korelace mezi jednotlivými daty.

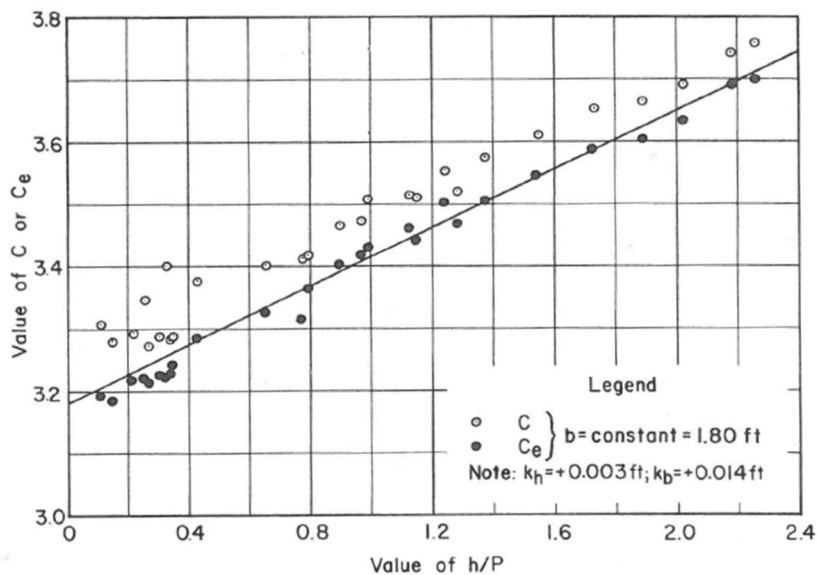


Obr. 13: Měření provedená U.S.B.R. [4]

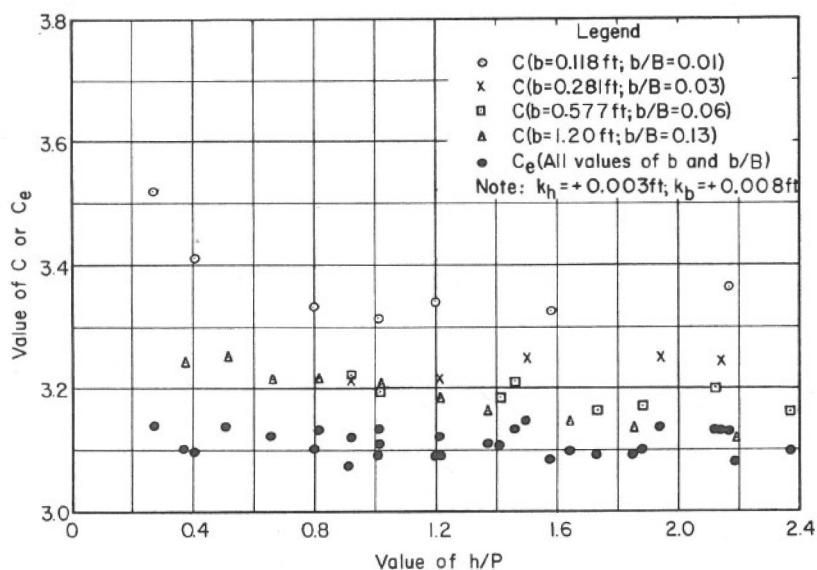
## Experimenty vykonané v Hydraulics Laboratory of Georgie Institute of Technology

Přeliv byl umístěn ve žlabu o šířce 3,048 m, délce 7,62 m a hloubce 0,762 m. Jako jediný z experimentů se zabýval vztahem  $b/B$ . Toto bylo řešeno vloženými hliníkovými přepážkami tloušťky 0,0635 m, těmito přepážkami bylo možné měnit šířku žlabu. Bylo naměřeno 249 pokusů tak, aby zahrnovaly kombinace různých šířek a výšek.

Experiment provedený na institutu měl doplnit předchozí experimenty právě variabilitou  $b/B$ . Konkrétní hodnoty  $b/B$ , pro které bylo měření vyhodnocováno, byly: 0,20, 0,40, 0,60, 0,80 a 1. Avšak taktéž byl proveden výzkum na poli koeficientu  $k_h$ . Na Obr. 14 (imperální jednotky) je zobrazen efekt kombinace  $k_h$  a  $k_b$ , kde podstatný vliv  $k_h$  je na počátku grafu a vliv  $k_b$  je zatelný od hodnoty 0,6  $h/P$ .

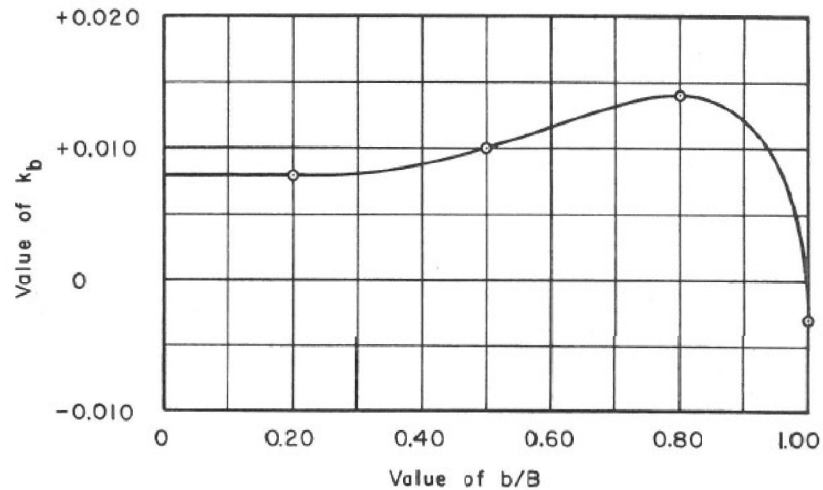


Obr. 14: Součinitel  $C$  v korelaci s  $C_e$  [4]



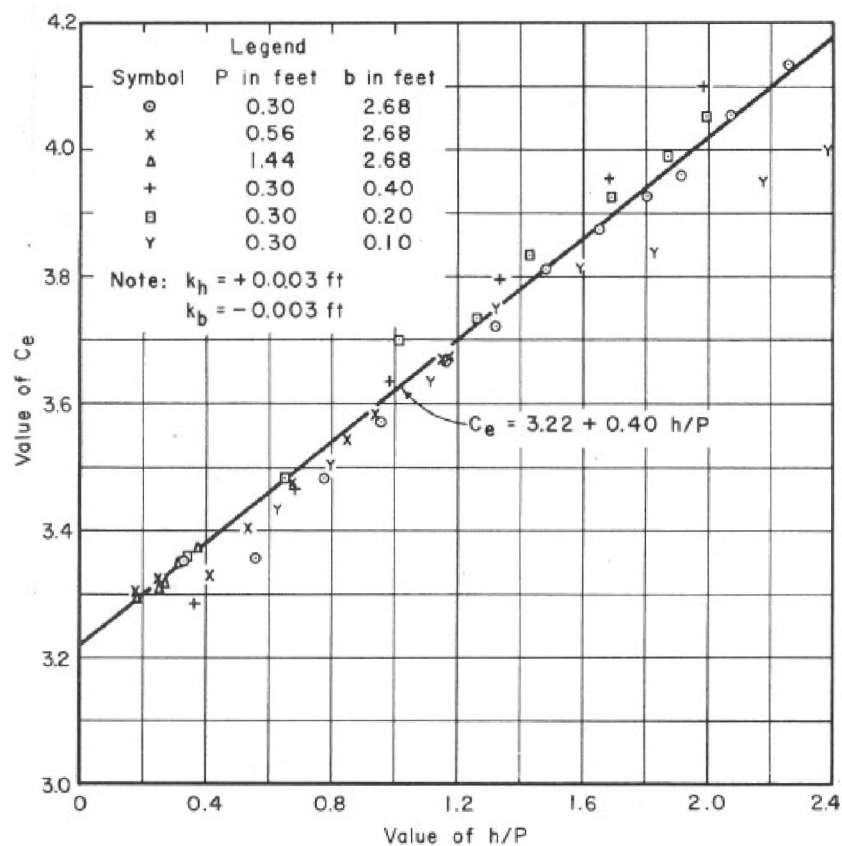
Obr. 15: Uplatnění korekce pomocí koeficientu  $k_b$  [1]

Na Obr. 15 (imperiální jednotky) je patrné, že pro poměr  $b/B < 0,2$  je pro výpočet efektivního součinitele  $C_e$  koeficient  $k_b$  konstantní pro všechny hodnoty.



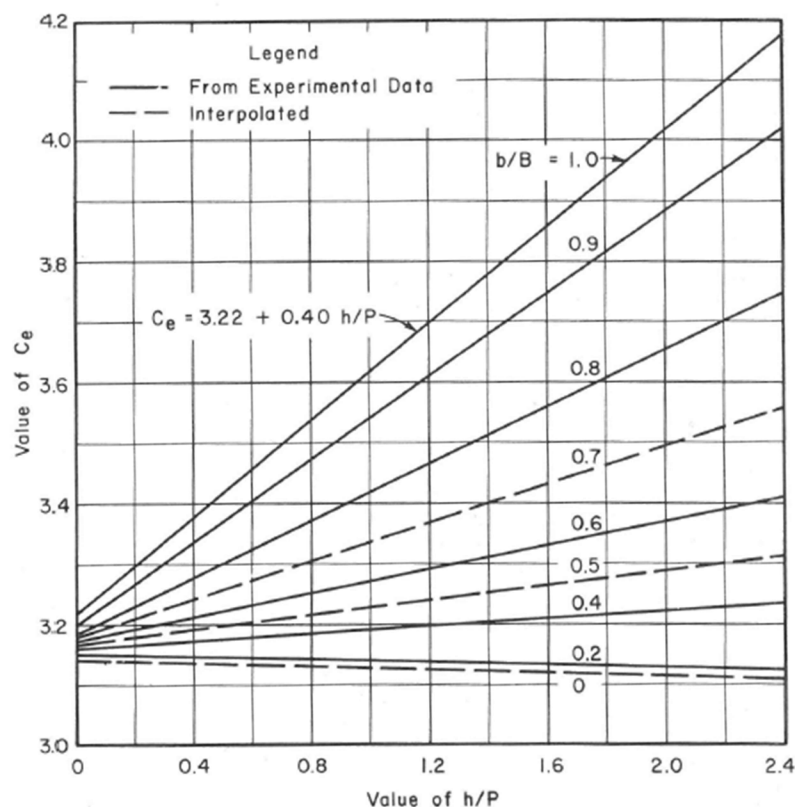
Obr. 16: Závislost  $k_b$  na  $b/B$  [4]

Výsledek všech experimentů k docílení zobrazení průběhu koeficientu  $k_b$  při závislosti na poměru  $b/B$  je na Obr. 16 (imperiální jednotky).



Obr. 17:  $C_e$  v závislosti na  $h/P$  při  $b/B = 1$  [4]

V Obr. 17 je názorně zobrazen vliv efektivní výšky  $h_e$  a efektivní šířky  $b_e$  na velikost efektivního součinitele  $C_e$  v závislosti na poměru  $h/P$ .



Obr. 18: Závislost  $C_e$  na  $h/P$  pro všechna měření [4]

Výsledky všech experimentů provedených na institutu zobrazuje přehledně závislost přepadového součinitele  $C_e$  na poměrech  $b/B$  a  $h/P$  na Obr. 18. Na základě výsledků z Obr. 18 a Obr. 16 lze rovnici (3.3.15) uvedenou v kap. 3.3.5 identifikovat jako komplexní vyjádření vlivů působících na přepad.

### 3.3.7 Zhodnocení

#### Výsledky experimentů

Efektivní přepadový součinitel  $C_e$  je lineární funkcí  $h/P$  pro jednotlivé  $b/B$ , kdy  $k_h$  je konstantní pro všechny hodnoty  $b/B$  a  $h/P$ . Koeficient  $k_b$  je funkcí  $b/B$ .

Dle výsledků měření autorů výše zmíněných je nutno říci, že hodnoty  $C_e$  a  $k_h$  jsou podstatně ovlivněny přesností laboratorního vybavení a nástroji použitými v experimentu. Velmi podstatný je přítokový kanál, jenž ovlivňuje rychlostní pole před přelivem.

Autoři doporučují použití hodnot koeficientů odvozených dle experimentu v Georgia Institute of Technology a rovnici (3.3.15) pro výpočet součinitele přepadu.

#### Vliv zanedbání koeficientů $k_h$ a $k_b$

Jak již bylo řečeno, vliv hydraulických koeficientů  $k_h$  a  $k_b$  klesá s rostoucí šířkou přelivu a výškou přepadového paprsku. Podstatné je zkoumat tyto vlivy na malých (šířka, výška) přelivech. V rovnici (3.3.15) jsou tyto vlastnosti zahrnuty v efektivních veličinách  $b_e$  a  $h_e$ .

Vliv koeficientů na relativní chybu průtoku je pak možné stanovit pro každý koeficient zvlášť. Pro  $k_h$  se míra vlivu za předpokladu  $b \approx b_e$  spočte

$$\frac{\Delta Q}{Q} = 1 - \left( \frac{h}{h+k_h} \right)^{3/2}. \quad (3.3.16)$$

Pro  $k_b$  se míra vlivu za předpokladu  $h \approx h_e$  spočte

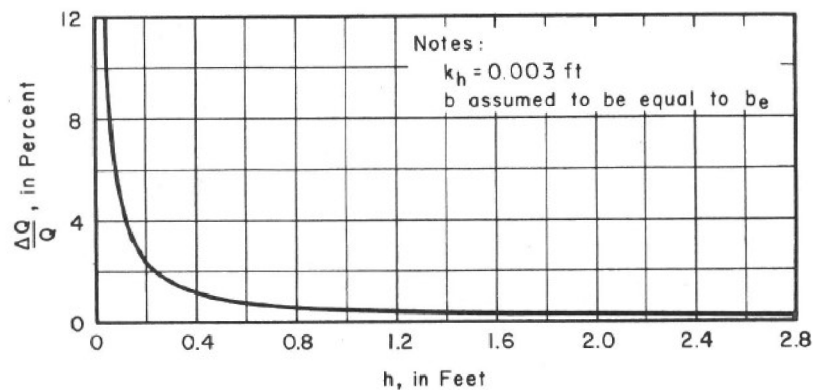
$$\frac{\Delta Q}{Q} = 1 - \left( \frac{b}{b+k_b} \right). \quad (3.3.17)$$

Relativní chyba průtoku

$$\frac{\Delta Q}{Q} = 1 - \frac{b}{b_e} \left( \frac{h}{h_e} \right)^{3/2}, \quad (3.3.18)$$

se poté vypočte z absolutní chyby průtoku

$$Q = C_e b_e h_e^{3/2} - C_e b h^{3/2}. \quad (3.3.19)$$



Obr. 19: Efekt viskozity a povrchového napětí při různých výškách  $h$  [4]

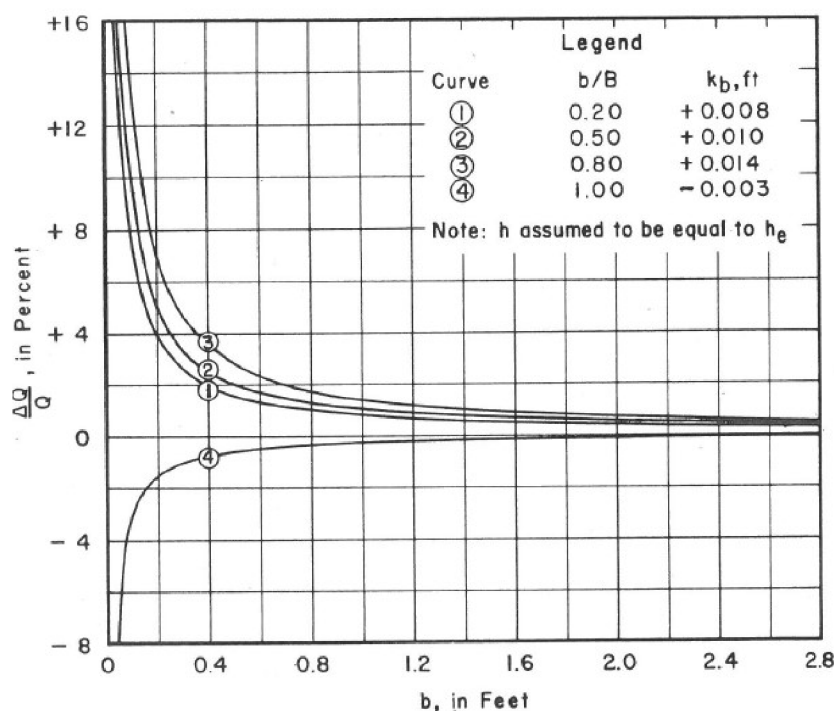
Při výpočtech používajících rovnice (3.3.15) je dobré se řídit informacemi z Obr. 19 a Obr. 20. Na základě těchto informací je možné stanovit, kdy se viskozita  $\nu$  a povrchové napětí  $\sigma$  začne propagovat do výpočtu.

#### Horní limit $h/P$

Pro měření nad poměr  $h/P > 5$  nelze aplikovat standardní výpočet pomocí (3.3.15).

#### Vliv výšky přelivu $P$

Naskytá se problém pro nízké přelivy, kdy není možné dodržet stejnou hodnotu součinitele  $C_e$  pro stejné hodnoty  $P$  (identický  $h/P$ ). Zejména pro přelivy s  $P < 0,0914$  m a s  $h/P > 0,7315$  m není možné definovat korelaci mezi součinitelem  $C_e$  a  $h/P$ . Nedoporučuje se proto používat přelivy nižší než 0,0914 m z důvodu jejich nejasné definice přepadového součinitele.



Obr. 20: Efekt viskozity a povrchového napětí ve vztahu k šířce  $b$  [4]

## 4 Metodika měření

Kapitola v práci slouží jako podklad k návrhu a k provedení vlastních experimentů.

### 4.1 Konstrukční zásady pro tenkostěnné přelivy

Pro správné měření průtoku na tenkostěnných přelivech je nutné dodržet několik důležitých zásad dle ČSN ISO 1438 [6]. Konstrukce přelivu musí odolávat účinkům maximálního průtoku, napojení na koryto má být vodotěsné a kolmé ke stěnám koryta. Měření probíhá v přítokovém korytě, za které se považuje oblast začínající ve vzdálenosti minimálně pětinasobku šířky přepadového paprsku při maximální přepadové výšce. V této oblasti musí být proudění ustálené a rovnoměrné s pravidelným rozložením rychlostí. Pokud je předpoklad nepravidelného rozložení rychlostí v přítokovém korytě, je třeba alternativního způsobu měření, jímž se prokáže možnost chyb. Důležitost rozložení rychlostních gradientů je odvislá od poměru  $h/P$  a  $b/B$ . Při nevyhovujících podmínkách je možné přistoupit k použití usměrňovačů a rozrážečů.

Aby nedocházelo k ovlivnění přepadového paprsku rozdílem tlaků pod a nad paprskem, je nutné zajistit zavzdušnění prostoru pod přepadovým paprskem, a to dostatečnou svislou vzdáleností přelivné hrany ode dna koryta, nebo zavzdušňujícím prvkem, jako je např. perforovaná hadice s externím přívodem vzduchu [6].

### 4.2 Měření výšky hladiny

Aby bylo dosaženo co největší přesnosti měření, je třeba k měření výšek použít vhodné nástroje [6]. Měřicí nástroje mají mít laboratorní přesnost a nemají, pokud možno, podléhat vlivu okolního prostředí (vliv teploty, vlhkosti), které by mohlo měření znehodnotit. Jestliže to podmínky dovolují, je možné hladinu v přítokovém korytě měřit přímo pomocí např. hrotového měřidla, v opačném případě se

doporučuje použití uklidňovacího prostoru (šachty), jenž zajistí eliminaci nežádoucí změny hladin v průběhu měření.

Měření probíhá ve vzdálenosti  $2h_{max}$  až  $4h_{max}$ , ve vzdálenosti menší, než uvedené je měření ovlivněno poklesem hladiny [6].

K odpovídajícímu měření výšky hladiny v přítokovém korytě je třeba stanovit srovnávací rovinu (nula vodočtu) [6]. Srovnávací rovina se zpravidla umísťuje do vrcholu přelivu (pravoúhlé přelivy), tzv. přelivné hrany a v průběhu měření, je-li to nutné, se kontroluje. Nula vodočtu se určuje za podmínek, které umožní její přesné určení. Tzn., že odečtení není ovlivněno proudící kapalinou a je stanoveno laboratorními měřidly fixovanými ke konstrukci přelivu. Nula vodočtu se sestává z odečtu trvalého měřidla, které měří hladinu v uklidňovací šachtě a dočasných měřidel, která měří hladinu v přítokovém korytě a polohu hrany přelivu.

### 4.3 Měření průtoku

Měřit průtok lze mnohými způsoby. V této kapitole jsou představeny dvě metody, které byly pro vlastní měření použity.

#### 4.3.1 Indukční průtokoměr

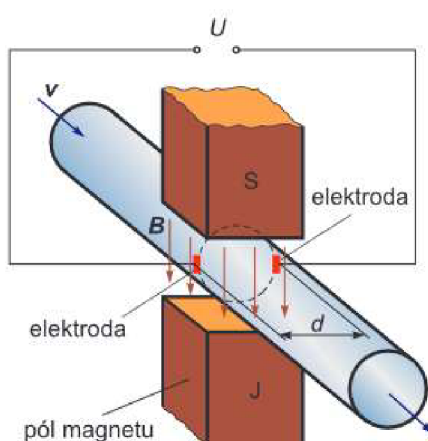
Indukční průtokoměr měří indukované napětí protékající kapaliny (Obr. 21), na základě této hodnoty stanoví napětí v indukčním poli. Z napětí v indukčním poli a z charakteristik daného průtokoměru se určí průtok [9]

$$Q_v = \frac{U_n}{K}, \quad (4.3.1)$$

kde  $U_n$  je napětí,  $K$  je charakteristická konstanta pro daný průtokoměr. Napětí se stanoví z rovnice

$$U_n = Bdv, \quad (4.3.2)$$

kde  $B$  je indukce magnetického pole,  $d$  je průměr potrubí a  $v$  je průřezová rychlost.



Obr. 21: Schéma funkce indukčního průtokoměru [9]

### 4.3.2 Objemová metoda

Pro přímé stanovení slouží informace o proteklém objemu  $V$  a času  $t$ , za který tento objem protekl. Objem je odečten z odměrné nádoby, čas je určen stopkami. Průtok se poté vypočte ze vztahu

$$Q = \frac{V}{t} \quad (4.3.3)$$

## 4.4 Chyby a nejistoty měření

Při experimentálním měření není nikdy možné dosáhnout absolutní přesnosti měřených veličin [10]. V průběhu měření se propaguje do chyby z měření mnoho faktorů, s nimiž je třeba počítat a nejlépe je eliminovat. K dosažení co nejuvěrohodnějšího zobrazení výsledků měřené veličiny (cíl měření), se používá odhadu intervalu důvěryhodnosti.

### 4.4.1 Chyby měření

Výsledkem souboru dílčích chyb je chyba měření [10]. Chyby měření se dále dělí na:

1. náhodné chyby – nelze je predikovat, projeví se náhodně;
2. systematické chyby – lze je predikovat, mají konstantní charakter po celou dobu měření, dle povědomí o chybě se dělí na:
  - a. známé – je možné je z měření odstranit korekcí,
  - b. neznámé.

Ve výsledku se náhodné a neznámé systematické chyby charakterizují jako nejistota měření [10].

### 4.4.2 Nejistoty měření

Dle ČSN ISO 1438 [6] je třeba zohlednit, že při výpočtu průtoku přes přeliv, je hodnota průtoku ovlivněna nejistotami při měření.

Nejistoty plynoucí z měření na tenkostěnném přelivu vyplývají především z:

1. nejistoty měření přepadové výšky;
2. nejistoty rozměrů stavby měřicího objektu;
3. nejistoty součinitele přepadu;
4. nejistoty rozložení rychlostí v korytě ve vztahu k součiniteli rychlosti  $C_v$ .

### Standartní nejistota typu A a B

Metodami pro určení standartní nejistoty jsou vyhodnocení pomocí analýzy opakovaně měřených údajů, nebo vyhodnocení z jiných hodnot než opakovaného měření [10]. Pro účely této práce se jedná o statistické zpracování výsledků opakovaných přímým měřením (označuje se jako standartní nejistota typu A) a vyhodnocením na základě známých, identifikovatelných a kvantifikovatelných zdrojích (standartní nejistota typu B).

Pro standartní nejistotu  $u$  vyhodnocenou pomocí statistické analýzy platí následující vztahy [10]. Průměr se počítá z rovnice



$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (4.4.1)$$

kde  $n$  je počet měření,  $x_i$  jsou naměřené hodnoty.

Výpočet standardní nejistoty typu A -  $u_A$  potom:

$$u_{Ax} = s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = k_s \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4.4.2)$$

kde  $s_{\bar{x}}$  je směrodatná odchylka aritmetického průměru a  $k_s$  je koeficient závislý na počtu měření [10] (pro  $n > 10$  je 1, pro  $n = 6$  je 1,3 a pro  $n = 4$  je 1,7).

U výpočtu standardní nejistoty typu B -  $u_B$  se zohledňuje vliv známých, identifikovatelných a kvantifikovatelných zdrojů [10]. Těmito zdroji mohou být:

- použité měřicí prostředky, přístroje a převodníky;
- použité měřicí metody;
- podmínky měření;
- konstanty použité při vyhodnocení;
- vztahy použité při vyhodnocení.

Určení standardní nejistoty jednotlivých zdrojů se provede převzetím hodnot ze způsobilých dokumentů nebo odhadem [5]. Pro určení standardní nejistoty odhadem  $u_{zj}$  se použije vztahu

$$u_{zj} = \frac{z_{max}}{\chi}, \quad (4.4.3)$$

kde  $z_{max}$  je maximální možná odchylka způsobená daným vlivem,  $\chi$  je převodní koeficient příslušného rozdělení. Standardní nejistoty jednotlivých zdrojů se musí následně přepočítat na nejistoty měřené veličiny  $u_{x,zj}$  [10]

$$u_{x,zj} = A_{x,zj} u_{zj}, \quad (4.4.4)$$

kde  $A_{x,zj}$  je citlivostní koeficient

$$A_{x,zj} = \left. \frac{\partial X}{\partial z_j} \right|_{z=z_j}, \quad (4.4.5)$$

kde  $X$  je funkcí zdrojů standardních nejistot

$$X = f(z_1, \dots, z_j, \dots, z_m). \quad (4.4.6)$$

Výsledná celková nejistota typu B -  $u_{Bx}$  je vyjádřena Gaussovým zákonem šíření nejistot [10]

$$u_{Bx} = \sqrt{\sum_{j=1}^m A_{x,zj}^2 u_{zj}^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^m u_{x,zj}^2}. \quad (4.4.7)$$

## Kombinace standardních nejistot A a B

Kvadratickým sloučením nejistot typu A a B

$$u_{Cx} = \sqrt{u_{Ax}^2 + u_{Bx}^2} \quad (4.4.8)$$

se dostane interval (kombinace standardních nejistot  $u_{Cx}$ ), ve kterém se s určitou pravděpodobností může vyskytovat skutečná hodnota měřené veličiny [5].

### Rozšířená nejistota měření

Jelikož standardní nejistoty dokáží poskytnou výsledek s pravděpodobností nejčastěji jen okolo 66 %, zavádí se parametr rozšířené nejistoty  $U$  [10]. Zavádí se tedy součin (4.4.9) standardní nejistoty a koeficientu rozšíření. Tímto úkonem se docílí intervalu pravděpodobnosti s pokrytím vyšším než 66 %

$$U = k \times u_{Cx}, \quad (4.4.9)$$

kde  $k$  je koeficient rozšíření,  $u_{Cx}$  je kombinace standardních nejistot. Hodnota koeficientu  $k$  se určí výpočtem, nebo konvenčně. Jeho hodnota určuje, s jakou pravděpodobností se měřená veličina vyskytuje v daném intervalu [5]. Pro  $k=2$  je interval 95,5 % a pro  $k=3$  je 99,7 % [10].

### Kombinace nejistot měření pro tenkostěnný pravoúhlý přeliv

Nejistota měření průtoku  $u(Q)$  se stanoví z analytického řešení, kde každý parametr má vliv na nejistotu měření [6]. Rovnice pro průtok přes pravoúhlý tenkostěnný přeliv je

$$Q = J \sqrt{g} C_d b_e h_e^{3/2}, \quad (4.4.10)$$

kde  $J$  je numerická konstanta závislá na typu přelivu, nezátížená chybou. Rozptyl hodnoty průtoku přes přeliv je

$$\Delta Q = J \sqrt{g} \left( \frac{\partial Q}{\partial C_d} \Delta C_d + \frac{\partial Q}{\partial b_e} \Delta b_e + \frac{\partial Q}{\partial h_e} \Delta h_e \right), \quad (4.4.11)$$

kde  $\Delta C_d, \Delta b_e, \Delta h_e$  jsou dílčí rozptyly a parciální derivace jsou součinitele citlivosti.

Vyhodnocením parciálních diferenciálů je vztah

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta C_d}{C_d} + \frac{\Delta b_e}{b_e} + 1,5 \frac{\Delta h_e}{h_e}, \quad (4.4.12)$$

kde  $\frac{\Delta Q}{Q} = u(Q)$ ,  $\frac{\Delta C_d}{C_d} = u(C)$ ,  $\frac{\Delta b_e}{b_e} = u(b)$  a  $\frac{\Delta h_e}{h_e} = u(h)$  jsou bezrozměrné standardní nejistoty jednotlivých veličin. Pro výslednou bezrozměrnou standardní nejistotu  $u_c(Q)$  se použije analogicky vztah (4.4.8), kdy výsledek vzniká sečtením navzájem nezávislých druhých mocnin standardních nejistot

$$u_c(Q) = \sqrt{u(C_d)^2 + u(b_e)^2 + [1,5u(h_e)]^2}. \quad (4.4.13)$$

## 5 Experiment

Pro splnění zadaného cíle v požadované přesnosti a v souladu se standardy ČSN ISO 1438 [6] a ČSN EN ISO 772 [11] bylo navrženo a zhotoveno experimentální zařízení, na němž bylo provedeno měření.

Jaké parametry bylo potřebné změřit, uvádí Tab. 1.

Tab. 1: Kombinace parametrů určených ke změření

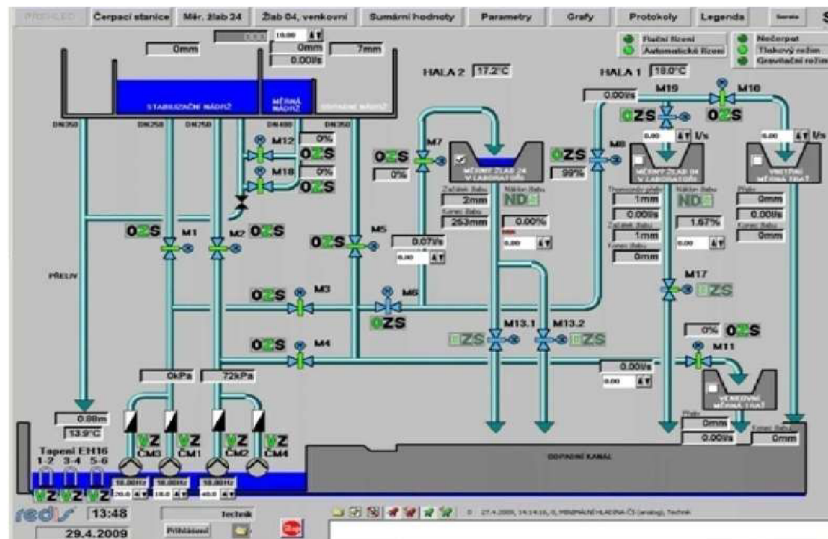
č. měření	Počet přepážek $np$	$B$	$b$	$P$	$h_{min}$	$h_{max}$	$h_{interval}$
	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
5.	0	0,5	0,5	0,2	0,05	0,15	0,01
4.	0		0,5	2			
3.	1		0,49	2			
2.	3		0,47	2			
1.	7		0,43	2			
6.	0	0,02	0,02	0,2	0,05	0,15	0,01
7.	0	0,03	0,03				
8.	0	0,05	0,05				

## 5.1 Laboratoř, hydraulické okruhy a měrné tratě

Měření probíhalo v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební (FAST) Vysokého učení technického v Brně (VUT v Brně). Laboratoř má moderní vybavení a několik hydraulických okruhů, které je možné využít k měření. Pro účely této práce byly vybrány hydraulické okruhy s takovými charakteristikami, aby odpovídaly zkoumaným parametrům a dosáhlo se tudíž co nejpřesnějších výsledků v širokém rozsahu šířek přelivu. Přelivy a žlaby měly zajišťovat požadované poměry  $h/P$ ,  $b/h$ . Zvolenými okruhy jsou hydraulický okruh č. 4 a č. 5.

### 5.1.1 Hydraulický okruh č. 4

Hydraulický okruh byl budován v roce 2003 jako největší hydraulický okruh v areálu FAST VUT v Brně [12]. Pracuje s podzemní nádrží o objemu 80 m<sup>3</sup> vody. Tuto vodu je možné pomocí čtyř odstředivých čerpadel Flygt (2×2,4 kW a 2×13,5 kW) dopravit do určených měrných tratí. Rozvod zajišťuje trubní síť, která může vodu dopravovat v tlakovém nebo gravitačním režimu. Pro gravitační režim se používá nádrž umístěná v nejvyšším bodě okruhu, z této nádrže voda přepadá přes trojúhelníkový tenkostěnný přeliv do trubní sítě. V tlakovém režimu je pomocí šoupat a klapky voda přesměrována tak, aby došlo k požadovanému průtoku na požadované trati. Toto je dosaženo pomocí ovládacího rozhraní v systému Linux (Obr. 22) na toto rozhraní je možné se připojit pomocí UTP kabelu, nebo pomocí Wi-Fi a ovládat tak hydraulický okruh vzdáleným přístupem přes program VNC Viewer. Pomocí ovládací konzole v druhém patře je možné taktéž přistoupit do ovládacího rozhraní a okruh ovládat z tohoto místa.



Obr. 22: Řídicí systém pro hydraulický okruh č. 4

K měření průtoků se využívá dvou systémů [12]. Pro tlakový režim se používá indukčních průtokoměrů ELA SMQI 99, pro gravitační režim trojúhelníkového tenkostěnného přelivu.

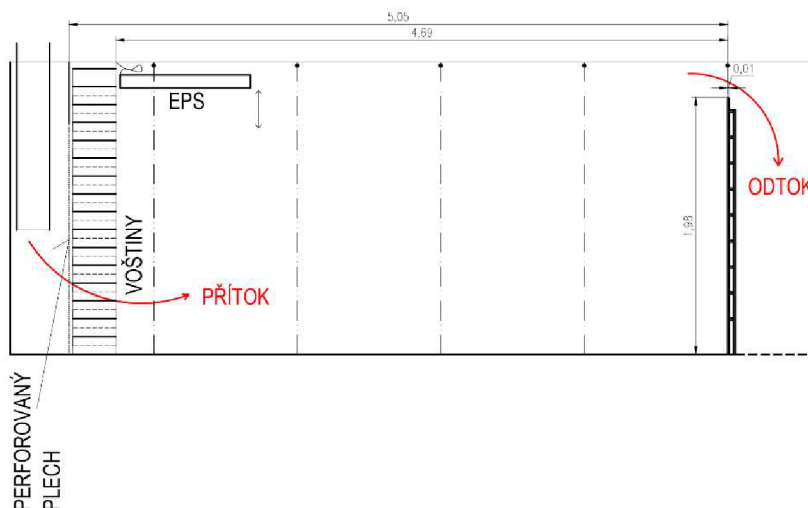
Pro regulaci průtoků slouží přímá regulace na čerpadle, a to pomocí nastavené frekvence čerpadla nebo zvoleného průtoku [12]. Lze taktéž průtok regulovat nepřímo pomocí klapky a šoupat, a to jejich přivřením, respektive pootvřením.

#### Měrná trať č. 1

Pro účely výzkumu byla zvolena venkovní měrná trať se žlabem zobrazeným na Obr. 23 a Obr. 24. Díky rozměrům žlabu délky 5,2 m, šířky 0,5 m a výšky 2,25 m bylo možné měnit výšku přelivu  $P$ , šířku přelivu  $b$  a přepadovou výšku  $h$  v širokém rozsahu.



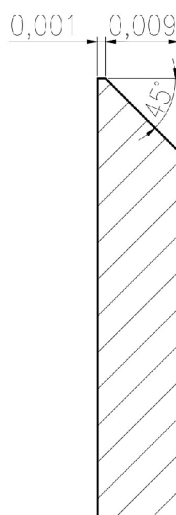
Obr. 23: Venkovní trať



Obr. 24: Schematický řez žlabem

Měrná trať je tvořena nosnou konstrukcí z pozinkované oceli, na které jsou připevněny překližkové desky. Spáry mezi jednotlivými překližkami jsou těsněny původně černým polyuretanovým tmelem, který byl nanesen na hrany překližkových desek a přitlačen ke konstrukci, spojení však časem ztratilo na těsnosti. Pro zajištění vodotěsnosti byly tyto spáry přetěsněny silikonovým tmelem – mezi spárami je tedy nerovnost, která může ovlivnit charakteristiky proudění v přilehlém okolí. Rovnoměrné rozložení rychlostí na přítoku zajišťují usměřňovače proudu v podobě voštín. Usměřňovače jsou vyhotoveny z PVC trub naskládaných podélně na sebe. Před nimi je stěna z perforovaného plechu z nerezové oceli. Pro potlačení vzniku vln na hladině je trať vybavena polystyrenovou deskou, která vznik vln eliminuje.

Konstrukce přelivu je umístěna 5,10 m za voštinami na konci žlabu. Přeliv je ke konstrukci připevněn pomocí nerezových vrutů a probíhá v celé výšce ode dna až ke koruně přelivu. Přeliv je zhotoven z PVC desky s úpravou koruny zobrazenou na Obr. 25.



Obr. 25: Detail koruny přelivu [m]

Pro změnu šířky koryta před přelivem slouží PVC desky průměrné tloušťky 0,00939 m (stanoveno opakovaným měřením digitálním posuvným měřidlem), které jsou uzpůsobeny tak, že přesahují přelivnou hranu a dělí tak přepadající proud na několik menších proudů. Desky jsou fixovány pomocí závitových tyčí s průměrnou roztečí 0,0635 m a distančními deskami nazývanými "hřebínek", do kterých jsou vyřezány otvory se stejnou roztečí (Obr. 28, Obr. 26, Obr. 27). Tato rozteč se mění dle požadavků vyjmutím desek z trati. Aby nedocházelo k rozevírání trati (změna šířky), byla koncová část trati fixována nosníkem tvaru U.

Pro ověřovací pokus byla trať osazena falešným dnem ve výšce 0,202 m pod korunou přelivu. Toto dno bylo v poloze fixováno závitovými tyčemi, viz Obr. 29.



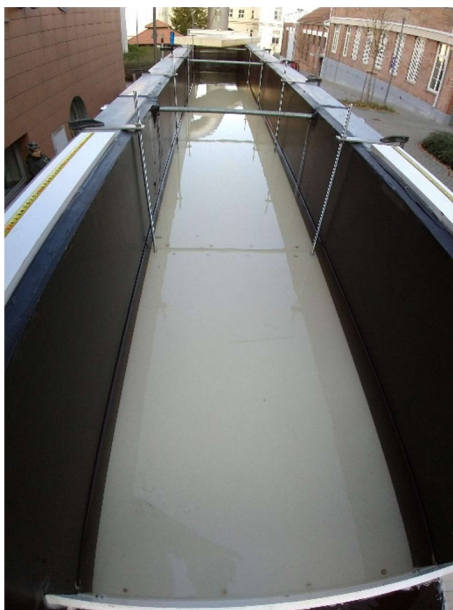
Obr. 27: Systém dělicích desek



Obr. 26: Detail uchycení dělicí desky



Obr. 28: Distanční deska



*Obr. 29: Upevnění falešného dna*

Ač byla konstrukce trati dvakrát přetěsněna, nebylo dosaženo úplné těsnosti (zejména v části s voštinami). Aby bylo možné určit průtok uniklý důsledkem netěsnosti konstrukce, byl zbudován provizorní žlab pod měrnou tratí. Žlab tvořila PE fólie položená na dlažbu a dřevěné hranoly, jež vytvářely obvodovou konstrukci. Fólie byla poté vytažena na tyto hranoly a vymežila tak prostor pro prosáknutou vodu. Na konci takto vytvořeného žlabu bylo vytvořeno ústí s PVC trubkou. Tato trubka koncentrovala průtok prosáklé vody a tím umožňovala následné měření objemovou metodou. Na konci prvního měření (měření se následně opakovalo) se projevil průsak mezi konstrukcí přelivu a stěnou tratě, tento průsak byl dotěsněn PVC deskami a špejlemi (Obr. 30).



*Obr. 30: Dotěsnění průsaku*

### 5.1.2 Hydraulický okruh č. 5

Hydraulický okruh č. 5 je v porovnání s ostatními okruhy menší [12]. Nachází se v levostranném traktu budovy F v jeho zadní části. Okruh se používá zejména pro simulaci proudění podzemní vody a pro simulace proudění v menších modelových měřítkách.

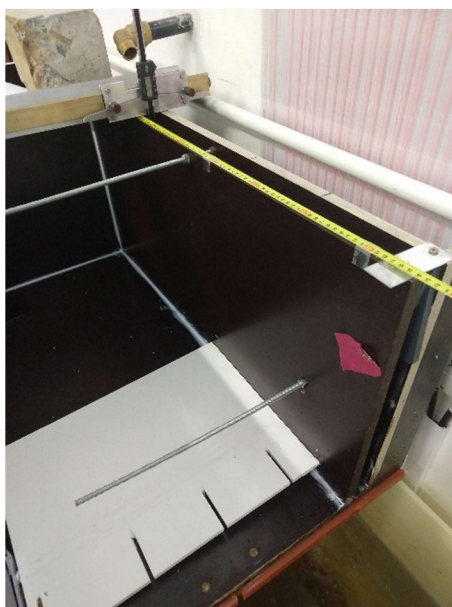
Zásobní objem hydraulického okruhu tvoří dvě doplňkové plastové zásobní nádoby o objemu 0,3 m<sup>3</sup> a stálá zásobní nádrž o objemu 0,2 m<sup>3</sup>. Ze zásobní nádrže je voda odebírána do systému pod tlakovým nebo gravitačním režimem dvěma čerpadly Vogel [12]. V gravitačním režimu je voda dopravena do nádrže zavěšené v rohu místnosti, z které je poté opět dodána do systému. Při gravitačním režimu je výška přetlaku omezena fyzicky konstrukcí budovy a nádrže. K přesměrování proudu vody v potrubní síti slouží soustava kulových ventilů.

Regulace průtoku je možná více způsoby [12]. Prvním způsobem je přímá změna frekvence motoru čerpadla. Druhým způsobem je využití ovládacího panelu, který provádí změnu frekvence čerpadel podle přednastavených režimů. Třetím způsobem je možnost redukce průtoku pomocí kulových ventilů, kdy je regulace prováděna pootevřením, respektive částečným uzavřením ventilu.

K měření průtoku je použito indukčního průtokoměru Sima FC3.

#### Měrná trať č. 2

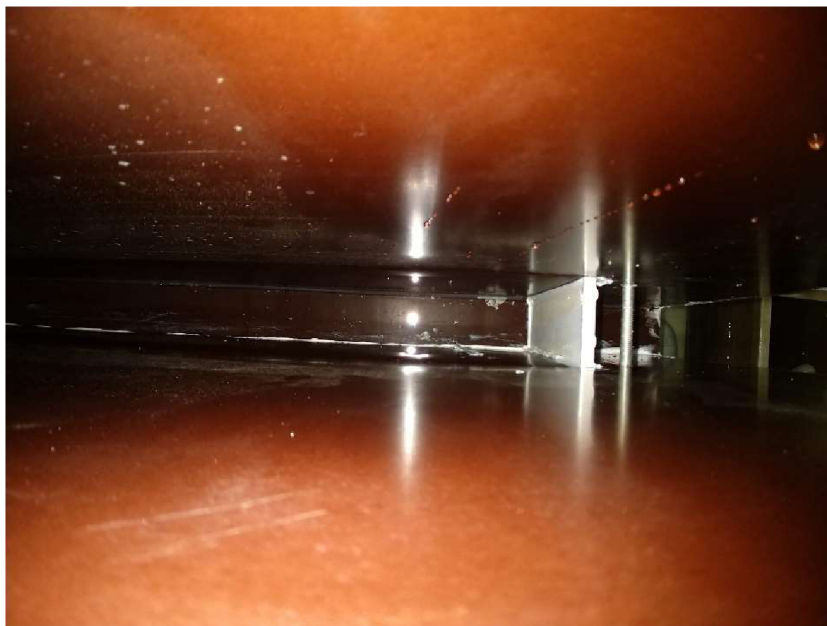
Pro účely výzkumu byla využita stávající měrná trať se žlabem, který byl přebudován pro účely pokusu (Obr. 31). Žlab má délku 1,25 m, výšku 0,432 m a šířku odvislou od pokusu.



Obr. 31: Měrná trať č.2

Nosnou konstrukci tvoří překližkové desky spojené vruty. Těsnosti konstrukce je docíleno silikonovým tmelem, který je nanesen na kontaktní plochy spojů a dále pak na spoj samotný. Voda je do měrné trati dopravena hadicí, tato hadice vyúsťuje do tlumicího prostoru. Aby nedocházelo k nerovnoměrnému rozložení rychlostí v nátokové části, je předěl mezi tlumicím prostorem a nátokem oddělen síťovinou. Přeliv je zhotoven z PVC desky, viz Obr. 25 a Obr. 32.





*Obr. 32: Pohled na přeliv shora*

Šířka měrné trati byla v průběhu měření upravována z 0,0202 m na 0,0305 m a následně na 0,0501 m. Různé šířky byly voleny s ohledem na požadavek komplexního výstupu dat.

## 5.2 Použitá technika

### 5.2.1 Hrotové měřidlo

K měření výšky hladiny je použito posuvné měřidlo (Obr. 33) s kovovým hrotem. Měřidlo je připevněno na desku, která je pomocí šroubů s maticemi připevněna k měděnému pásu. Matice fungují zároveň jako kolečka pro posuv měřidla v horizontální rovině. Měděný pás je připevněn na hliníkový trám s U profilem. Rozlišovací schopnost digitálního posuvného měřidla je na setinu milimetru. Trámeč se posouvá po vodorovných deskách s přilepeným svinovacím metrem, na kterém se odečítá vzdálenost od koruny přelivu.



*Obr. 33: Použité posuvné měřidlo pro měření výšky hladiny*

Hrot, jímž je měřidlo ukončeno, je zhotoven ze slitiny kovů s malou tepelnou roztažností. Na každou trať je použito jiného měřidla. Pro měření jedna až pět jsou úrovně hladiny měřeny zahnutým hrotem (Obr. 35), který je na měřidlo připevněn aretovacím zařízením (Obr. 34).



*Obr. 34: Uchycení hrotu na posuvném měřidle*

Pro měrnou trať č. 2 byl hrot z důvodu nedostatečného prostoru (0,020 m) vyměněn za přímý hrot (Obr. 36), jenž byl na posuvné měřidlo připevněn pomocí lepicí pásky.



*Obr. 35: Zahnutý hrot*



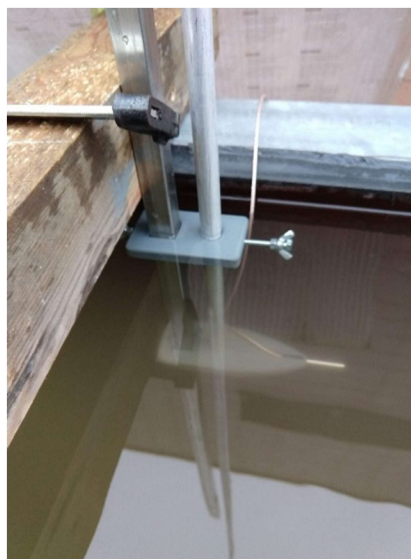
*Obr. 36: Přímý hrot*

### 5.2.2 UVP Monitor

Pro měření rychlostního pole bylo využito ultrazvukového měřidla UVP Monitor XW-PSi firmy Met-Flow (Obr. 37). Měřidlo bylo osazeno na nerozevřené tyči, která byla ukončena distančním kusem (Obrázek 39). Pomocí distančního kusu bylo možné měřit v požadovaných vzdálenostech od stěn žlabu. Měřicí soustrojí bylo fixováno ve svislé poloze dřevěným trámcem a svěrkami (Obr. 38). Svislost byla zaručena měřením libelou ve směru osy x a y. Ultrazvuková sonda byla pomocí kabelu propojena s vyhodnocovacím zařízením, počítačem s operačním systémem Windows 98, vybaveným požadovaným softwarem k vyhodnocení vstupních dat.



*Obr. 37: Detail sondy*



*Obr. 38: Detail uchycení soustroují*



Obrázek 39: Distanční díl

### 5.2.3 Měření průtoků

K měření průtoku sloužily metody přímé a nepřímé. Nepřímé měření bylo provedeno indukčním průtokoměrem, přímé měření bylo provedeno objemovou metodou, kdy byl počítán proteklý objem za daný čas. Indukční průtokoměr pro nepřímé měření byl typ Sima FC3 pro DN32 a ELA SMQI 99 pro DN200.

## 5.3 Metodika

Cílem, jak již je zmiňováno v úvodu, je zjistit jaký je vztah mezi šířkou a součinitelem přepadu. Čili přeneseně v jakém okamžiku začnou převažovat vlivy povrchového napětí a viskozity nad kinetickou energií kapaliny.

Na základě důkladného zkoumání předchozích prací autorů uvedených v kap. 3.2 a kap. 3.3 je možné říci, že vliv na přepad mají povrchové napětí, viskozita a rychlost proudění v přítokovém korytě.

Autoři uvedení v kapitole 3.2 ve svém závěru postulují, že při standardních podmínkách přítokové rychlosti není třeba vliv rychlosti zohledňovat. Standardními podmínkami se rozumí přirozené rozložení rychlostí bez výrazných turbulentních změn. Z tohoto závěru vyplývá, že je nutné docílit těchto podmínek při simulaci proudění přes tenkostěnný přeliv tak, aby nebylo nutné zohledňovat vliv rychlostního pole. Z tohoto důvodu jsou obě měrné tratě vybaveny usměrňovači proudu. K ověření slouží měření rychlostního pole v měrné trati č. 1. Výstup z měření rychlostí je porovnán s měřeními provedenými Schoderem a Turnerem. Měření rychlostí v měrné trati č. 2 nebylo provedeno z důvodu omezeného prostoru.

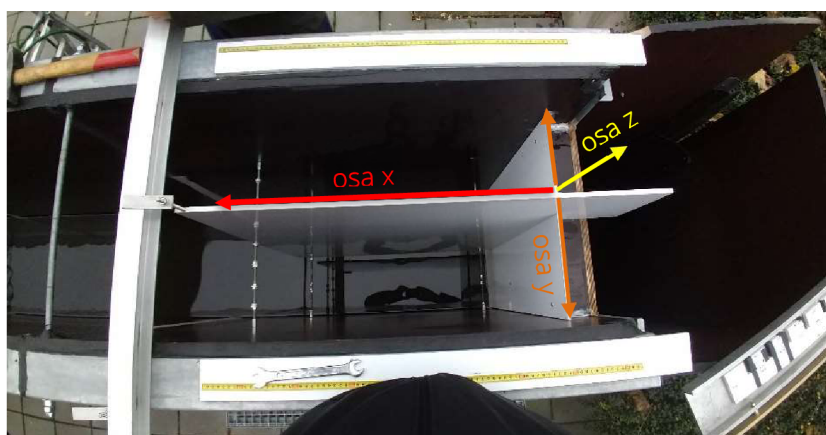
Z analýzy výsledků uvedených v kapitole 7 vyplývá, že od určitých hodnot začnou povrchové napětí a tření ovlivňovat přepad. Povrchové napětí se na přepadovém paprsku nejvíce projevuje při jeho malých výškách  $h$ , kdežto viskozita a s tím spojená mezní vrstva se projevuje při malých hodnotách  $b$  ( $b/B$  v případě přelivů s bočním zúžením) a malých hodnotách  $P$ . Cílem je zjistit při jakých hodnotách nastává zlom a vlastnosti kapaliny začnou přepad ovlivňovat. Je tedy nutné měnit šířku  $b$ , výšku  $h$ , stanovit poměr  $h/P$  a poměr  $b/h$ . K tomu jsou uzpůsobeny obě měrné tratě, kdy změna šířky  $b$  u měrné

trati č. 1 je provedena vkládáním příček a u měrné trati č. 2 změnou konstrukce samotné měrné trati. Změna výšky  $h$  je prováděna prostým zvýšením průtoku na čerpadle. Změna výšky  $P$  je řešena pouze u měrné trati č. 1 a to instalováním falešného dna. Výsledky měření budou porovnány s měřeními neovlivněných přelivů, např. stejné hodnoty  $h$ , při různých šířkách  $b$ . Dle vztahů uvedených v kap. 3 poté určit míru ovlivnění a definovat, jak lze toto ovlivnění zahrnout do výpočtu přepadového součinitele.

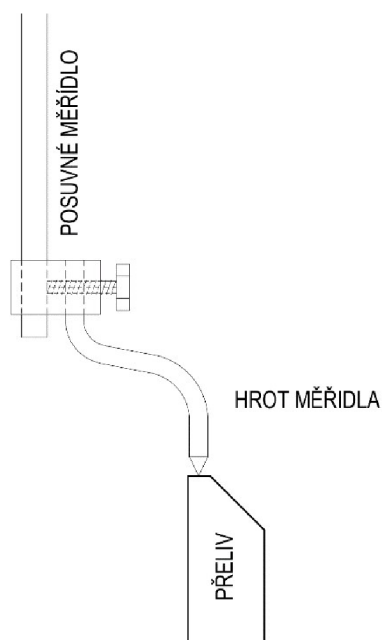
Aby byly dodrženy všechny náležitosti měření a byla maximálně eliminována možnost chyb v měření, jsou postupy měření a vyhodnocování v souladu s ČSN ISO 1438, viz kap. 4. Pro jednotlivé výpočty a naměřené hodnoty se taktéž stanoví nejistoty dle kap. 4.4.

## 5.4 Postup měření

Prvním důležitým krokem před samotným měřením bylo zajistit čistotu všech inkriminovaných součástí modelu, tzn. očištění povrchů, které přicházejí do styku s proudící kapalinou, a to zejména před přelivnou hranou ve vzdálenosti min.  $3h_{max}$  a očištění samotné konstrukce přelivu. Následovalo umístění měřicího zařízení (kap. 5.2.1) na místo měření, tj. na počátek souřadného systému (Obr. 40), který se nacházel na návodní hraně koruny přelivu. Hrotovým měřidlem byla určena nula vodočtu (Obr. 41). Nula byla vícekrát přeměřena, aby bylo dosaženo co největší přesnosti. Nula se odečítala v prostředním poli (třetí pole z levé strany). Ve zbylých polích byla měřena úroveň rovněž, aby bylo možné stanovit jejich odchýlení.



Obr. 40: Počátek souřadného systému pro měrnou trať č. 1



Obr. 41: Odečtení nuly vodočtu

Při měření úrovně hladiny před přelivem bylo nutné dodržet zásady měření uvedené v kap. 4. Měření bylo provedeno vždy ve vzdálenosti  $3h$ . Při měření klidné hladiny se hrot postupně přibližoval k hladině, až došlo k doteku (Obrázek 43, Obrázek 42), kde díky povrchovému napětí voda smočila hrot a vznikla kapilární elevace, což indikovalo styk hrotu s hladinou.



Obrázek 43: Hrot se nedotýká hladiny

Obrázek 42: Hrot se dotýká hladiny

Měření bylo nutno několikrát opakovat, aby bylo dosaženo co nejlepší přesnosti. Každých deset sekund byl hrot nadzdvíhnut, aby došlo k porušení elevace, poté bylo možné hladinu opět změřit. Celková doba, po kterou se odehrávalo měření, byla vždy větší než 200 sekund. Tento interval byl zvolen s ohledem na chybu, která vzniká při vlastním měření průtoku přímou (kap. 5.2.3) objemovou metodou, tzn. interval by měl být co největší, aby bylo možné eliminovat chyby vznikající manipulací se stopkami a odečtem objemu. Úroveň hladiny byla měřena vždy v polovině šířky daného pole.

Všechny zaznamenané hodnoty byly přeneseny do předpřipraveného listu v programu Microsoft Excel.

#### 5.4.1 Měrná trať č.1

Prvním měřením bylo měření na měrné trati č. 1. Trať byla osazena plným počtem (7) dělicích přepážek s průměrnou tloušťkou  $0,00994$  m (Obr. 44). Celková šířka  $B$  je tedy  $0,4294$  m.



*Obr. 44: První sestava měření*

Tratř byla osazena hrotovým měřidlem (kap. 5.2.1), u něž byla nastavena nula vodočtu.

Do tratě byl puštěn inicializační průtok. Inicializační průtok měl za účel zavzdušnění přepadového paprsku, aby nedocházelo k ovlivnění přepadu relativním podtlakem vzduchu pod paprskem (kap. 3.1) (Obr. 45). Zvětšením průtoku se zvětšila i spodní obálka paprsku, který se v určité fázi odtrhnul od konstrukce a zavzdušnil (Obr. 46).



*Obr. 45: Přepad ovlivněný konstrukcí přelivu*

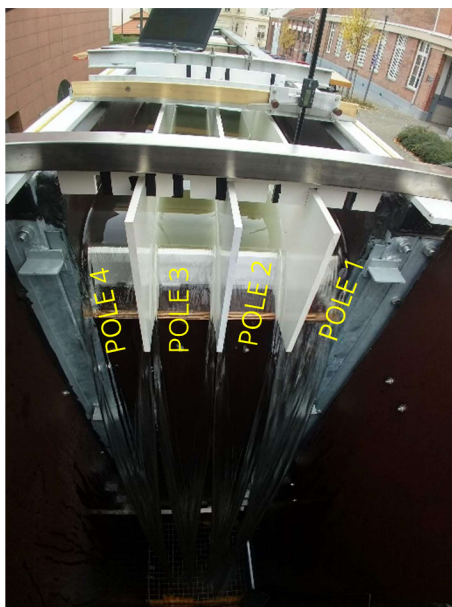


Obr. 46: Přepad neovlivněný konstrukcí přelivu

Jakmile došlo k zavzdušnění paprsku, průtok se snížil na požadovanou hodnotu. Na základě naměřené hladiny se provedla korekce průtoku na ovládacím panelu (kap. 5.1.1) čerpadla. Pokud hladina odpovídala požadované úrovni, bylo možné započít s měřením. Měření prováděli dva lidé, první obsluhoval hrotové měřidlo, druhý zaznamenával objem proteklý za čas a měřil průtok prosáklé vody. Průsak byl měřen objemovou metodou s použitím odměrného válce a stopek. Uvedený postup byl prováděn od přepadové výšky 0,06 m do 0,15 m po 0,01 m.

Po změření všech požadovaných stavů se dále změnil průběh hladiny po délce. Průběh hladiny se měřil v každém poli zvlášť, opět bylo měřeno v jednom bodě vícekrát (5) v intervalu 15 sekund, ze kterého byl vyhotoven průměr.

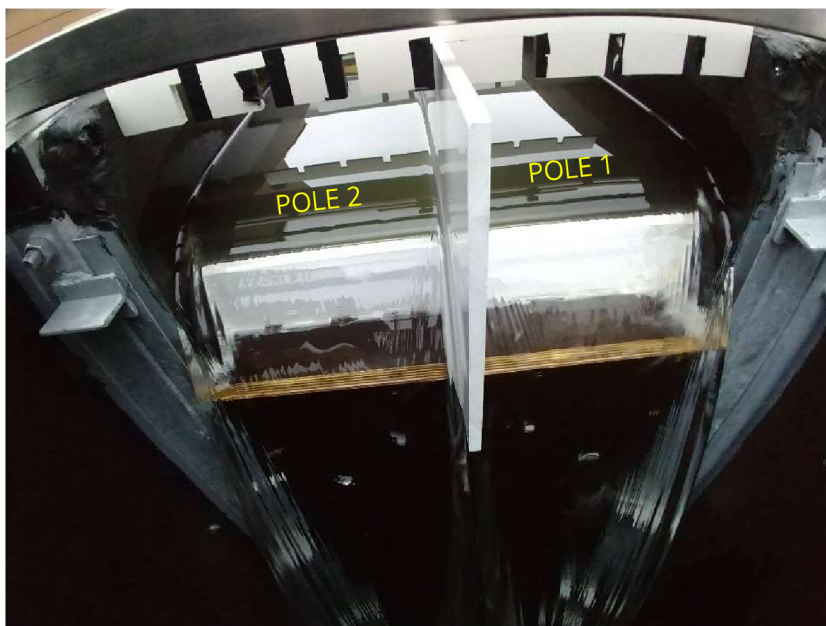
Další měřicí sestavou byla trať o čtyřech polích (Obr. 47) o průměrné rozteči 0,1173 m. Průběh měření byl stejný jako v předchozím případě. V této sestavě se však neměřil průběh hladiny.



Obr. 47: Sestava o čtyřech polích

Měřicí sestava byla o dvou polích (Obr. 48) o průměrné rozteči 0,2446 m. Průběh měření byl stejný jako v předchozím případě. V této sestavě se neměřil průběh hladiny.





Obr. 48: Měřicí sestava o dvou polích

Poslední sestavou byla trať bez dělicích přepážek (Obr. 49). Postup měření byl stejný jako v předchozích případech, na závěr byl změřen průběh hladiny.



Obr. 49: Měřicí trať bez dělicích přepážek

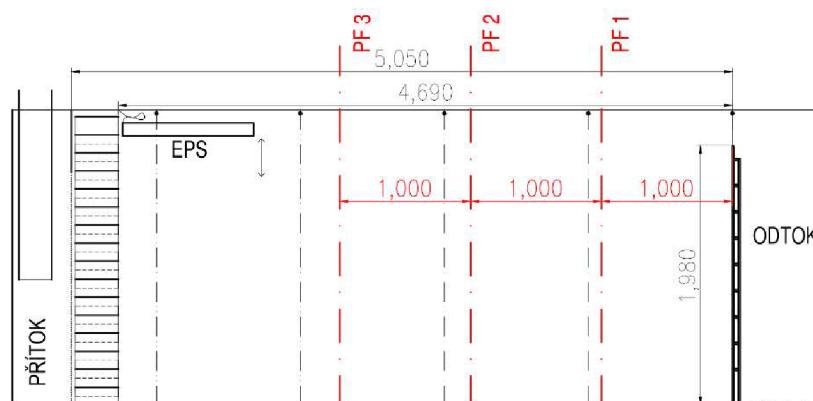
Aby bylo možné vyhodnotit, jestli se projevuje změna šířky na součinitel přepadu samostatně bez vlivu výšky přelivu, bylo třeba změnit taktéž hodnotu  $P$ . Falešné dno bylo zhotoveno ze stejného materiálu jako dělicí přepážky. Fixováno bylo v poloze pomocí závitových tyčí ve výšce  $P = 0,202$  m. Na takto upravené trati byla měřena úroveň hladiny stejným způsobem jako u předchozího měření. Podstatnou komplikací bylo výrazné turbulentní proudění s kmitající hladinou, které neumožňovalo tak přesné měření hladiny, jako v předchozím případě s klidnou hladinou. Z Obr. 50 je patrné turbulentní proudění s víry.



Obr. 50: Proudění v trati při malé hodnotě  $P$

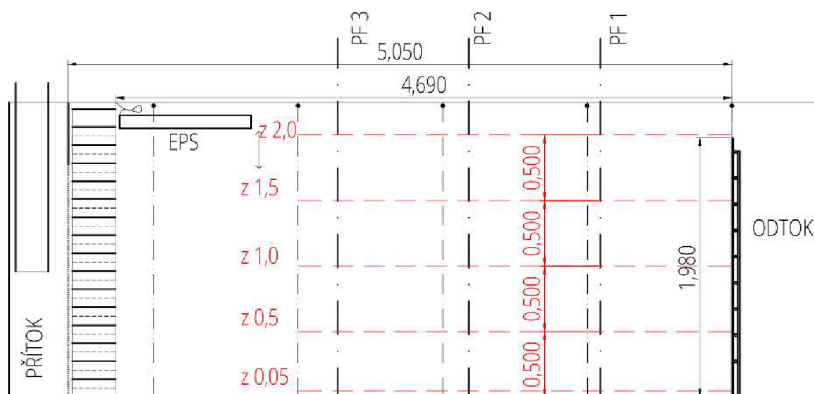
Po odejmutí falešného dna bylo provedeno měření rychlostí ve žlabu. Měření bylo provedeno z důvodů uvedených v kap. 3. Prvním krokem bylo umístění hrotového měřidla na počátek souřadného systému a odečtení nuly vodočtu, poté nastavení měřidla do vzdálenosti  $3h$ . Nastavila se frekvence čerpadla tak, aby bylo dosaženo požadované hladiny.

Po ustálení průtoku bylo zahájeno měření rychlostí. Měřilo se UVP Monitorem, viz kap. 5.2.2. Žlab byl rozdělen do tří úseků profily PF1, PF2, PF3 (Obr. 51), ve kterých byla měřena rychlost. První měřená svislice se nacházela v profilu PF1 ve vzdálenosti 0,05 m od stěny trati. Každá další svislice se nacházela ve vzdálenosti 0,10 m od předchozí svislice (celkem 5 svislic).



Obr. 51: Profily pro měření rychlostí v měrném žlabu

Měření rychlostí ve výškovém profilu svislice je odstupňováno po vzdálenostech 0,5 m s počátkem ve dně (Obr. 52). Nejnižší úroveň byla 0,05 m ode dna.



Obr. 52: Výšky ve kterých je prováděno měření rychlostí

Samotné měření probíhalo tak, že nejdříve bylo umístěno polohovací zařízení s ultrazvukovou sondou (kap.5.2.2) do požadované svislice. Měření začínalo v úrovni 0,05 m nade dnem. V této úrovni se sonda aretovala (Obrázek 53) a započal záznam dat. Po úspěšném zaznamenání výstupních dat se sonda posunula do další úrovně. Po dosažení všech úrovní se polohovací zařízení vytáhlo z vody a změnilo se pole na distančním kusu (Obrázek 54). Zařízení se poté vložilo zpět do vody do stejného profilu. Za pomoci libely se zafixovalo do svislé polohy, kolmé k vodorovné ose  $x$  a  $y$  a rovnoběžné s osou  $z$ . Po zafixování (Obr. 38) se ověřilo, zdali je osa  $z$  soustrojí opravdu kolmá k vodorovné ose  $x$  a  $y$ , pokud ano, započalo se s dalším měřením. Výsledky měření byly z UVP Monitoru transportovány do programu Microsoft Excel. Měření bylo ukončené po získání dat z poslední svislice posledního profilu PF3.



Obrázek 53: Svislá aretace



Obrázek 54: Příčná aretace

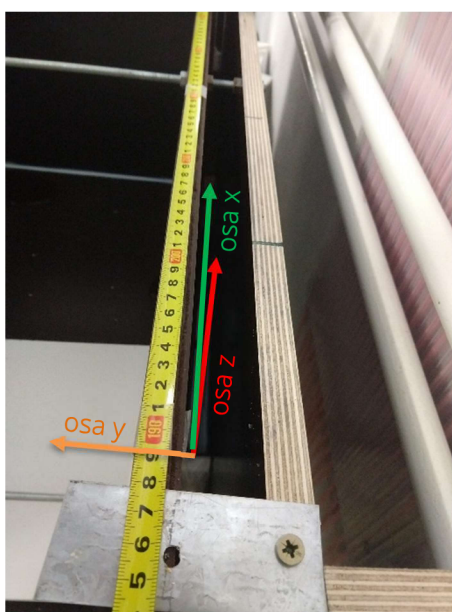
#### 5.4.2 Měrná trať č. 2

Druhá část experimentálního měření byla prováděna na měrné trati č. 2. Prvním krokem v tomto experimentu byla kontrola průsaku modifikovaného žlabu. Žlab byl napuštěn vodou a nechal se jím protékat maximální průtok o velikosti  $0,004 \text{ m}^3/\text{s}$ . Kontrola probíhala přibližně 5 min, v rámci tohoto intervalu byly zkontrolovány spoje, zavzdušnění přepadového paprsku a tvar paprsku. Během kontroly byla zjištěna nedostatečné zavzdušnění paprsku, byl tedy zřízen otvor na vnější stěně (Obr. 55).



Obr. 55: Zavzdušňovací otvor

Poté, co byla ověřena funkčnost žlabu s přelivem, bylo přistoupeno k samotnému měření. Hrotové měřidlo bylo umístěno do počátku souřadného systému (Obr. 56) pro měrnou trať č. 2 a byla odečtena nula vodočtu. Následoval postup dle kap. 5.4, kdy byla postupně změřena hladina pro výšky od 0,05 m do 0,15 m.



Obr. 56: Počátek souřadného systému pro měrnou trať č. 2

K provedení tohoto experimentu postačila obsluha pouze jedné osoby. Ta nejprve umístila hrotové měřidlo do předpokládané vzdálenosti  $x$  ( $3h$ ) od hrany přelivu a postupně měnila frekvenci motoru čerpadla tak, aby bylo dosaženo požadované přepadové výšky. Frekvence motoru čerpadla se měnila na parametrizačním panelu. Z místa, kde se obsluhuje parametrizační panel, byl dobrý výhled na hrot hrotového měřidla a tak bylo vcelku zřejmé, jaká frekvence byla potřeba pro danou přepadovou výšku. Jakmile se docílilo požadované přepadové výšky, obsluha zapnula stopky, odečetla objem na parametrizačním panelu a začala s měřením úrovně hladiny. Minimální doba, po kterou probíhalo měření, bylo opět 200 sekund, odečítání hladiny probíhalo v intervalu deseti sekund. Poté, co uplynulo požadovaných 200 sekund, se obsluha vrátila k parametrizačnímu panelu a odečetla hodnotu objemu a času.

Tímto způsobem se postupovalo ve všech třech případech s rozdílnou šířkou přelivu 0,02 m, 0,03 m a 0,05 m.

V posledním případě s šířkou trati 0,05 m nebylo možné, vzhledem ke kapacitě čerpadla, dosáhnout maximální požadované hladiny 0,15 m. Maximální hladina 0,112 m odpovídala průtoku 0,0036 m<sup>3</sup>/s.

## 6 Výsledky měření

Výstupem z měření byly informace o geometrických parametrech přelivů, polohách hladin, průtocích spočtených přímo metodou, průtocích vyhodnocených indukčními průtokoměry a rychlostech. Zmíněná data byla vyhodnocována v softwaru Excel od společnosti Microsoft a v softwaru Software Package Version 3 od společnosti Met-Flow. Identifikace čísla měření je uvedena v tab. 1.

V následujících tabulkách jsou použity tyto veličiny:

- $np$  - počet dělicích příček [-];
- $b_l$  - celková šířka (tloušťka) dělicích příček [m];
- $b_b$  - šířka měřicí trati [m];
- $b_c$  - šířka měřicí trati bez příček [m];
- $h_1...h_8$  - přepadová výška v daném poli [m];
- $V_0$  - objem zobrazený na panelu jednotky na začátku měření [m<sup>3</sup>];
- $V_t$  - objem zobrazený na panelu jednotky na konci měření [m<sup>3</sup>];
- $V_{pr}$  - objem prosáklé vody za dobu  $t_{pr}$  [m<sup>3</sup>];
- $t_{pr}$  - doba měření objemu prosáklé vody [s];
- $h_v$  - výška měřeného profilu pro měření rychlostí [m];
- $v_{xb}$  - průměrná rychlost v ose  $x$  po výšce svislice v daném profilu [m/s];
- $v_{xh}$  - průměrná rychlost v ose  $x$  pro svislici v půdorysu [m/s];
- $Q_{ind}$  - průtok indukčním průtokoměrem [m<sup>3</sup>/s];
- $Q_{pr}$  - průtok prosáklé vody [m<sup>3</sup>/s].

### 6.1 Trať č. 1 – šířka od 0,05 m po 0,50 m

Měření č. 1 bylo provedeno na trati rozdělené na osm polí (Obr. 44). Základní parametry sestavy měření jsou zobrazeny v Tab. 2 a výsledky měření v Tab. 3.

Tab. 2: Základní rozměry pro měření č. 1

$np$	$b_l$	$b_b$	$b_c$	$P$
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]
7	0,06957	0,499	0,42943	1,98

Tab. 3: Naměřené hodnoty měření č. 1

$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	$h_6$	$h_7$	$h_8$	$T$	$V_0$	$V_t$	$t$	$V_{pr}$	$t_{pr}$
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[°C]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[s]	[m <sup>3</sup> ]	[s]
0,05992	0,05983	0,05997	0,06001	0,05994	0,06001	0,05991	0,06016	13,3	0	3	249,23	0,00112	20
0,06979	0,06935	0,07009	0,06959	0,06948	0,06949	0,0697	0,06993	13,3	0	4	268,33	0,00105	20
0,08211	0,08236	0,08236	0,08271	0,08275	0,08289	0,08265	0,08285	13,3	0	4	209,09	0,00106	20
0,09387	0,0939	0,09438	0,09382	0,09419	0,09401	0,09444	0,0944	13,3	0	5	215,66	0,00106	20
0,09754	0,09843	0,0974	0,09795	0,09801	0,09785	0,09889	0,09884	13,3	0	6	242,86	0,00102	20
0,10788	0,10788	0,10841	0,10861	0,10797	0,10749	0,10855	0,10869	13,3	0	6	208,87	0,00104	20
0,11049	0,11112	0,11099	0,11104	0,11139	0,11086	0,11093	0,11089	13,3	0	7	234,62	0,00104	20
0,12129	0,12108	0,12151	0,12113	0,12133	0,12112	0,12141	0,12125	13,3	0	8	234,03	0,00102	20
0,13222	0,13217	0,13246	0,13225	0,13203	0,13202	0,13184	0,13177	13,3	0	9	234,12	0,00102	20
0,14068	0,14052	0,14081	0,14093	0,14045	0,14075	0,14065	0,14075	13,3	0	10	236,87	0,00102	20
0,14839	0,14871	0,1494	0,14899	0,14856	0,14863	0,14869	0,14931	13,3	0	11	239,6	0,00104	20

Měření č. 2 probíhalo na trati rozdělené na čtyři pole (Obr. 47). Základní parametry sestavy měření jsou zobrazeny v Tab. 4 a výsledky měření v Tab. 5.

Tab. 4: Základní rozměry pro měření č. 2

$np$	$b_l$	$b_b$	$b_c$	$P$
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]
3	0,02995	0,499	0,46905	1,98

Tab. 5: Naměřené hodnoty měření č. 2

$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$T$	$V_0$	$V_t$	$t$	$V_{pr}$	$t_{pr}$
[m]	[m]	[m]	[m]	[°C]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[s]	[m <sup>3</sup> ]	[s]
0,05757	0,05798	0,05801	0,05782	13,1	0	3	239,4	0,00104	15
0,06867	0,06844	0,06848	0,06848	13,1	0	3	186,76	0,00116	15
0,07991	0,08009	0,07995	0,08031	13,1	0	4	197,5	0,00118	15
0,08791	0,08809	0,08839	0,08878	13,1	0	5	214,7	0,00118	15
0,09782	0,0988	0,09855	0,09943	13,1	0	6	218,6	0,00118	15
0,10853	0,10815	0,10866	0,10849	13,1	0	7	221,2	0,00118	15
0,11943	0,12001	0,12002	0,12002	13,1	0	8	218,8	0,00118	15
0,12894	0,12915	0,12965	0,12992	13,1	0	9	219,6	0,00118	15
0,14053	0,14107	0,14094	0,14084	13,1	0	10	215,3	0,00118	15
0,14954	0,15017	0,14994	0,14975	13,1	0	11	216,3	0,00118	15

Měření č. 3 probíhalo na trati rozdělené na dvě pole (Obr. 48). Základní parametry sestavy měření jsou zobrazeny v Tab. 6 a výsledky měření v Tab. 7.

Tab. 6: Základní rozměry pro měření č. 3

$np$	$b_l$	$b_b$	$b_c$	$P$
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]
1	0,00986	0,499	0,48914	1,98

Tab. 7: Naměřené hodnoty měření č. 3

$h_1$	$h_2$	$T$	$V_0$	$V_t$	$t$	$V_{pr}$	$t_{pr}$
[m]	[m]	[°C]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[s]	[m <sup>3</sup> ]	[s]
0,05955	0,06008	13,4	0	3	218,95	0,00102	15
0,06969	0,07004	13,4	0	4	232,7	0,00132	20
0,0772	0,07736	13,4	0	4	201,14	0,00134	20
0,08802	0,08824	13,4	0	5	207,53	0,00136	20
0,09819	0,09832	13,4	0	7	247,46	0,00136	20
0,10986	0,11047	13,4	0	9	324	0,0014	20
0,12042	0,12064	13,4	0	9	234,42	0,0014	20
0,1295	0,13	13,4	0	10	233,7	0,0014	20
0,14054	0,1411	13,4	0	11	226,26	0,00142	20
0,14984	0,15023	13,4	0	12	224,95	0,0014	20

Měření č. 4 probíhalo na trati o jednom poli (Obr. 49). Základní parametry sestavy měření jsou zobrazeny v Tab. 8 a výsledky měření v Tab. 9.

Tab. 8: Základní rozměry pro měření č. 4

$np$	$b_l$	$b_b$	$b_c$	$P$
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]
0	0	0,499	0,499	1,98

Tab. 9: Naměřené hodnoty měření č. 4

$h_1$	$T$	$V_0$	$V_t$	$t$	$V_{pr}$	$t_{pr}$
[m]	[°C]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[s]	[m <sup>3</sup> ]	[s]
0,05959	13,3	0	3	218,35	0,0012	20
0,06823	13,3	0	4	238,14	0,0012	20
0,08048	13,3	0	5	232,94	0,0012	20
0,08843	13,3	0	5	203,25	0,0012	20
0,09992	13,3	0	6	203,24	0,00122	20
0,11236	13,3	0	8	227,92	0,00124	20
0,12065	13,3	0	9	230,12	0,00124	20
0,12902	13,3	0	10	230,51	0,00125	20
0,14003	13,3	0	11	224,1	0,00126	20
0,14913	13,3	0	12	223,43	0,00126	20

Měření č. 5 bylo na měrné trati osazené falešným dnem, bez dělicích přepážek (Obr. 50). Základní parametry sestavy měření jsou zobrazeny v Tab. 10 a výsledky měření v Tab. 11.

Tab. 10: Základní rozměry pro měření č. 5

$np$	$b_l$	$b_b$	$b_c$	$P$
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]
0	0	0,499	0,499	0,202

Tab. 11: Naměřené hodnoty pro měření č. 5

$h_1$	$T$	$V_0$	$V_t$	$t$	$V_{pr}$	$t_{pr}$
[m]	[°C]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[s]	[m <sup>3</sup> ]	[s]
0,0598	13,2	0	4	286,6	0,00078	20
0,06012	13,2	0	3	214,79	0,001	20
0,07132	13,2	0	4	220,41	0,00096	20
0,08138	13,2	0	5	225,56	0,00096	20
0,09036	13,2	0	6	229,99	0,00094	20
0,10044	13,2	0	7	229	0,00094	20
0,10954	13,2	0	8	228,8	0,00092	20
0,12041	13,2	0	9	223,58	0,00092	20
0,12991	13,2	0	10	221,03	0,00094	20
0,13989	13,2	0	11	216,77	0,00092	20
0,14879	13,2	0	12	214,55	0,00098	20

Dále bylo třeba zaměřit průběh hladin pro trať osazenou dělicími přepážkami Tab. 12 a pro trať bez dělicích přepážek Tab. 13. Parametry těchto tratí zůstávají stejné, jako je v případě Tab. 2 a Tab. 8.

Tab. 12: Průběh hladiny pro trať s dělicími přepážkami

$x$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	$h_6$	$h_7$	$h_8$	$T$
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[°C]
-0,45	0,15054	0,15047	0,15057	0,15078	0,15008	0,149	0,14901	0,14964	13,6
-0,40	0,15052	0,15064	0,15029	0,15009	0,1499	0,14952	0,14873	0,14918	13,6
-0,35	0,15065	0,15093	0,15056	0,14951	0,1494	0,14881	0,14844	0,1485	13,6
-0,30	0,15029	0,1506	0,1499	0,14922	0,14881	0,14855	0,1483	0,14785	13,6
-0,25	0,14915	0,14902	0,14915	0,14902	0,14885	0,14752	0,1478	0,14665	13,6
-0,23	0,14815	0,14925	0,14883	0,1487	0,14717	0,14712	0,14736	0,1458	13,6
-0,21	0,14826	0,14825	0,14892	0,14838	0,14691	0,14571	0,14662	0,14565	13,6
-0,19	0,14738	0,14888	0,14767	0,1472	0,14607	0,14495	0,14556	0,14558	13,6
-0,17	0,14695	0,14811	0,14658	0,14693	0,14595	0,14506	0,14481	0,14558	13,6
-0,15	0,14589	0,14606	0,14637	0,14627	0,14483	0,14422	0,14455	0,14512	13,6
-0,14	0,14571	0,14565	0,14571	0,14535	0,14495	0,14365	0,14325	0,14454	13,6
-0,13	0,14558	0,14547	0,1449	0,14492	0,14407	0,14325	0,14295	0,14378	13,6
-0,12	0,14478	0,14445	0,14316	0,14465	0,14368	0,14316	0,1425	0,14307	13,6
-0,11	0,14424	0,14416	0,14425	0,14382	0,1423	0,14243	0,14188	0,1425	13,6



-0,10	0,14354	0,14397	0,14295	0,14373	0,14198	0,14079	0,1413	0,14116	13,6
-0,09	0,14173	0,14211	0,14202	0,14213	0,14095	0,14066	0,14129	0,14102	13,6
-0,08	0,14098	0,14183	0,14125	0,14185	0,14049	0,14021	0,13955	0,13995	13,6
-0,07	0,14017	0,14062	0,14015	0,1401	0,14016	0,13914	0,13891	0,13965	13,6
-0,06	0,13843	0,13955	0,13909	0,13913	0,13805	0,13806	0,13815	0,1378	13,6
-0,05	0,1385	0,13848	0,13831	0,13842	0,13645	0,13723	0,13645	0,13714	13,6
-0,04	0,13748	0,13708	0,13735	0,13749	0,1361	0,13669	0,1345	0,1355	13,6
-0,03	0,13576	0,13607	0,13571	0,13549	0,1341	0,134	0,1329	0,13373	13,6
-0,02	0,13417	0,13395	0,13381	0,13351	0,1322	0,13265	0,1323	0,13172	13,6
-0,01	0,133	0,13255	0,13142	0,13176	0,13083	0,13074	0,1305	0,13002	13,6
0,00	0,12971	0,13046	0,12978	0,12948	0,12787	0,12775	0,12859	0,1283	13,6
0,01	0,12769	0,12692	0,12765	0,12649	0,12665	0,12612	0,12576	0,12615	13,6
0,02	0,12447	0,12471	0,1241	0,12418	0,12283	0,12279	0,12377	0,12346	13,6
0,03	0,12206	0,12178	0,12079	0,12097	0,1207	0,11908	0,11976	0,11898	13,6
0,04	0,11917	0,11928	0,11806	0,11848	0,1166	0,11687	0,1167	0,11668	13,6
0,05	0,11454	0,11492	0,11469	0,11495	0,1129	0,11335	0,11368	0,11223	13,6
0,06	0,11114	0,11047	0,11004	0,11062	0,10995	0,1085	0,10932	0,1096	13,6

Tab. 13: Průběh hladiny pro trať bez dělicích přepážek s falešným dnem

$x$	$h_1$	$T$
[m]	[m]	[°C]
-0,45	0,14834	13,2
-0,4	0,14822	13,2
-0,35	0,14804	13,2
-0,3	0,14733	13,2
-0,25	0,14608	13,2
-0,23	0,14656	13,2
-0,21	0,14588	13,2
-0,19	0,14535	13,2
-0,17	0,14502	13,2
-0,15	0,14431	13,2
-0,14	0,14283	13,2
-0,13	0,14276	13,2
-0,12	0,14273	13,2
-0,11	0,14185	13,2
-0,1	0,14131	13,2
-0,09	0,14003	13,2
-0,08	0,13954	13,2
-0,07	0,13813	13,2
-0,06	0,13723	13,2
-0,05	0,13544	13,2
-0,04	0,13452	13,2
-0,03	0,13306	13,2

-0,02	0,1312	13,2
-0,01	0,12924	13,2
0	0,12737	13,2
0,01	0,12517	13,2
0,02	0,12201	13,2
0,03	0,11927	13,2
0,04	0,11569	13,2
0,05	0,11196	13,2
0,06	0,10787	13,2

### 6.1.1 Rychlostní profil v přítokovém korytě

Po ukončení měření poloh hladin v závislosti na šířce trati bylo třeba ověřit rychlostní pole. Měření rychlostí probíhalo pro parametry uvedené v Tab. 14, jejímž výsledkem jsou agregovaná data. Data jsou dělena do rychlostí pro jednotlivé profily ve výšce  $z$  (Tab. 15) a vzdálenosti od stěn trati  $y$  (Tab. 16).

Tab. 14: Parametry tratě a proudění při měření rychlostí

$Q_{ind}$ kal	$T$	$b$	$h_v$
[m <sup>3</sup> /s]	[°C]	[m]	[m]
0,054	13,1	0,5	2,2

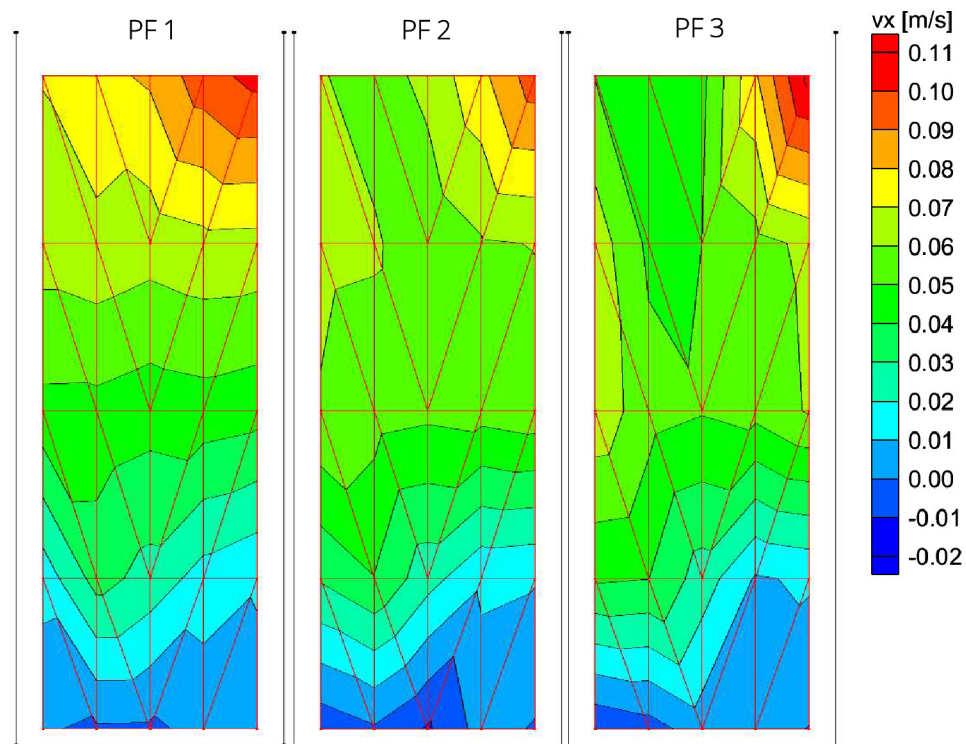
Tab. 15: Časově průměrné bodové rychlosti po výšce profilu

	PF 1	PF 2	PF 3
$z$	$V_{xb}$	$V_{xb}$	$V_{xb}$
[m]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
0,05	0,00062	-0,0036	-0,001
0,5	0,01858	0,02114	0,02402
1	0,04482	0,05414	0,05618
1,5	0,06502	0,0583	0,0558
2	0,08096	0,0695	0,06452

Tab. 16: Časově průměrné bodové průměrné rychlosti po šířce profilu

	PF 1	PF 2	PF 3
$y$	$V_{xh}$	$V_{xh}$	$V_{xh}$
[m]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
0,05	0,03816	0,0404	0,04246
0,15	0,04384	0,04108	0,03546
0,25	0,04192	0,03546	0,03512
0,35	0,04276	0,04048	0,0382
0,45	0,04332	0,04208	0,04828

Výstupem z programu SMS 12.3 firmy AQUAVEO bylo zobrazení rychlostních polí (Obrázek 57).



Obrázek 57: Grafické zobrazení rychlostí v jednotlivých profilech

## 6.2 Trať č. 2 – šířka od 0,02 m po 0,05 m

Prvním měřením v menším žlabu, což je označeno jako měření č. 6, je měření na trati šířky 0,02 m, pro kterou platí charakteristiky zobrazené v Tab. 17 a výsledky měření v Tab. 18.

Tab. 17: Základní rozměry tratě v měření č. 6

$b_l$	$b_b$	$b_c$	$P$
[m]	[m]	[m]	[m]
0	0,020213	0,020213	0,1995

Tab. 18: Naměřené hodnoty v měření č. 6

$h_1$	$T$	$V_0$	$V_t$	$t$	$V_{pr}$	$t_{pr}$
[m]	[°C]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[s]	[m <sup>3</sup> ]	[s]
0,06071	14,4	123	123	226,5	0	-
0,07081	14,4	123	123	234,9	0	-
0,08031	14,4	125	125	242	0	-
0,09108	14,4	124	124	242,38	0	-
0,10051	14,4	125	125	231,16	0	-
0,11043	14,4	126	126	260,13	0	-
0,12142	14,4	126	127	249,12	0	-
0,13086	14,4	127	128	228,34	0	-

0,14105	14,4	128	128	273,34	0	-
0,15052	14,4	129	129	249,57	0	-

Pro šířku trati 0,02 m byl taktéž vyhotoven záznam o průběhu hladiny (Tab. 19), podobně jako u trati č. 1.

Tab. 19: Hodnoty úrovně hladiny pro vzdálenost  $x$  od koruny přelivu

$x$	$h_1$	$T$
[m]	[m]	[°C]
-0,45	0,15029	15,1
-0,4	0,1493	15,1
-0,35	0,1494	15,1
-0,3	0,14841	15,1
-0,25	0,14799	15,1
-0,23	0,1476	15,1
-0,21	0,14677	15,1
-0,19	0,14581	15,1
-0,17	0,14509	15,1
-0,15	0,1439	15,1
-0,14	0,14342	15,1
-0,13	0,14304	15,1
-0,12	0,14252	15,1
-0,11	0,14167	15,1
-0,1	0,14095	15,1
-0,09	0,13992	15,1
-0,08	0,13908	15,1
-0,07	0,13824	15,1
-0,06	0,13698	15,1
-0,05	0,13552	15,1
-0,04	0,13391	15,1
-0,03	0,13177	15,1
-0,02	0,12985	15,1
-0,01	0,12791	15,1
0	0,12541	15,1
0,01	0,12261	15,1
0,02	0,11959	15,1
0,03	0,1162	15,1
0,04	0,11266	15,1
0,05	0,109	15,1
0,06	0,10388	15,1

Druhým měřením v menším žlabu, s označením měření č. 7, bylo měření na trati šířky 0,03 m, pro kterou platí charakteristiky zobrazené v Tab. 20 a výsledky měření v Tab. 21.

Tab. 20: Základní rozměry tratě v měření č. 7

$b_l$	$b_b$	$b_c$	$P$
[m]	[m]	[m]	[m]
0	0,030436	0,030436	0,2

Tab. 21: Naměřené hodnoty v druhém měření č. 7

$h_1$	$T$	$V_0$	$V_t$	$t$	$V_{pr}$	$t_{pr}$
[m]	[°C]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[s]	[m <sup>3</sup> ]	[s]
0,06006	15,8	133	133	234,97	0	-
0,06985	15,8	133	134	222,13	0	-
0,08035	15,8	134	134	212,5	0	-
0,09055	15,8	135	135	237,38	0	-
0,10027	15,8	136	136	219,53	0	-
0,10937	15,8	138	139	233,56	0	-
0,11958	15,8	139	140	236,13	0	-
0,12958	15,8	140	141	255,56	0	-
0,14104	15,8	142	143	228,56	0	-
0,1506	15,8	143	144	266,25	0	-

Posledním měřením na menším žlabu, označeným měření č. 8, bylo měření na trati šířky 0,05 m, pro kterou platí charakteristiky zobrazené v Tab. 22 a výsledky měření v Tab. 23.

Tab. 22: Základní rozměry tratě v měření č. 8

$b_l$	$b_b$	$b_c$	$P$
[m]	[m]	[m]	[m]
0	0,050096	0,050096	0,2

Tab. 23: Naměřené hodnoty v měření č. 8

$h_1$	$T$	$V_0$	$V_t$	$t$	$V_{pr}$	$t_{pr}$
[m]	[°C]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[s]	[m <sup>3</sup> ]	[s]
0,0596	17,1	151	151	266,88	0	-
0,07069	17,1	153	154	281,66	0	-
0,08024	17,1	154	155	258	0	-
0,09043	17,1	157	158	251,62	0	-
0,10074	17,1	164	165	332,75	0	-
0,11077	17,1	162	163	330,88	0	-
0,11287	17,1	167	168	346,28	0	-

### 6.3 Vyhodnocení průtoků

Přepadový průtok  $Q$  v daném měření je dán rozdílem průtoků stanoveného indukčním průtokoměrem a průtoku od průsaku, viz kap. 4.3. Pro výpočet průtoků z průsaku  $Q_{pr}$  je použit vztah (4.3.3), stejný vztah je použit pro výpočet  $Q_{ind}$ . Pro výpočet skutečného průtoků  $Q_x$  jsou využity rovnice z kap. 7. Výsledky měření jsou v Tab. 24, Tab. 25 a Tab. 26. Celkový objem, ze kterého je následně vypočítán průtok, je rozdíl dílčích objemů  $V_t$  a  $V_0$ .

Tab. 24: Průtoky pro první tři měření

Měření č. 1			Měření č. 2			Měření č. 3		
$Q_{ind}$	$Q_{pr}$	$Q_1$	$Q_{ind}$	$Q_{pr}$	$Q_2$	$Q_{ind}$	$Q_{pr}$	$Q_3$
[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]
0,01204	0,00006	0,01198	0,01253	0,00021	0,01232	0,01370	0,00021	0,01349
0,01491	0,00005	0,01485	0,01606	0,00022	0,01584	0,01719	0,00021	0,01698
0,01913	0,00005	0,01908	0,02025	0,00023	0,02002	0,01989	0,00022	0,01967
0,02318	0,00005	0,02313	0,02329	0,00023	0,02305	0,02409	0,00022	0,02387
0,02471	0,00005	0,02465	0,02745	0,00024	0,02721	0,02829	0,00023	0,02806
0,02873	0,00005	0,02867	0,03165	0,00024	0,03140	0,03839	0,00024	0,03815
0,02984	0,00005	0,02978	0,03656	0,00025	0,03632	0,04279	0,00024	0,04255
0,03418	0,00005	0,03413	0,04098	0,00025	0,04073	0,04862	0,00025	0,04837
0,03844	0,00005	0,03839	0,04645	0,00025	0,04619	0,05335	0,00025	0,05310
0,04222	0,00005	0,04217	0,05086	0,00026	0,05060			
0,04591	0,00005	0,04586						

Tab. 25: Průtoky pro čtvrté až šesté měření

Měření č. 4			Měření č. 5			Měření č. 6		
$Q_{ind}$	$Q_{pr}$	$Q_4$	$Q_{ind}$	$Q_{pr}$	$Q_5$	$Q_{ind}$	$Q_{pr}$	$Q_6$
[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]
0,01374	0,00006	0,01368	0,01396	0,00004	0,01392	0,00058		0,00058
0,01680	0,00006	0,01674	0,01397	0,00005	0,01392	0,00072		0,00072
0,02146	0,00006	0,02140	0,01815	0,00005	0,01810	0,00087		0,00087
0,02460	0,00006	0,02454	0,02217	0,00005	0,02212	0,00104		0,00104
0,02952	0,00006	0,02946	0,02609	0,00005	0,02604	0,00121		0,00121
0,03510	0,00006	0,03504	0,03057	0,00005	0,03052	0,00139		0,00139
0,03911	0,00006	0,03905	0,03497	0,00005	0,03492	0,00160		0,00160
0,04338	0,00006	0,04332	0,04025	0,00005	0,04021	0,00180		0,00180
0,04909	0,00006	0,04902	0,04524	0,00005	0,04520	0,00202		0,00202
0,05371	0,00006	0,05365	0,05075	0,00005	0,05070	0,00222		0,00222
			0,05593	0,00005	0,05588			

Tab. 26: Průtoky pro sedmé až osmé měření

Měření č. 7			Měření č. 8		
$Q_{ind}$	$Q_{pr}$	$Q_7$	$Q_{ind}$	$Q_{pr}$	$Q_8$
[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]
0,000843		0,000843	0,00137		0,00137
0,001057		0,001057	0,00177		0,00177
0,001304		0,001304	0,00215		0,00215
0,001560		0,001560	0,00258		0,00258
0,001822		0,001822	0,00304		0,00304
0,002084		0,002084	0,00351		0,00351
0,002389		0,002389	0,00361		0,00361
0,002692		0,002692			
0,003059		0,003059			
0,003377		0,003377			

## 7 Analýza výsledků měření

V následujících tabulkách jsou použity tyto veličiny (absolutně a relativně vyjádřené):

- $u_{Zi}$  - nejistota i-tého zdroje [m], [%];
- $u_{Ai}$  - standartní nejistota typu A i-té sestavy měření [m], [%];
- $u_{Bi}$  - standartní nejistota typu B i-té sestavy měření [m], [%];
- $u_{Ci}$  - kombinovaná nejistota i-té sestavy měření [m], [%];
- $U$  - rozšířená nejistota sestavy měření [m], [%];
- $U_{kal\ 200}$  - rozšířená nejistota průtokoměru pro DN200 [m<sup>3</sup>/s], [%];
- $U_{kal\ 32}$  - rozšířená nejistota průtokoměru pro DN32 [m<sup>3</sup>/s], [%];
- $U_{(Cd)i}$  - rozšířená nejistota přepadového součinitele pro i-té měření, [%].

### 7.1 Nejistoty měření

Pro následné výsledky se vztahují nejistoty z měření digitálním hrotovým měřidlem, nejistoty z opakovaného měření a nejistota z měření úrovně hladiny. Pro výpočet jsou zvoleny vztahy (4.4.1), (4.4.2), (4.4.2), (4.4.7) a (4.4.8). Pro výpočet nejistoty zdroje je použito rovnoměrného rozdělení.

#### 7.1.1 Standartní nejistoty typu B pro měření úrovně hladin

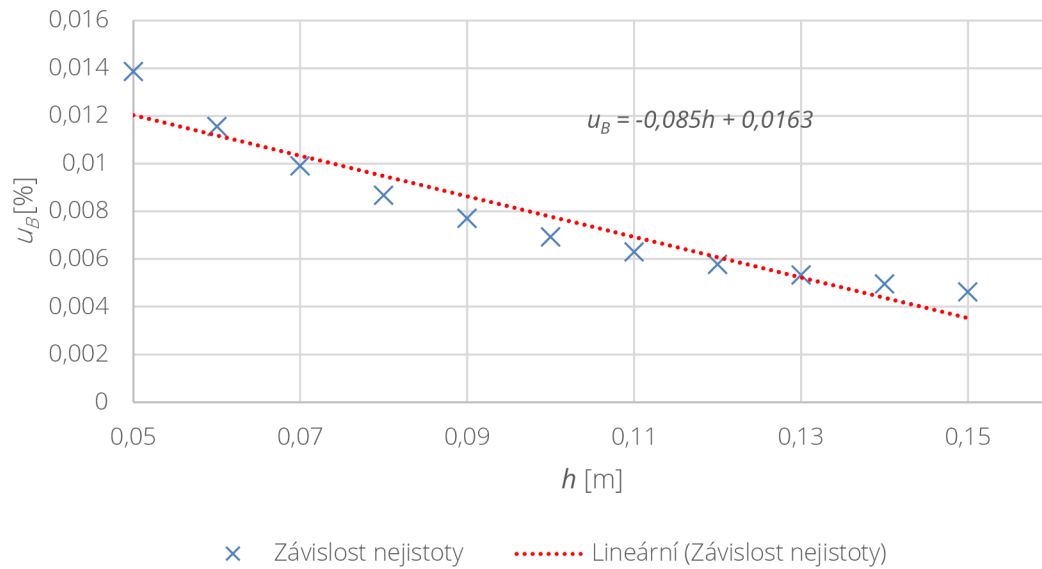
Pro výpočet nejistoty z použitých zařízení pro měření hladiny (posuvné měřidlo), byla zjištěna chyba daného měřidla, která činí 0,00001 m [13], pro pravoúhlé pravděpodobnostní rozdělení platí

$$u_{zhoub} = \frac{0,00001}{\sqrt{3}} = 0,0000069 \text{ [m]}. \quad (7.1.1)$$

Aby bylo možné určit standartní nejistotu v měření přepadové výšky vyjádřenou relativně v procentech, bylo nutné rozptyl hodnot vztáhnout k přepadové výšce a výsledný poměr přepočítat na

procenta. Tuto závislost poté vynést do grafu (Graf 1) a pomocí regresních funkcí stanovit závislost. Dostatečně výstižné korelace bylo dosaženo použitím lineární funkce

$$u_{Bhloub} = -0,085h + 0,0163 \text{ [%]}. \quad (7.1.2)$$



Graf 1: Závislost nejistoty zdroje posuvného měřidla na h

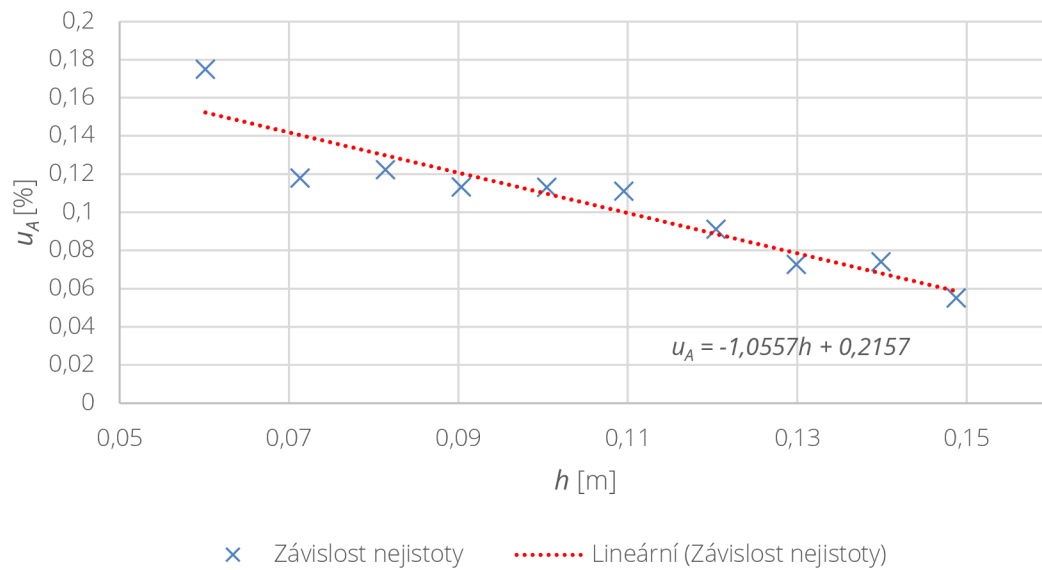
### 7.1.2 Nejistota ze srovnávací roviny

Před začátkem měření byla změřena nula vodočtu na osmi místech koruny přelivu. Koeficient závislý na počtu měření má hodnotu  $k_s = 1,2$  [10]. Z těchto hodnot byla následně určena standardní nejistota typu A

$$u_{AS,R} = 0,01172 \text{ [%]}. \quad (7.1.3)$$



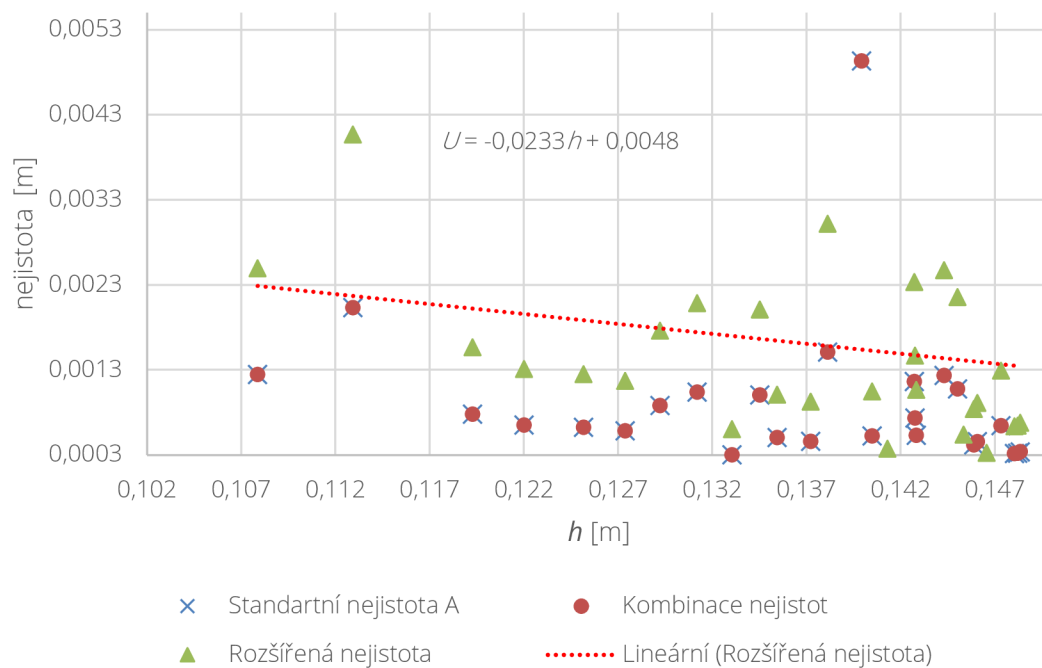
## 7.1.3 Nejistoty pro měření úrovně hladiny



Graf 2: Standardní nejistoty typu A pro jednotlivé výšky měrné trati č. 1

Z naměřených hodnot pro jednotlivé výšky, kdy každá výška sestává z min. deseti hodnot, je vypočtena standardní nejistota typu A dané výšky. V (Graf 2) je použito k výpočtu vztahů (4.4.1) a (4.4.2). Vynesená lineární regrese zobrazuje malou změnu nejistoty po výšce. Výsledná standardní nejistota vyjádřená v procentech je tedy funkcí výšky

$$u_{A1} = -1,0557h + 0,2157 \text{ [%]}. \quad (7.1.4)$$



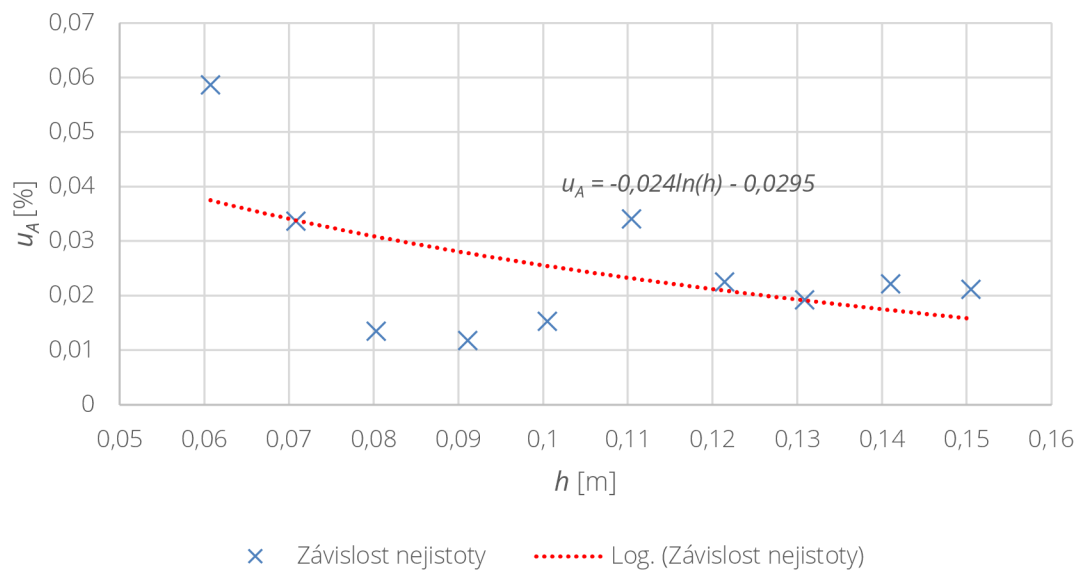
Graf 3: Standardní nejistoty typu A s výslednou rozšířenou nejistotou pro průběh hladiny v měrné trati č. 1 - měření průběhu hladin č. 1 a č. 5

Jelikož měření průběhu hladiny je prováděno odlišným způsobem jako měření výšek hladin v závislosti na průtoku, jsou taktéž použity odlišné parametry pro výpočet nejistot. Zejména je jiný počet měření, kdy každý bod je měřen pouze čtyřikrát.

Z důvodu malého počtu měření je výsledné rozložení nejistot značně nekompaktní. Výsledkem je funkce (Graf 3), kdy koeficient rozšíření  $k = 2$  [10]. Tato výsledná rozšířená nejistota se vztahuje taktéž na měrnou trať č. 1, měření č. 5

$$U_{\text{hladina}} = -0,0233h + 0,0048 \text{ [m]}. \quad (7.1.5)$$

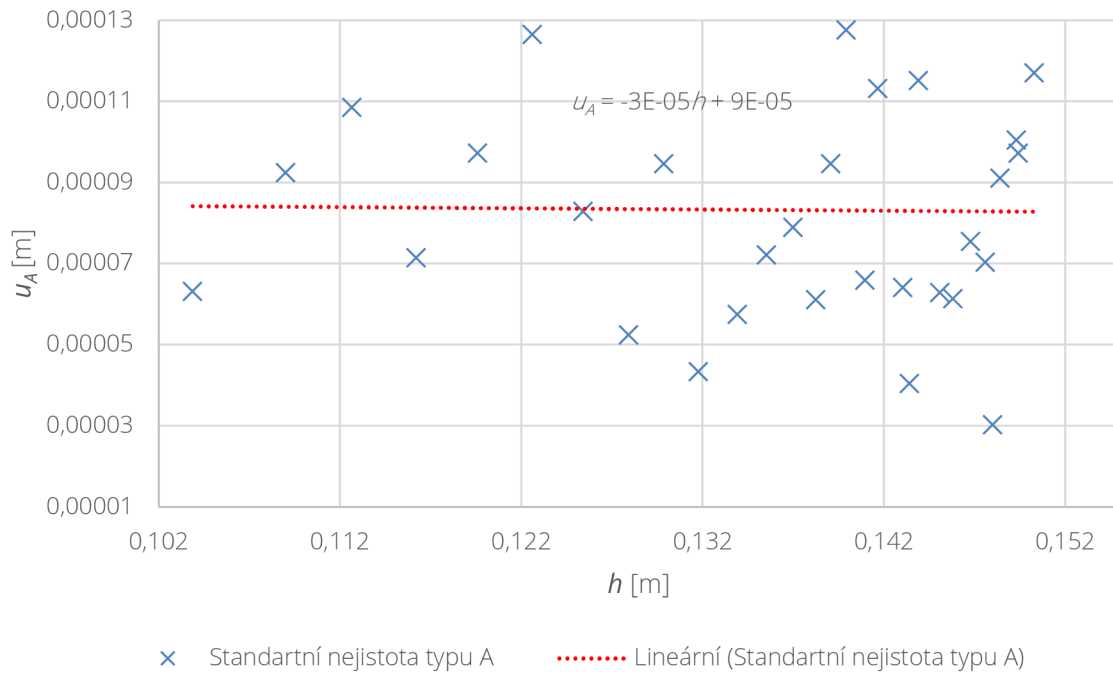
Výpočet standartních nejistot typu A pro měrnou trať č. 2 je stejný jako pro měrnou trať č. 1. Avšak s rozdílnými hodnotami nejistot pro jednotlivé šířky. Počet měření  $n > 10$ .



Graf 4: Standardní nejistoty typu A pro jednotlivé výšky měrné trati č. 2, šířky 0,02 m

V (Graf 4) je použito k výpočtu vztahů (4.4.1) a (4.4.2). Vynesená lineární regrese zobrazuje velmi malou změnu nejistoty po výšce. Výsledná standardní nejistota je tedy proložena logaritmickou funkcí, kdy je výslednou rovnicí vyjádřena v procentech

$$u_{A0,02} = -0,024 \ln(h) - 0,0295 \text{ [%]}. \quad (7.1.5A)$$



Graf 5: Standartní nejistoty typu A pro průběh hladiny měrné trati č. 2 šířky 0,02 m

V (Graf 5) je použito k výpočtu vztahů (4.4.1) a (4.4.2). Vynesená lineární regrese zobrazuje malou změnu nejistoty po výšce. Výsledná standartní nejistota je tedy průměrem jednotlivých nejistot:

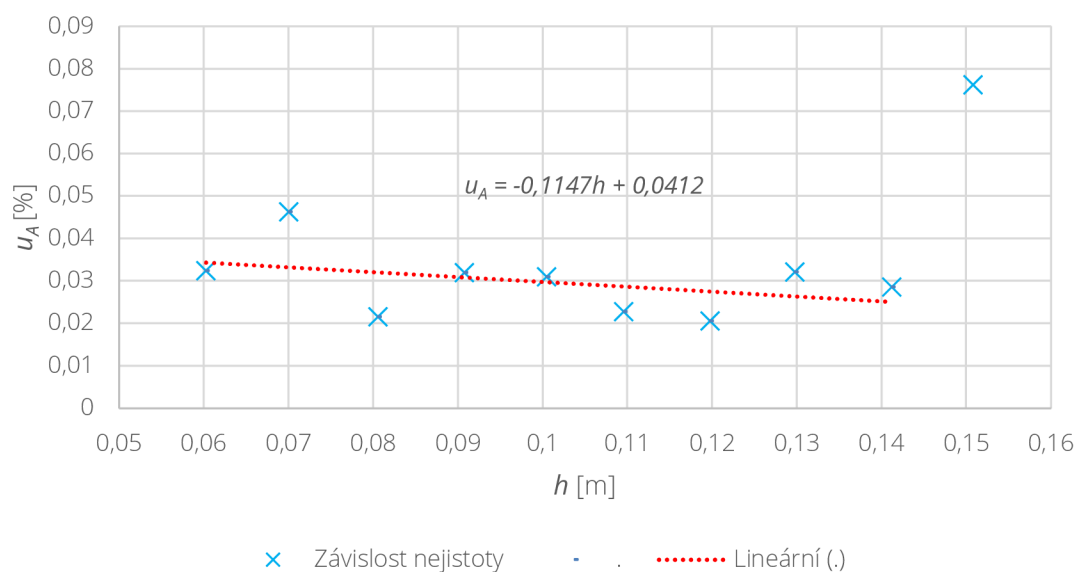
$$u_{A2} = 0,000064 \text{ [m]}. \quad (7.1.6)$$

Kombinací nejistot dle (4.4.8) vzniká kombinovaná standartní nejistota:

$$u_{C2} = 0,0000644 \text{ [m]}. \quad (7.1.7)$$

Pro úplné pokrytí nejistoty je zaveden parametr rozšířené nejistoty  $U$  viz (4.4.9), pro výpočet je zvolen koeficient rozšíření  $k = 2$  [10].

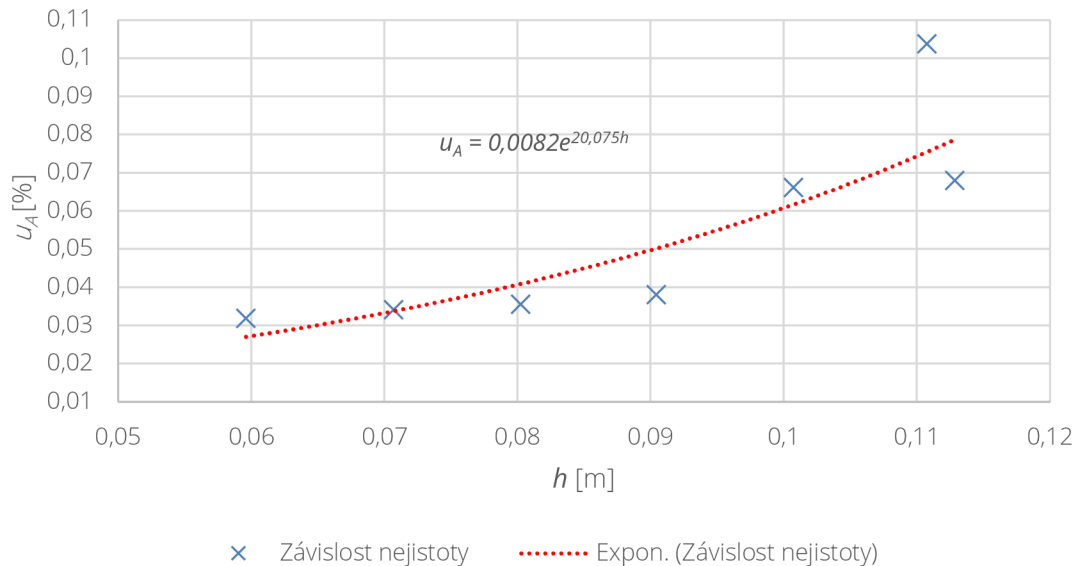
$$U_{\text{hladina2}} = 0,00013 \text{ [m]}. \quad (7.1.8)$$



Graf 6: Standartní nejistoty typu A pro jednotlivé výšky měrné trati č. 2 šířky 0,03 m

Z (Graf 6) je patrné, že poslední měření je zatíženo značnou nejistotou. Celková nejistota je tedy vypočtena pouze z prvních devíti hodnot. Největší hodnoty koeficientu korelace je dosaženo použitím lineární aproximační funkce závislosti na  $h$

$$u_{A0,03} = -0,1147h + 0,0412 \text{ [%]}. \quad (7.1.9)$$



Graf 7: Standardní nejistoty typu A pro jednotlivé výšky měrné trati č. 2 šířky 0,05 m

Z (Graf 7) je patrný narůstající trend velikosti standardní nejistoty. Hodnotu standardní nejistoty pro jednotlivé úrovně hladin je tedy nutné vyjádřit pomocí regresní funkce. Nejvyšší hodnotu korelačního koeficientu dosahuje exponenciální funkce

$$u_{A0,05} = 2 \times 10^{-6} e^{31,816h} \text{ [%]}. \quad (7.1.10)$$

#### 7.1.4 Nejistota z měření šířky

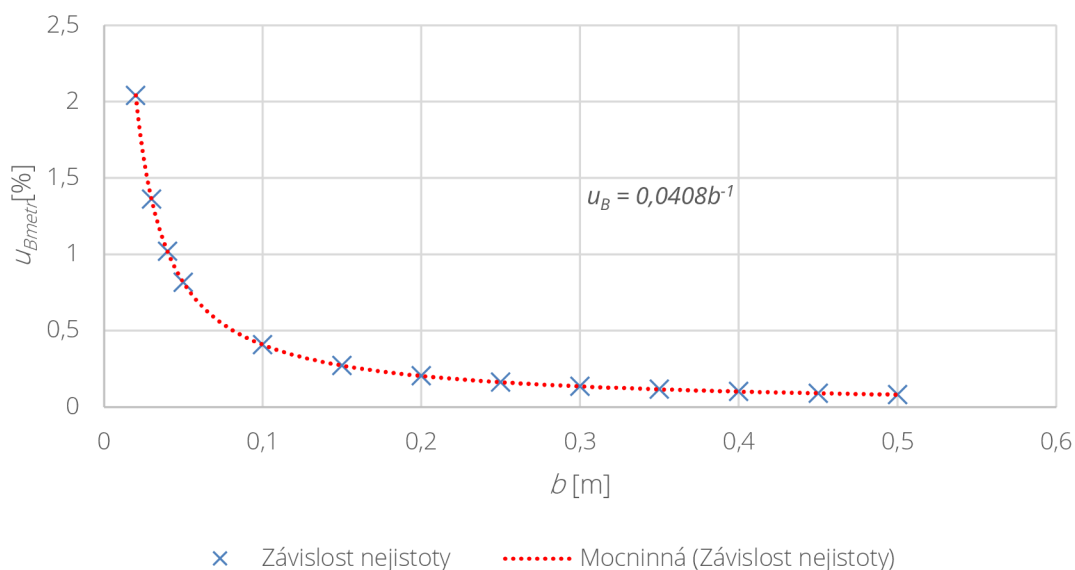
Stejně jako v případě měření úrovně hladiny je i toto měření zatíženo standardní nejistotou typu A a B. Standardní nejistota typu B vychází z nejistoty určené přesností ocelového pásového metru. Nejistota v případě měření ocelovým pásovým metrem je dána: rozlišitelností, chybou nastavení nuly a nejistotou měření (dle etalonu) [14]. Výpočet nejistoty je následující:

1. Rozlišitelnost: 0,0005 m,  $u_{z1} = \frac{0,0005}{\sqrt{3}} = 0,00029$  m;
2. chyba nastavení nuly: 0,001 m,  $u_{z1} = \frac{0,001}{\sqrt{3}} = 0,00058$  m.

Výsledná standardní nejistota typu B pro měření ocelovým pásovým metrem je

$$u_{bsvin} = \sqrt{0,00029^2 + 0,00058^2} = 0,000408 \text{ m}.$$

Stejně jako v případě posuvného měřidla je i zde třeba vyjádřit procentuální závislost nejistoty na šířce (Graf 8).



Graf 8: Závislost standardní nejistoty typu B ocelového pásového metru na šířce

Vyjádření aproximační křivky je

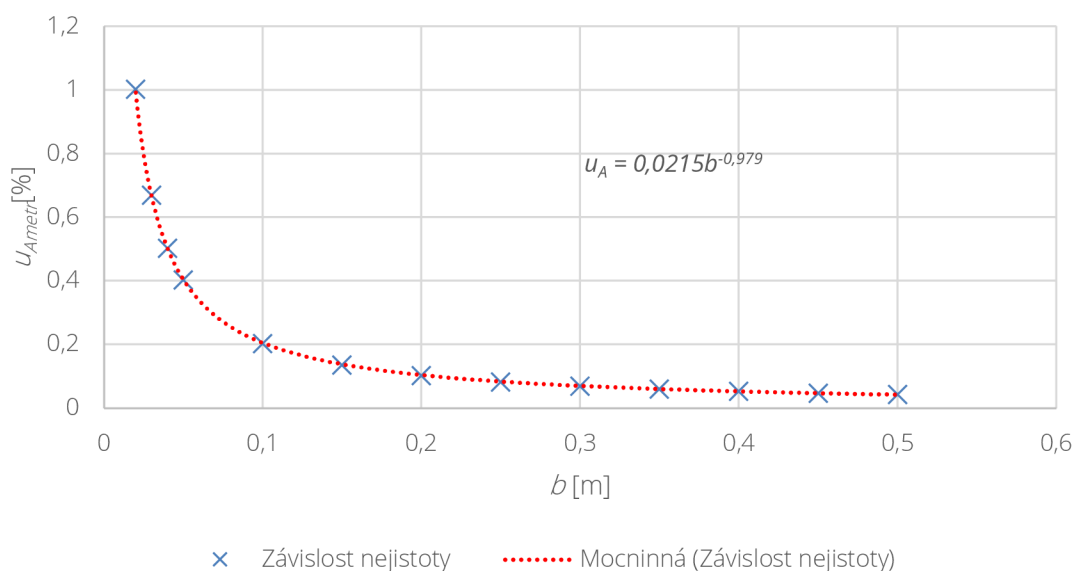
$$u_{Bmetr} = 0,0408b^{-1} \text{ [%]}. \quad (7.1.11)$$

Vzhledem ke značné nejistotě při menších šířkách je pro šířky  $b \leq 0,05$  m použito digitálního posuvného měřidla, kde je nejistota vyjádřena vztahem (7.1.1), viz kap.7.1.1.

Pro standardní nejistotu z měření typu A pro ocelový pásový metr se použije vztah z kalibračního listu

$$u_{Ametr} = \frac{0,2 + 0,03b}{1000} \text{ [m]}. \quad (7.1.12)$$

Na základě (7.1.7) se vynese závislost této nejistoty na šířce (Graf 9).



Graf 9: Závislost standardní nejistoty typu A pro ocelový pásový metr na šířce

Zvolená aproximační funkce má tvar

$$u_{\text{Ametr}} = 0,0215b^{-0,979} [\%]. \quad (7.1.13)$$

### 7.1.5 Nejistoty průtoku

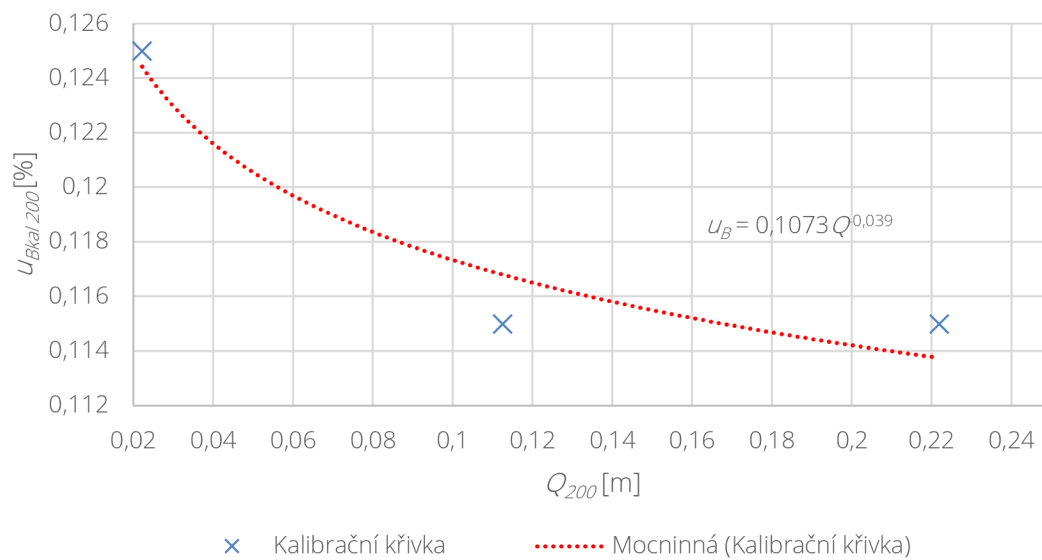
Nejistoty průtoku se nachází především ve zdrojích. Hlavním zdrojem nejistot je indukční průtokoměr. Každý průtokoměr disponuje kalibrační křivkou. Pro ELA SMQI 99 [18] je kalibrační křivka zobrazena na (Graf 10), pro Sima FC3 na (Graf 11). Pro oba průtokoměry je rozšířená nejistota funkcí průtoku. Nejistoty z průtoku jsou standardní nejistoty typu b.

Kalibrační funkce pro DN200 je

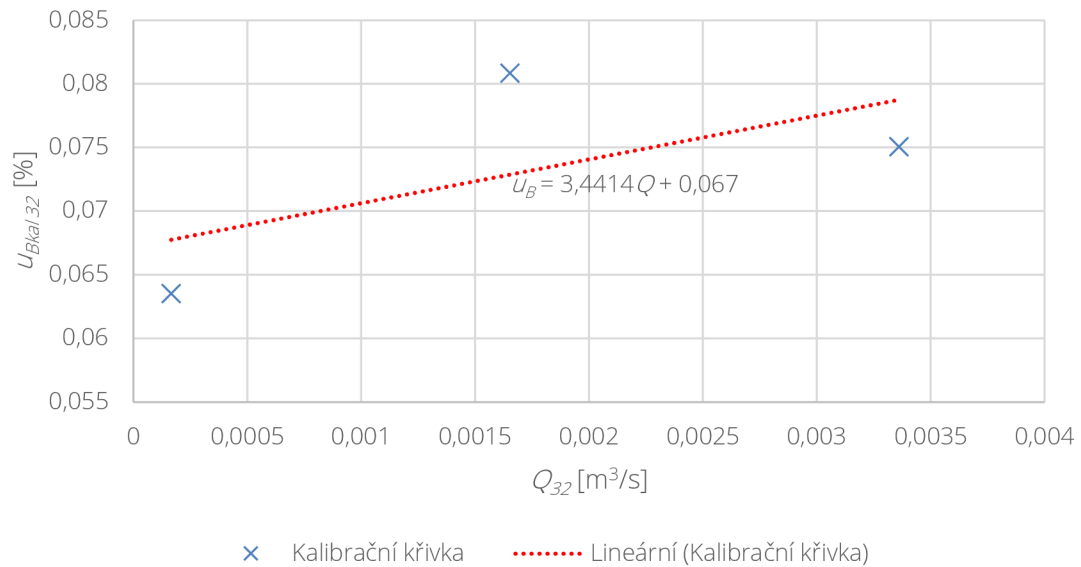
$$u_{\text{Bkal } 200} = 0,1073Q^{0,039} [\%]. \quad (7.1.14)$$

Kalibrační funkce pro DN32 je

$$u_{\text{Bkal } 32} = 3,4414Q + 0,067 [\%]. \quad (7.1.15)$$



Graf 10: Kalibrační křivka pro ELA SMQI 99



Graf 11: Kalibrační křivka pro Sima FC3

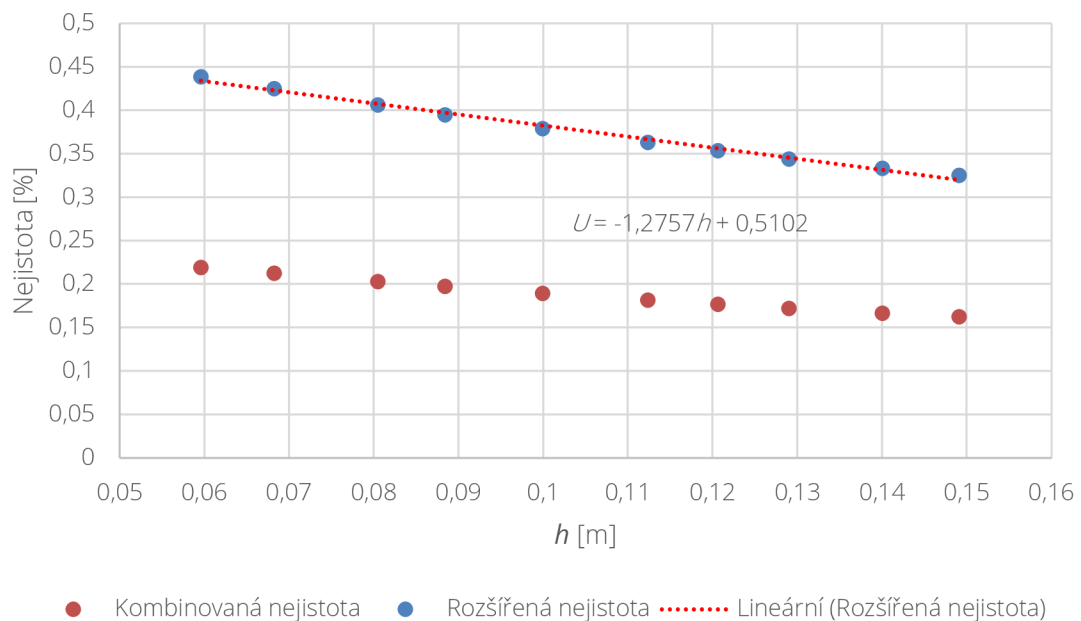
### 7.1.6 Nejistota součinitele přepadu

Každý součinitel je ovlivněn sérií nejistot, které jsou vlastní pro jednotlivé měrné tratě. Každá měrná trať má stanovenou kombinaci nejistot v závislosti na výšce a šířce. K určení je použit vztah (4.4.13). Pro výpočet rozšířené nejistoty je použito koeficientu rozšíření  $k = 2$  [10].

Kombinací nejistot pro přepadový součinitel a násobením koeficientem rozšíření vychází z měření č. 4 aproximační funkce ve tvaru:

$$U_{(Cd)4} = -1,2757h + 0,5102 \text{ [%]}. \quad (7.1.16)$$

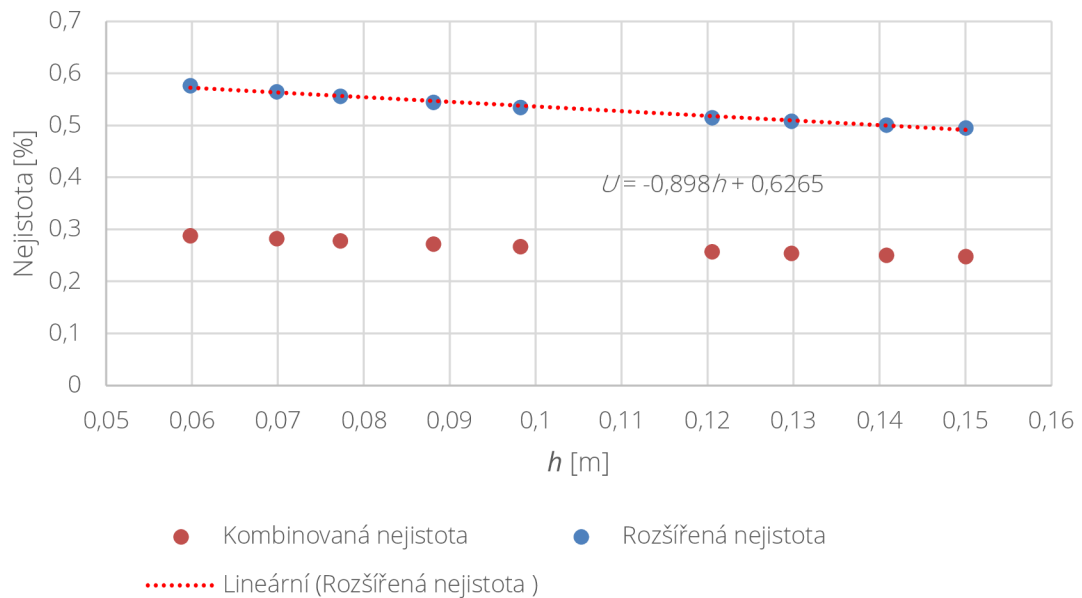
Graf závislosti nejistot pro součinitele přepadu se zobrazenou aproximační křivkou je na Graf 12.

Graf 12: Nejistota  $C_d$  pro trať č. 1, měření č. 4

Kombinací nejistot pro přepadový součinitel a násobením koeficientem rozšíření vychází z měření č. 3 regresní funkce ve tvaru:

$$U_{(Cd)3} = -0,898h + 0,6265 \text{ [%]}. \quad (7.1.17)$$

Graf závislosti nejistot pro součinitele přepadu se zobrazenou aproximační křivkou je na Graf 13.



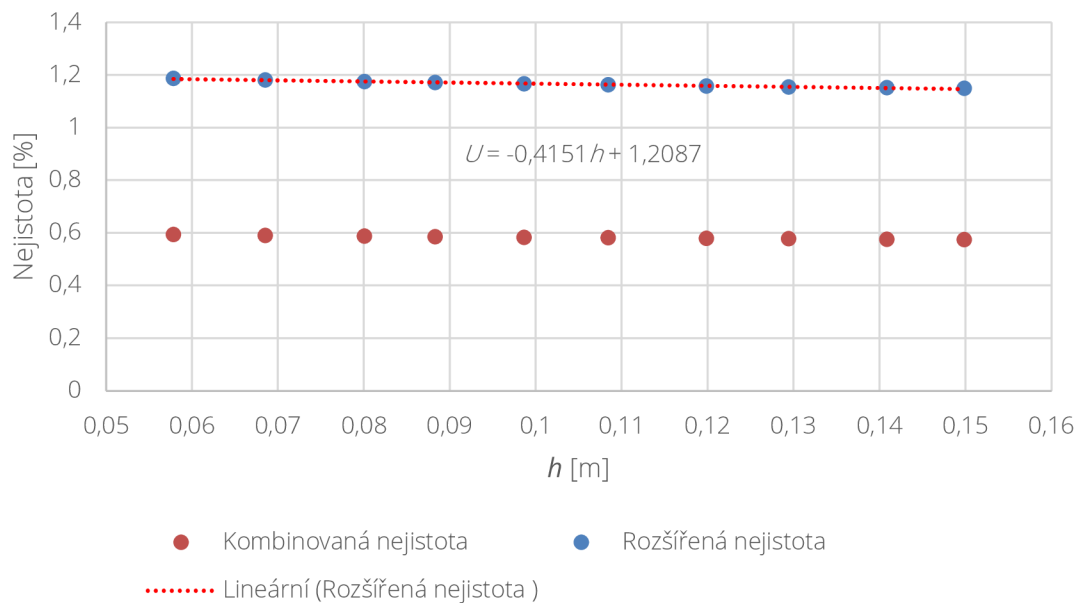
Graf 13: Nejistota Cd pro trať č. 1, měření 3

Kombinací nejistot pro přepadový součinitel a násobením koeficientem rozšíření vychází z měření č. 2 regresní funkce ve tvaru:

$$U_{(Cd)2} = -0,4151x + 1,2087 \text{ [%]}. \quad (7.1.18)$$

Graf závislosti nejistot pro součinitele přepadu se zobrazenou aproximační křivkou je na Graf 14.

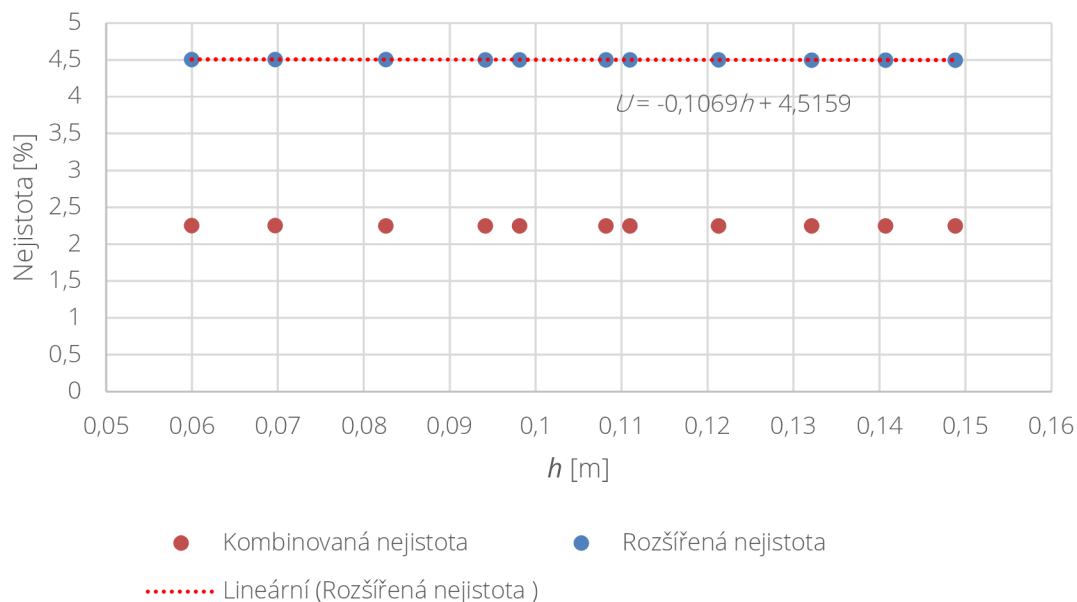


Graf 14: Nejistota  $C_d$  pro trať č. 1, měření č. 2

Kombinací nejistot pro přepadový součinitel a násobením koeficientem rozšíření vychází z měření č. 1 regresní funkce ve tvaru:

$$U_{(Cd)_6} = -0,1069h + 4,5159 \text{ [%]}. \quad (7.1.19)$$

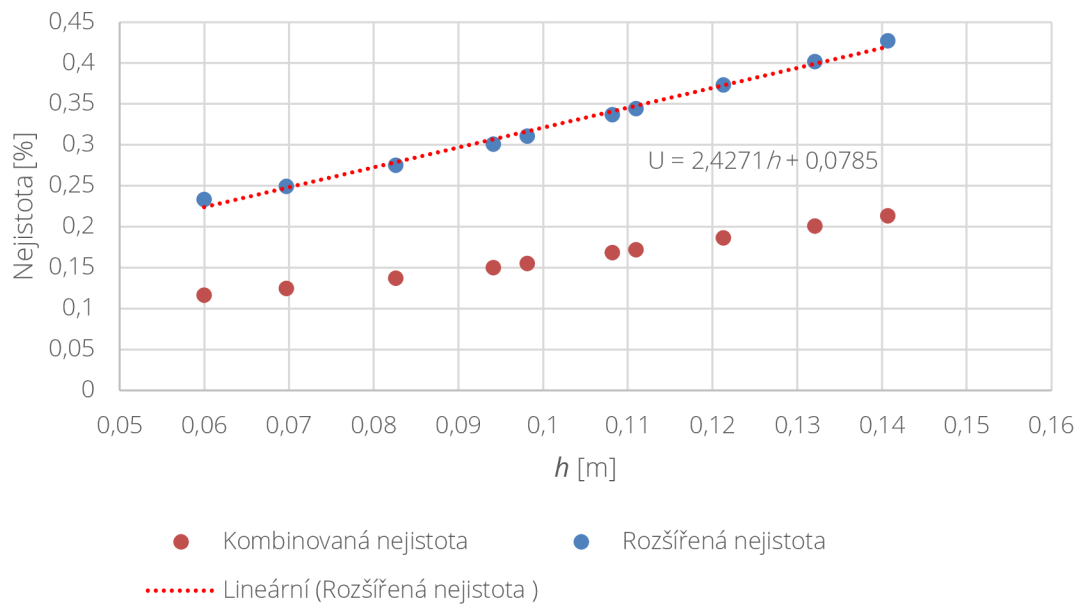
Graf závislosti nejistot pro součinitele přepadu se zobrazenou aproximační křivkou je na Graf 15.

Graf 15: Nejistota  $C_d$  pro trať č. 1, měření č. 1

Kombinací nejistot pro přepadový součinitel a násobením koeficientem rozšíření vychází z měření č. 6 regresní funkce ve tvaru:

$$U_{(Cd)_1} = 2,4271h + 0,0785 \text{ [%]}. \quad (7.1.20)$$

Graf závislosti nejistot pro součinitele přepadu se zobrazenou aproximační křivkou je na Graf 16.

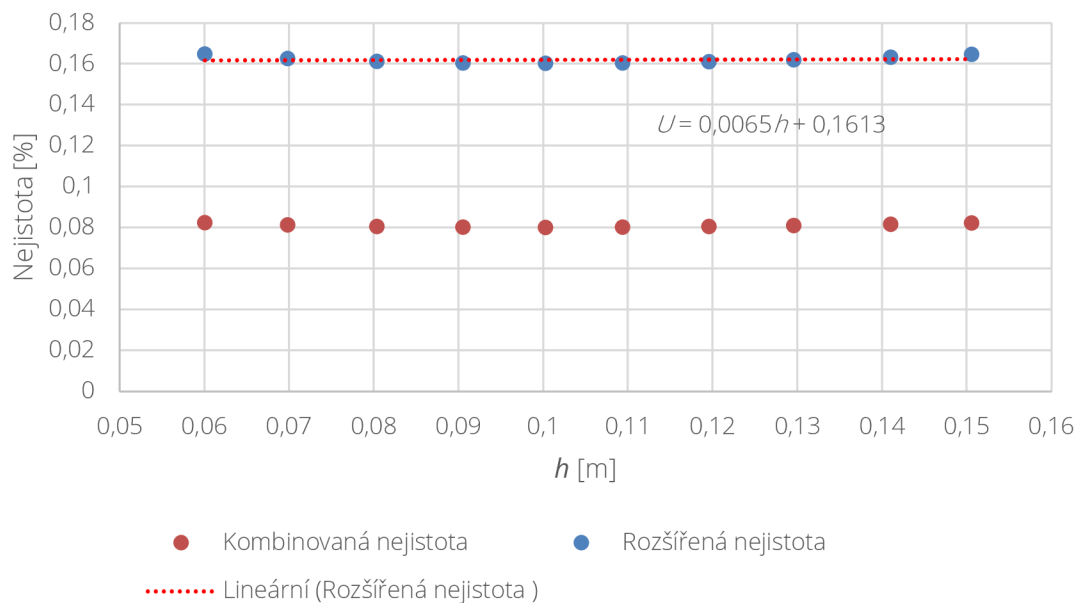


Graf 16: Nejistota  $C_d$  pro trať č. 2, měření č. 6

Kombinací nejistot pro přepadový součinitel a násobením koeficientem rozšíření vychází z měření č. 7 regresní funkce ve tvaru:

$$U_{(Cd)7} = 0,0065h + 0,1613 \text{ [%]}. \quad (7.1.21)$$

Graf závislosti nejistot pro součinitele přepadu se zobrazenou aproximační křivkou je na Graf 17.

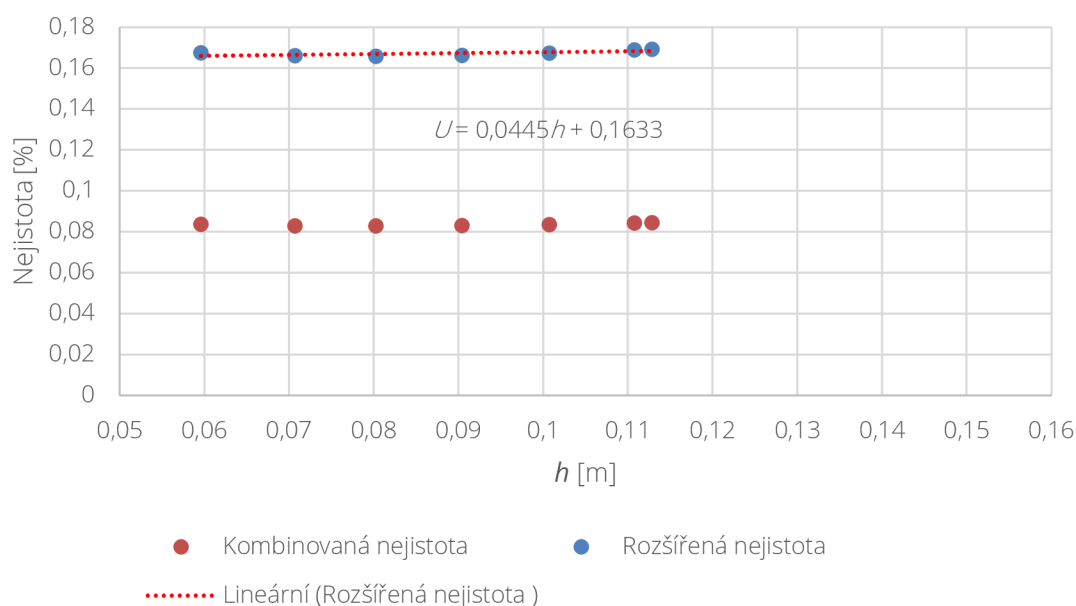


Graf 17: Nejistota  $C_d$  pro trať č. 2, měření č. 7

Kombinací nejistot pro přepadový součinitel a násobením koeficientem rozšíření vychází z měření č. 8 regresní funkce ve tvaru:

$$U_{(Cd)8} = 0,0445h + 0,1633 \text{ [%]}. \quad (7.1.22)$$

Graf závislosti nejistot pro součinitele přepadu se zobrazenou aproximační křivkou je na Graf 18.



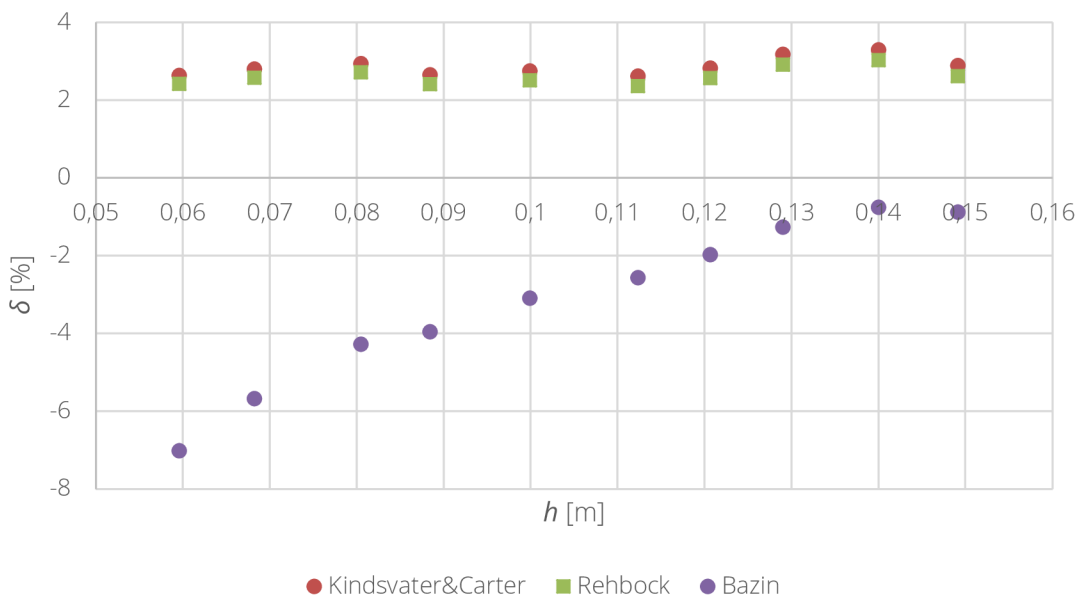
Graf 18: Nejistota  $C_d$  pro trať č. 2, měření č. 8

## 7.2 Součinitelé přepadu

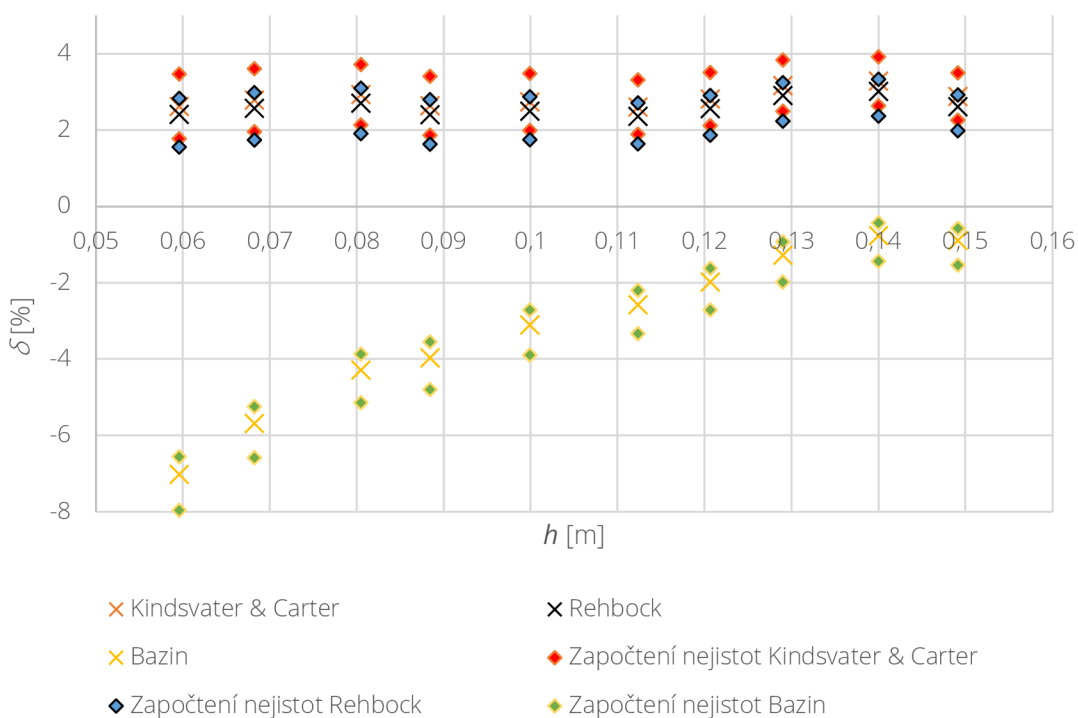
### 7.2.1 Komparace přístupů k výpočtu součinitele přepadu

Každý z autorů uvedených v kap. 3 používá ke konečnému výpočtu průtoku přes přeliv jiného postupu. Je tedy vhodné porovnat přesnost dané metody s výsledky naměřených hodnot a na základě porovnání mezi vypočtenými a změřenými hodnotami určit vhodný postup analýzy vlivu šířky na součinitele přepadu. Pro porovnání je využito vztahů (3.1.3), (3.1.1) a (3.1.7). U vztahu (3.1.3) je výpočet  $C_d$  proveden na základě postupu převzatého z ČSN ISO 1438 [6] (tzn. Kindsvater a Carter + Rehbock). Pro výpočet dle Bazina je pro součinitele využit vztah (3.1.2). Předpokladem je, že vztah (3.6) při použití výpočtu  $C_d$  dle Kindsvatera a Cartera bude nejvíce konvenovat k naměřeným datům. Pokud bude předpoklad naplněn, bude možné míru ovlivnění součinitele přepadu stanovit přímo ze vztahu (3.1.3). Pro porovnání průtoků je zvoleno měření č. 4, u kterého je předpoklad malého ovlivnění hydraulickými charakteristikami a měření č. 7, které zastupuje měrný žlab č. 2. Pro porovnání slouží relativní chyba  $\delta$  vůči naměřeným hodnotám.

$$\delta = \frac{Q_{\text{naměřené}} - Q_i}{Q_{\text{naměřené}}} \times 100 [\%]. \quad (7.2.1)$$



Graf 19: Relativní chyba vypočtených průtoků vůči průtokům z měření č. 4

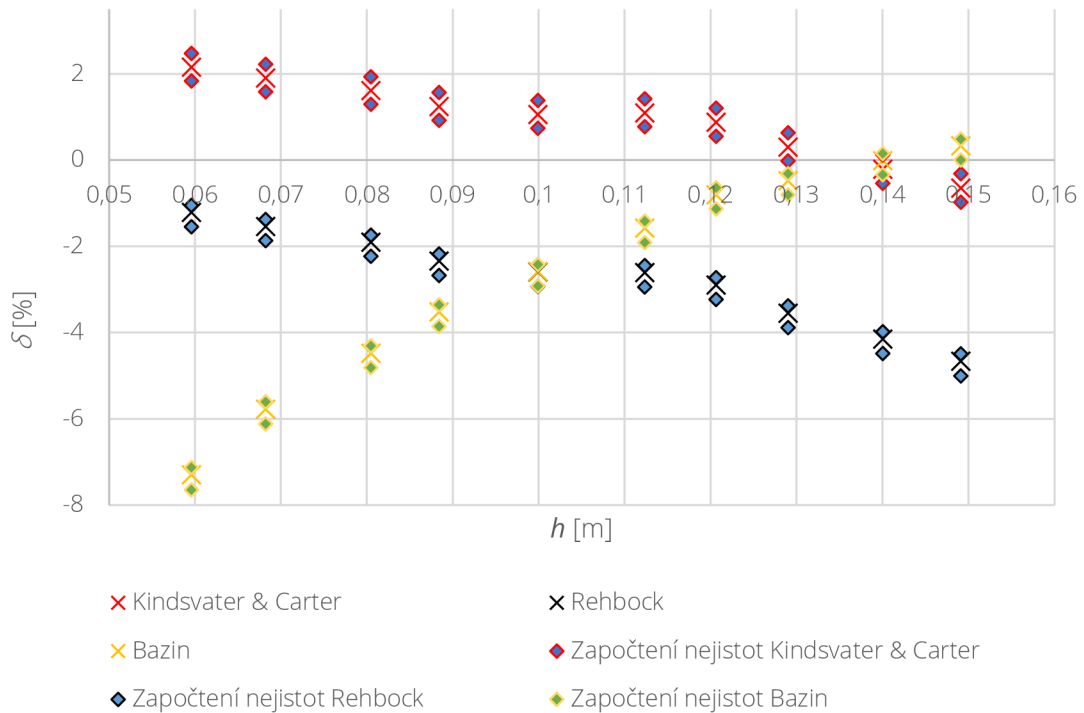


Graf 20: Relativní chyba vypočtených průtoků vůči průtokům z měření č. 4 se započítáním nejistoty

Jak je patrné z Graf 19 a Graf 20, relativní chyba mezi naměřenými hodnotami a hodnotami vypočtenými v měrné trati č. 1 je větší, než je nejistota stanovení jednotlivých dat. U Kindsvatera a Cartera i Rehbocka nemůže být chyba způsobena nesprávným výpočtem, jelikož všechny podmínky opravňující k použití tohoto vztahu byly splněny. U Bazina nebyla u některých hodnot ( $h < 0,1$  m) splněna podmínka pro výšku přepadového paprsku, značný rozdíl patrný z grafu je tedy způsoben nesprávným použitím vztahu. Měření na trati č. 2 zahrnuje značnou systematickou chybu, jejíž původ není zcela znám a není ji tedy možné vyčíslit.

Na základě zjištěných informací o velikosti relativních rozdílů není možné vliv šířky odvodit dosazením ze vztahu (3.1.3). Pro správné odvození hodnot opravných koeficientů bude nutné pomocí iterace dojít k požadovaným hodnotám.

Jiná je situace u měrné trati č. 2, kde relativní rozdíl mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami není tak značný, jako je u měření pro trat č. 1. Jako vzorové měření slouží měření č. 7.



Graf 21: Relativní chyba vypočtených průtoků vůči průtokům z měření č. 7 se započítáním nejistoty

U měření č. 7 je dokonce možné pozorovat konvergenci hodnot vypočítaných na základě vztahu (3.1.3) k hodnotám změřeným (Graf 21).

## 7.2.2 Míra ovlivnění přepadového součinitele

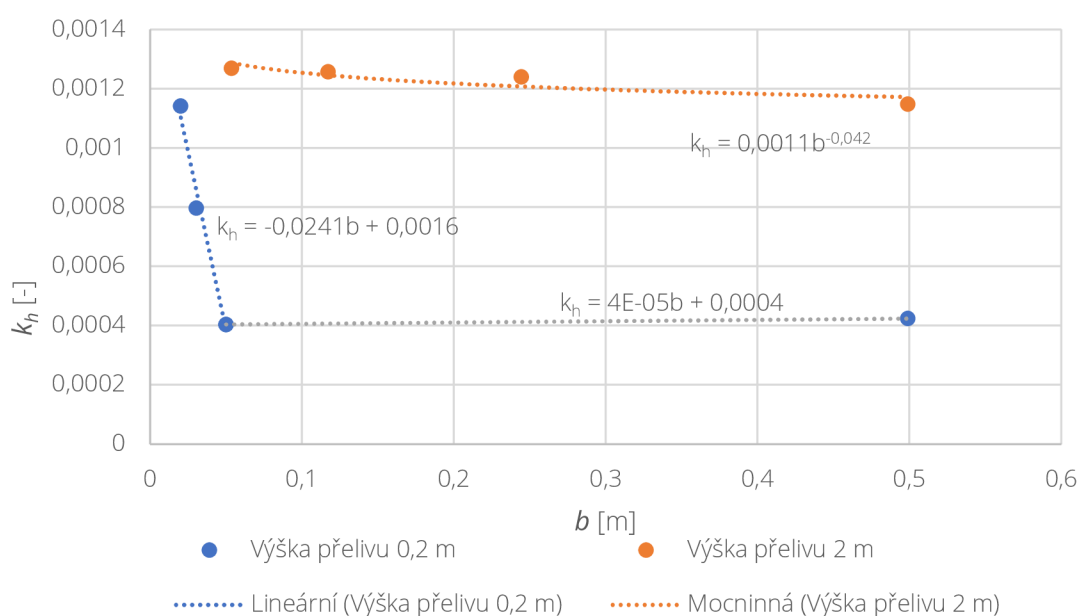
Jako identifikátor míry ovlivnění slouží koeficient  $k_b$ . Tento koeficient slouží ve vztahu (3.1.3) jako nástroj k potlačení vlivů způsobených vlastností kapaliny, viz kap.3. Jeho zavedení je tedy vhodným způsobem, jak stanovit míru ovlivnění součinitele přepadu v závislosti na šířce.

Nejdříve je však nutné očistit měřené hodnoty od vlivu vlastností kapaliny na výšku přepadového paprsku. K tomu slouží koeficient  $k_h$  (vztah 3.1.3), nalezením optimální hodnoty tohoto koeficientu se docílí přesnějšího určení koeficientu  $k_b$ .  $k_h$  je funkcí relativní výšky  $h/P$ , k jeho stanovení je třeba pro každé měření vynést závislost  $C_d$  na  $h/P$ . Pomocí iterační změny hodnoty  $k_h$  je pak docíleno co největší korelace dat proložených lineární regresní křivkou (předpokládá se, že na míru korelace nemá vliv koeficient  $k_b$ ). K iteraci byla použita gradientní metoda. Koeficient determinace by měl být vyšší než 0,95.

V následující tabulce (Tab. 27) jsou zobrazeny hodnoty opravného koeficientu. Hodnoty koeficientu mají pro každé měření jinou velikost. Závislost koeficientu na šířce je možné vidět v Graf 22.

Tab. 27: Vypočtené hodnoty opravných koeficientů  $k_h$ 

ID měření	$b$	$P$	$k_h$
[-]	[m]		[-]
6	0,020213	0,1995	0,001142
7	0,030436	0,2	0,000797
8	0,050096	0,2	0,000404
5	0,499	0,2	0,000424
1	0,053679	1,98	0,001269
2	0,117263	1,98	0,001257
3	0,24457	1,98	0,00124
4	0,499	1,98	0,001147

Graf 22: Závislost koeficientu  $k_h$  na šířce

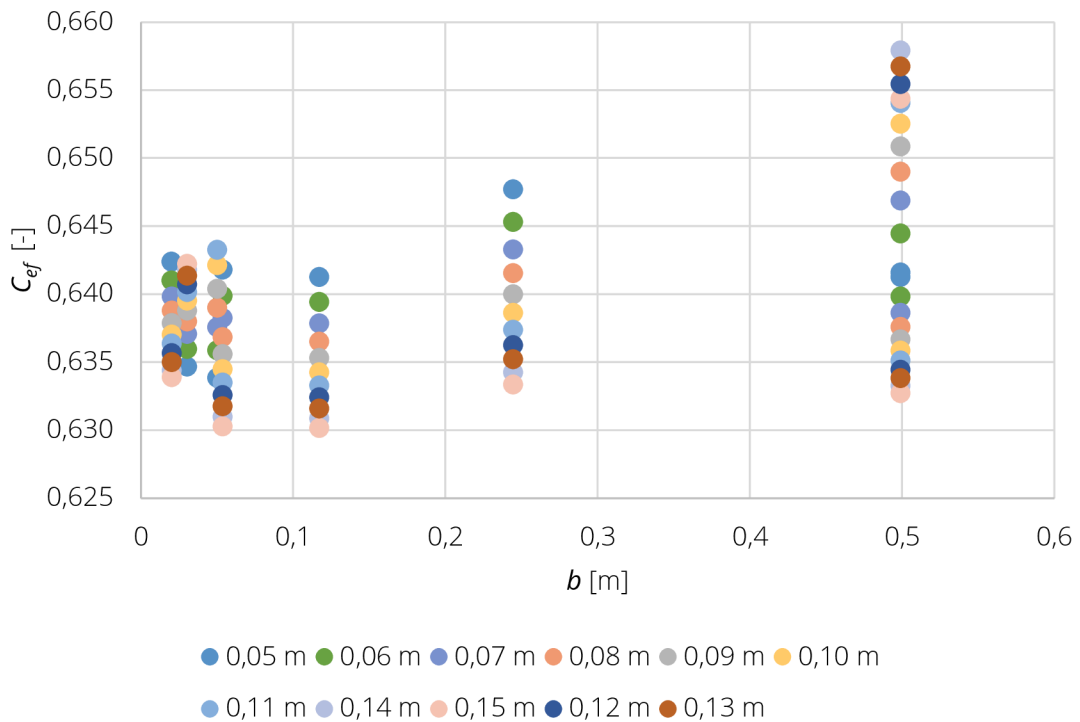
Zjištěné velikosti opravného koeficientu  $k_h$ , jsou následně použity při stanovení opravného koeficientu  $k_b$ . Pro výpočet  $k_h$  platí následující vztahy [m]:

$$k_{h0,2} = -0,0241b + 0,0016, \quad (7.2.2)$$

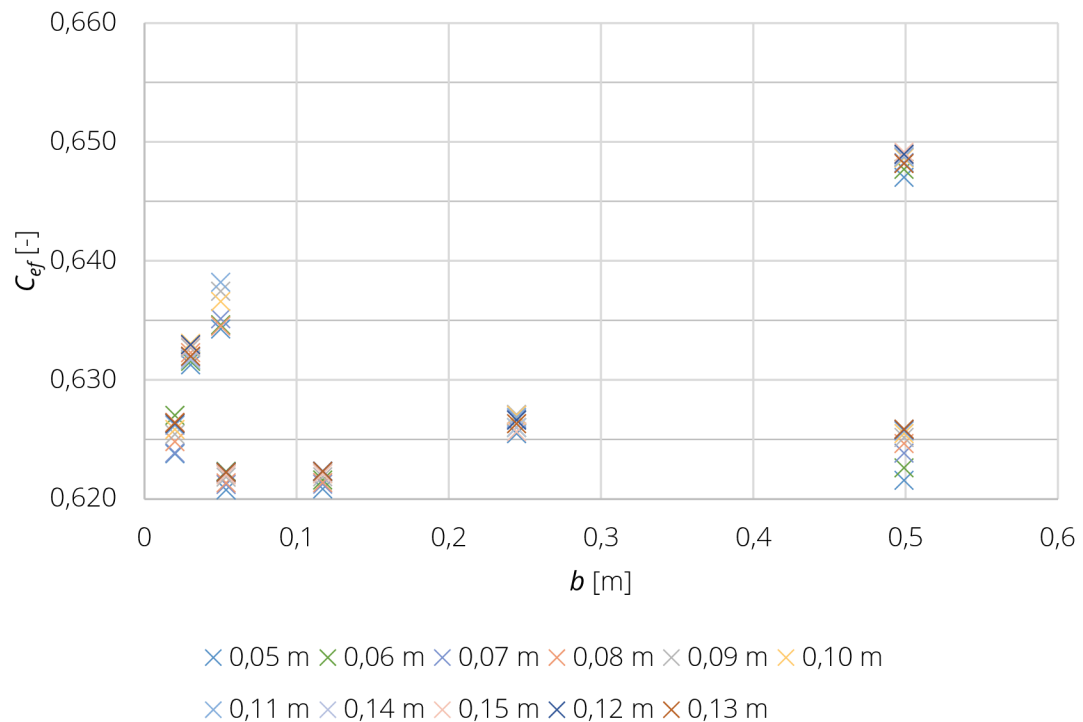
$$k_{h0,2} = 4E-05b + 0,0004, \quad (7.2.2A)$$

$$k_{h2,0} = 0,0011b^{-0,042}, \quad (7.2.3)$$

(7.2.2) platí když  $b < 0,05$  m a  $P = 0,2$  m, (7.2.2A) platí když  $b > 0,05$  m a  $P = 0,2$  m a (7.2.3) platí pro  $b > 0,05$  m a  $P = 2,0$  m.



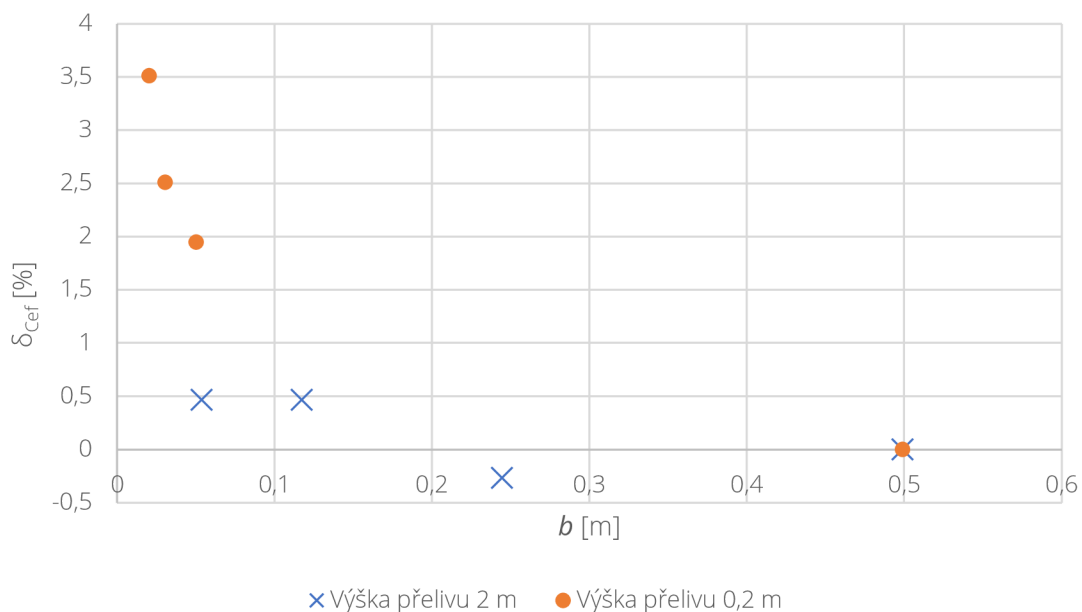
Graf 23: Závislost  $C_{ef}$  na šířce bez použití koeficientu  $k_h$  a  $k_b$  (koeficienty mají nulové hodnoty)



Graf 24: Závislost  $C_{ef}$  na šířce se započteným koeficientem  $k_h$

Poté co je potlačena korelace přepadového součinitele na  $h/P$  (Graf 23 a Graf 24) je možné stanovit relativní rozdíl mezi ovlivněným a neovlivněným součinitelem přepadu (Graf 25). Za nejméně ovlivněné měření se považuje měření č. 4, kde výška a šířka přelivu jsou dostatečně velké k potlačení vlivu  $Re$  a

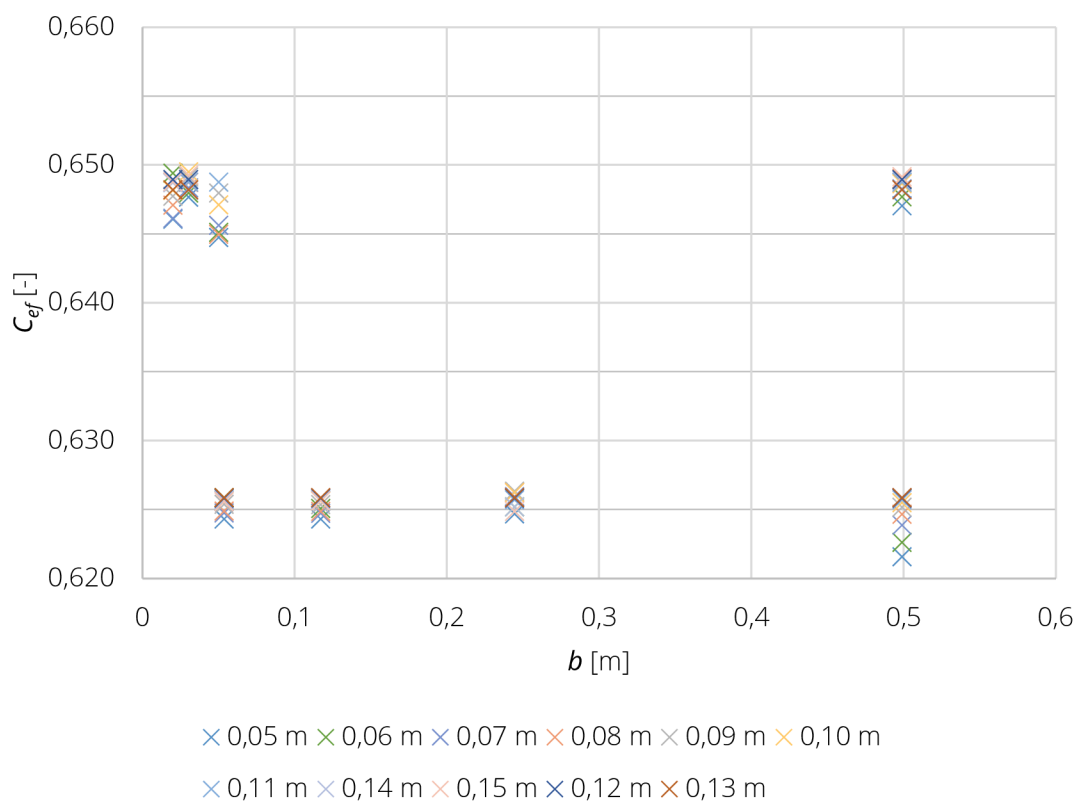
**We.** Stejně jako v případě  $k_n$ , je i  $k_b$  ovlivněno poměrem  $h/P$ , je tedy nutné stanovit míru ovlivnění pro výšku přelivné konstrukce 0,2 m a 2 m zvlášť. K výpočtu je použito upraveného vztahu (7.2.1).



Graf 25: Míra ovlivnění přepadového součinitele v závislosti na šířce

Ze známé míry ovlivnění součinitele přepadu je možné opět postupnou iterační změnou hodnoty  $k_b$  dosáhnout přiblížení hodnoty efektivního přepadového součinitele koeficientu  $k$  k hodnotám  $C_{ef}$  pro neovlivněné měření (bod  $b = 0,5$  m). Hledání velikosti  $k_b$  je podstatné i pro následné porovnání s dosazením do vztahu (3.1.3).





Graf 26: Vyrovnání hodnot efektivního přepadového součinitele použitím koeficientu  $k_b$

Tab. 28: Vypočtené koeficienty  $k_b$  pro danou výšku  $P$  a šířku  $b$

ID	$P$	$b$	$k_b$
[-]	[m]	[m]	[m]
1	1,98	0,0537	-0,00244
2	1,98	0,1173	-0,00261
3	1,98	0,2446	0,00062
4	1,98	0,4990	
5	0,20	0,4990	
6	0,20	0,0202	-0,00070
7	0,20	0,0305	-0,00077
8	0,20	0,0501	-0,00081

Na základě provedených iterací, byly nalezeny hodnoty jednotlivých součinitelů pro dané  $b$  a  $P$  (Tab. 28). Hodnoty byly zvoleny tak, aby korelace hodnot  $C_{ef}$  pro body měření č. 1, 2 a 3 byly co největší s bodem měření č. 4 a body měření č. 6, 7 a 8 s bodem č. 5 (Graf 26). Jak bylo zmíněno na začátku kapitoly, nyní je možné porovnat hodnoty koeficientů vypočtených iteračně, hodnot koeficientů získaných dosazením do vztahu (3.1.3) a hodnot koeficientů získaných z normy viz Obr. 4.

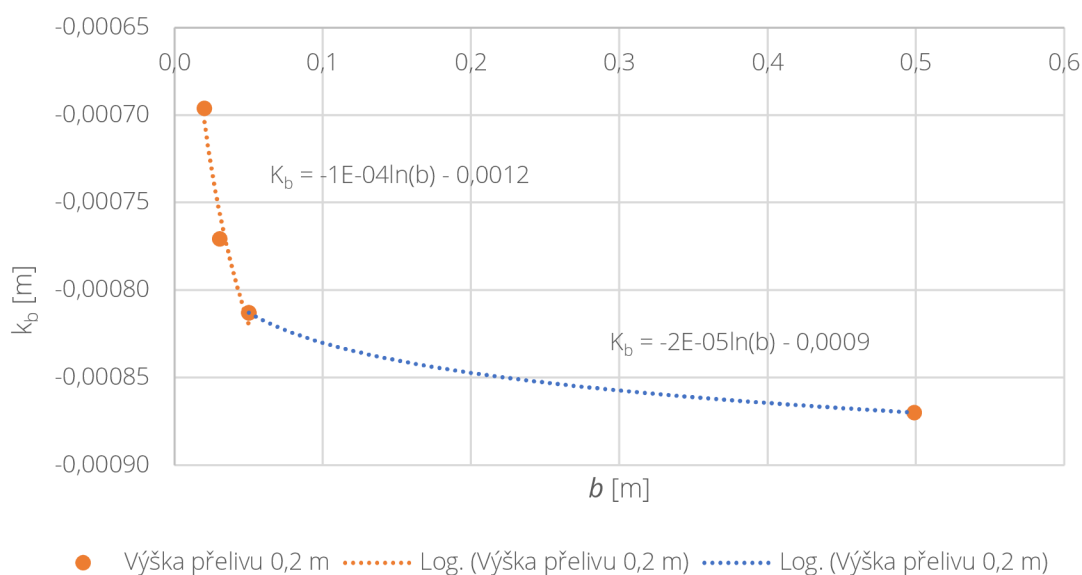
Tab. 29: Porovnání velikostí koeficientů vypočtených různými způsoby

měření č.	$P$	$b$	$k_b$ iterační	$k_b$ dosazení	$k_b$ ČSN
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1	1,98	0,05368	0,00244	0,01162	0,00240
2	1,98	0,11726	0,00261	0,01384	0,00240
3	1,98	0,24457	-0,00062	0,01210	0,00311
4	1,98	0,49900	-0,00082	0,01337	-0,00090
5	0,20	0,49900	-0,00087	-0,00254	-0,00090
6	0,20	0,02023	-0,00070	-0,00062	-0,00090
7	0,20	0,03047	-0,00077	-0,00085	-0,00090
8	0,20	0,05010	-0,00081	-0,00093	-0,00090

V (Graf 27) je zobrazen vliv šířky  $b$  na velikosti součinitele  $k_b$ . Tento graf platí pouze pro hodnoty  $b < 0,5$  m s tím, že i toto je rozděleno na dvě části, a to  $b < 0,05$  m (7.2.4) a  $b > 0,05$  m (7.2.5). Pro každou část se vztahuje jiná rovnice pro výpočet součinitele  $k_b$ :

$$k_{b,0,5} = -0,0001 \ln(b) - 0,0012, \quad (7.2.4)$$

$$k_{b,0,5} = -0,00002 \ln(b) - 0,0009. \quad (7.2.5)$$

Graf 27: Součinitel hydraulického vlivu  $k_b$  na šířku v závislosti na  $b$ 

K vyjasnění, proč v Tab. 29 dochází k rozdílným hodnotám součinitelů vypočtených iterací a součinitelů vypočtených pomocí vztahů z normy je třeba analyzovat určení hodnot z Obr. 4. U výpočtu  $k_b$  pro žlab s vloženými přepážkami není možné jednoznačně určit rovnici závislosti na  $b/B$  a  $b$ . Je velmi pravděpodobné, že poměr  $b/B$  není možné určit pouze poměrem šířky žlabu k šířce pole, dochází velmi pravděpodobně k vzájemnému ovlivnění jednotlivých polí. V tomto má vliv charakteristika proudění před přepážkou a tvar přepážky, vzniká boční kontrakce a je třeba použít rovnice:

$$b_0 = b - 0,0012 n_z \xi h_0, \quad (7.2.6)$$

kde  $n_z$  je počet zúžení,  $\xi$  je součinitel kontrakce = 1,  $h_0$  je rychlostní výška jenž je vyjádřena:

$$h_0 = h + \frac{\alpha v_0^2}{2g}, \quad (7.2.7)$$

kde  $v_0$  je přítoková rychlost a  $\alpha$  je Coriolisovo číslo. Coriolisovo číslo se spočte:

$$\alpha = \frac{\int_S u_r^3 dS}{v^3 S}, \quad (7.2.8)$$

kde  $u_r$  je bodová rychlost a  $v$  je průřezová rychlost.

Při použití rovnice (7.2.8) a vstupních dat z Tab. 15 a Tab. 16 vychází hodnota Coriolisova čísla v profilu PF3 měrného žlabu č.2  $\alpha = 2,07857$ . Tato hodnota je následně dosazena do rovnice (7.2.7).

Výpočet rovnic (7.2.6), (7.2.7) a (7.2.8) je proveden v Tab. 30, výpočet  $v$  je podstatný pro určení k jakému poměru se vztahují hodnoty součinitele  $k_b$  stanovené v normě ČSN [6]. V Tab. 31 je porovnání přístupů pro stanovení hodnoty  $k_b$  dle ČSN [6] s následným porovnáním hodnot vypočtených.

Tab. 30: Výpočet účinné šířky na základě boční kontrakce od přepážek

měření	počet zúžení	$B$	$v_0$	$b_c$	$\alpha$	$h_0$	$b_0$	$b_0/B$
[-]	[-]	[m]	[m·s <sup>-1</sup> ]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]
1	7	0,4990	0,0118	0,4294	2,0786	0,0600	0,3874	0,7764
2	3	0,4990	0,0122	0,4691	2,0786	0,0579	0,4517	0,9052
3	1	0,4990	0,0133	0,4891	2,0786	0,0598	0,4832	0,9682
4	0	0,4990	0,0134	0,4990		0,0596	0,4990	1,0000
5	0	0,4990	0,1069	0,4990		0,0610	0,4990	1,0000
6	0	0,0202	0,1095	0,0202		0,0620	0,0202	1,0000
7	0	0,0305	0,1065	0,0305		0,0613	0,0304	1,0000
8	0	0,0477	0,1054	0,0477		0,0608	0,0501	1,0000

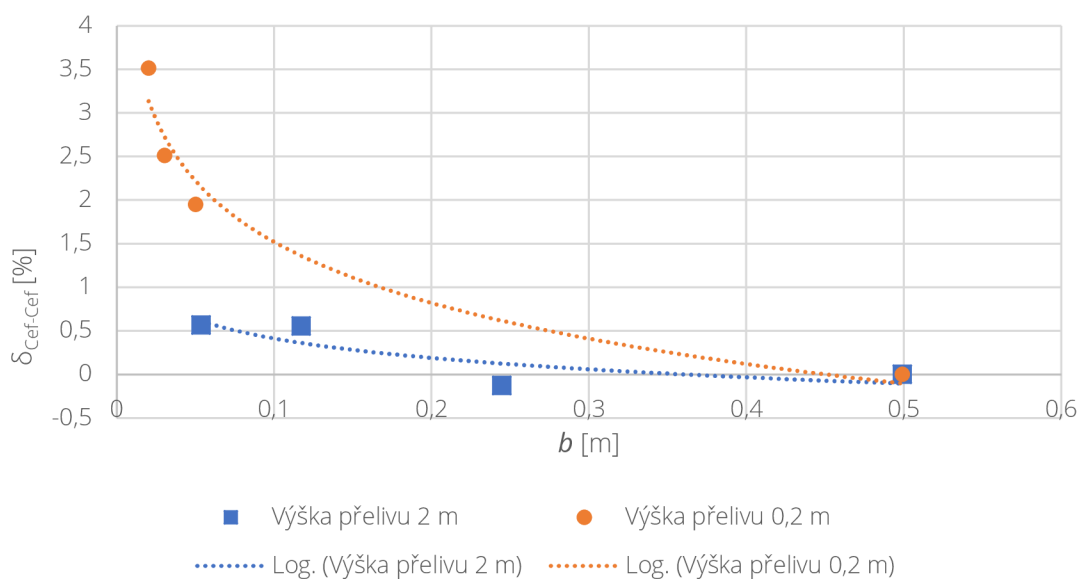
Tab. 31: Rozdílný přístup k výpočtu poměru  $b/B$  a následného určení  $k_b$

ID	$P$	$b$	$k_b$ iterační	$b_0/B$	$k_b$ ČSN	$b/B$	$k_b$ ČSN
[-]	[m]	[m]	[m]	[-]	[m]	[-]	[m]
1	1,98	0,05368	0,00244	0,7764	0,00480	0,1076	0,0024
2	1,98	0,11726	0,00261	0,9052	0,00152	0,2350	0,0024
3	1,98	0,24457	-0,00062	0,9682	-0,00089	0,4901	0,0031
4	1,98	0,499	-0,00082	1,0000	-0,00090	1,0000	-0,0009
5	0,2	0,499	-0,00087	1,0000	-0,00090	1,0000	-0,0009
6	0,2	0,02023	-0,00070	1,0000	-0,00090	1,0000	-0,0009
7	0,2	0,03047	-0,00077	1,0000	-0,00090	1,0000	-0,0009
8	0,2	0,0501	-0,00081	1,0000	-0,00090	1,0000	-0,0009

### 7.2.3 Bod zlomu

Bod zlomu se definuje jako hodnota  $b$ , ve které začíná docházet k ovlivnění přepadového součinitele šířkou  $b$ . Pro jeho stanovení slouží hodnoty z kap. 7.2.2, kdy je porovnávána hodnota  $C_{ef}$  se započtenými

hydraulickými koeficienty  $k_h$ ,  $k_b$  a s  $C_{ef}$  s pouze započteným koeficientem  $k_b$ . K porovnání relativní chyby slouží upravený vztah (7.2.1).



Graf 28: Relativní chyba  $C_{ef}$  se započteným koeficientem ovlivnění  $k_b$  od koeficientu bez započteného  $k_b$

Z důvodu nedostatečného pokrytí vstupními daty (Graf 28) v oblasti, kde by se bod zlomu měl vyskytovat, nelze stanovit přesně hodnotu, ve které dochází k počátku ovlivnění. Pouze odborným odhadem lze stanovit interval, ve kterém se tento bod může vyskytovat.

Bod zlomu pro přeliv výšky 2 m se nachází mezi měřenými hodnotami 0,2 a 0,25 šířky  $b$  v m.

Bod zlomu pro přeliv výšky 0,2 m se nachází mezi měřenými hodnotami 0,35 a 0,45 šířky  $b$  v m.

Se započtením nejistot pro dané měření jsou výsledkem následující hodnoty:

Po dosazení do vztahů (7.1.16) až (7.1.19) vychází nejistota ovlivnění efektivního součinitele přepadu pro výšku přelivu 2 m od  $\pm 1,17$  % pro  $b = 0,11$  m až po  $\pm 4,50$  % pro  $b = 0,05$  m.

Po dosazení do vztahů (7.1.20) až (7.1.22) vychází nejistota ovlivnění efektivního přepadového součinitele pro výšku přelivu 0,2 m od  $\pm 0,17$  % pro  $b = 0,05$  m až po  $\pm 0,32$  % pro  $b = 0,02$  m.

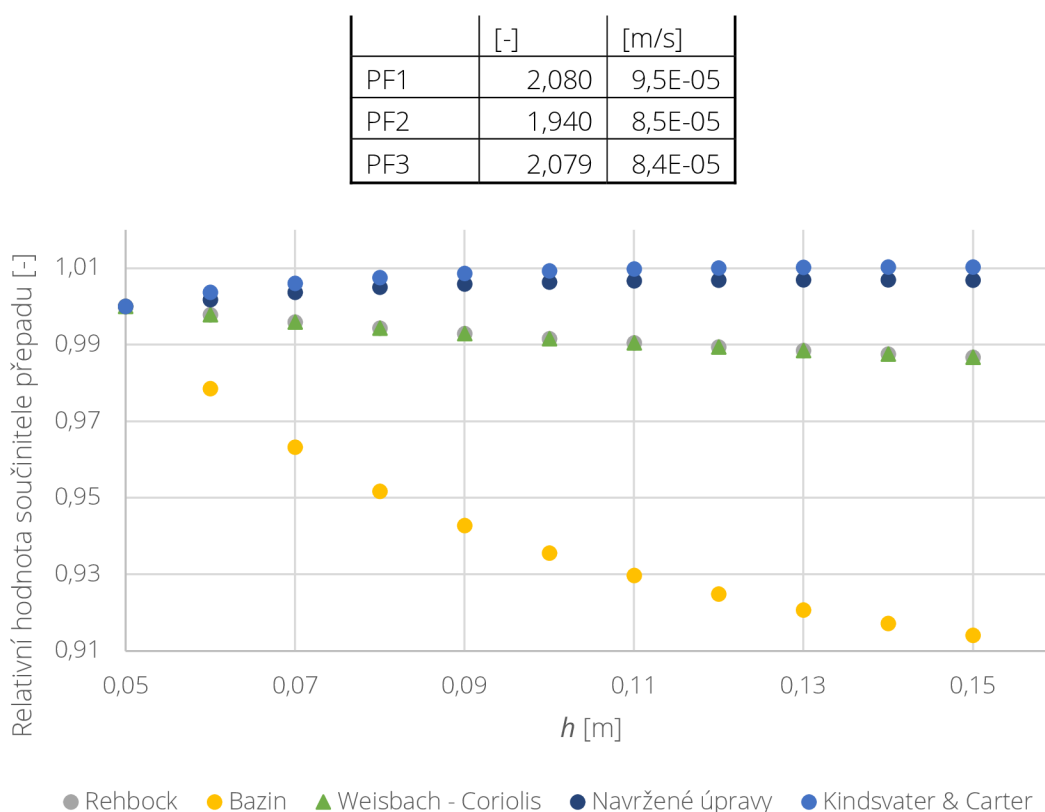
#### 7.2.4 Vyjádření součinitele přepadu pomocí naměřených rychlostí

Reálné rozložení rychlostního pole je možné zohlednit pomocí Coriolisova čísla. Coriolisovo číslo vyjadřuje podíl stanovených bodových rychlostí ku vyjádřené průřezové rychlosti. Je zahrnut při výpočtech ve Weisbachově vztahu (3.3). Z tohoto vztahu je poté možné vyjádřit součinitel přepadu a porovnat ho s hodnotami součinitelů ostatních autorů. Vztah pro Coriolisovo číslo viz (7.2.8)

Z naměřených hodnot v Tab. 16 se dopočetlo Coriolisovo číslo pro každý z měřených profilů PF a průřezová rychlost v daném profilu.

Tab. 32: Vypočtené hodnoty Coriolisova čísla pro daný profil s průřezovou rychlostí pro daný profil

	$\alpha_i$	$v_0$
--	------------	-------



Graf 29: Relativní hodnoty součinitelů přepadů v závislosti na  $h$  pro měření č. 4

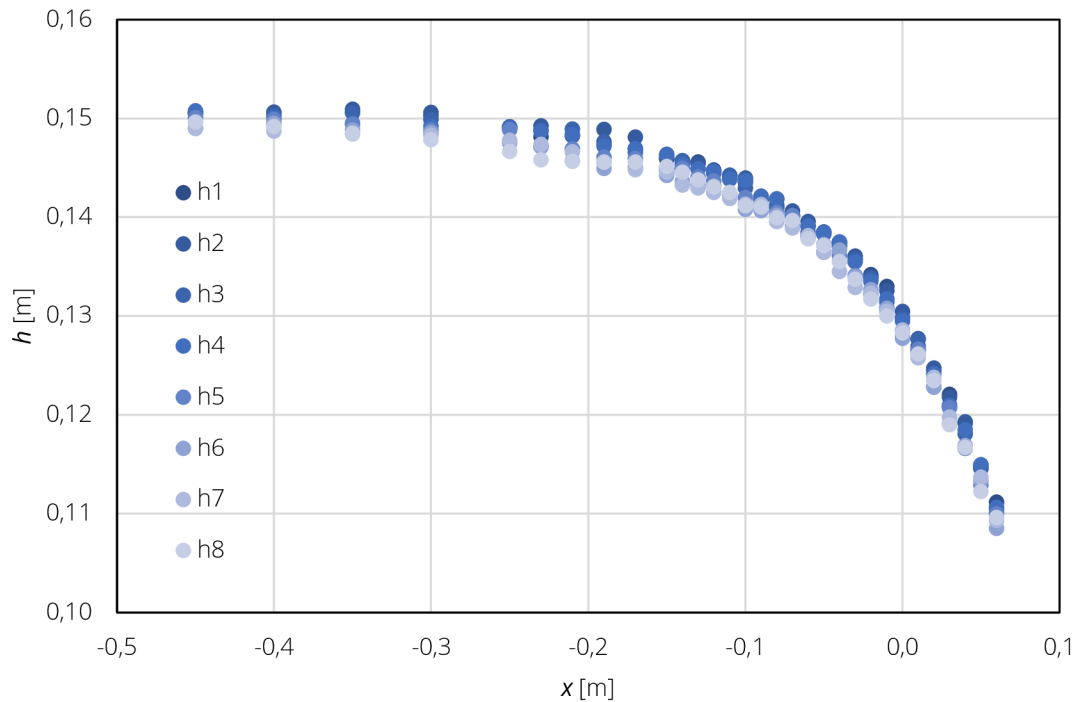
Pro Graf 29 byly hodnoty součinitelů vztaženy k hodnotám součinitele přepadu v bodě  $h$  0,05 m. Z grafu je možné vyčíst, že upravený Kindsvater & Carterův součinitel přepadu z kap. 7.2.2 nejlépe koreluje k vypočteným hodnotám součinitele pomocí (7.2.2). Avšak je třeba brát na zřetel, že hodnoty Coriolisova čísla jsou známy pouze pro výšku hladiny 0,15 m a šířku tratě 0,499 m. Jelikož jsou známy rychlosti pouze pro zmíněné charakteristiky  $h$  a  $b$ , není relevantní porovnávat výsledky jiných měření. Pro porovnání absolutních hodnot je vyhotovena Tab. 33.

Tab. 33: Hodnoty součinitelů přepadu pro různé autory a vstupní data

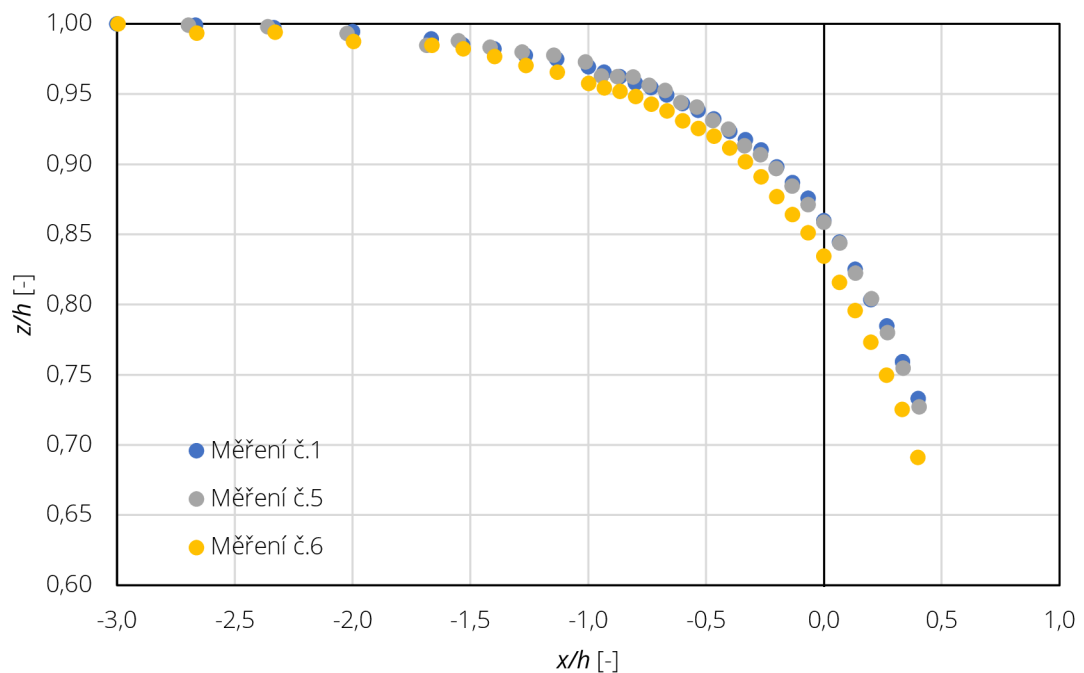
	Rehbock	Bazin	Kindsvater & Carter	Weisbach - Coriolis	Navržené úpravy
$C_d, m, \omega$	0,6019	0,4251	0,6320	0,6327	0,6258

### 7.3 Průběh hladin

Pro nalezení optimálního bodu k měření úrovně hladin v průběhu měření bylo vyhotoveno měření celkového průběhu hladiny v dané trati. Předpokladem je, že se bod nachází (viz Obr. 2) ve vzdálenosti  $3h$  až  $4h$  od koruny přelivu. Měření probíhalo pro  $h_{max}$  což činí 0,15 m. Zjistit optimální vzdálenost je podstatné pro relevantnost informací o velikosti součinitele přepadu. Pokud by měření proběhlo blíže ke koruně přelivu, než je optimální vzdálenost, mohla by se do velikosti součinitele přepadu promítnout křivka snížení od přepadu. Pokud by měření proběhlo dále od koruny přelivu, než je optimální vzdálenost, mohlo by se do velikosti součinitele přepadu projevit tření o stěny přítokového koryta.



Graf 30: Průběh hladin pro jednotlivá pole v měření č. 1



Graf 31: Průběh hladin pro měření č. 1, 5 a 6

Vstupními daty pro vynesení závislostí v (Graf 30) a (Graf 31) jsou data zobrazená v tabulkách 12, 13 a 19. Úrovně hladin a vzdálenost  $x$  (Graf 31) jsou zobrazeny v relativních vzdálenostech, tak aby bylo možné přehledně zobrazit pokles úrovně hladin u rozdílných měření. Vzdálenost  $x$  pro  $h_{max}$  je 0,45 m.

U průběhu hladiny prvního měření je patrný rozdíl mezi průběhem hladiny v prvním poli a průběhem hladiny v poli osmém, kdy k dosažení  $h_{max}$  pro  $z_1$  dochází o 0,15 m dříve. Avšak při započítání nejistot,

kteřá pro výšku 0,15029 m ( $z_1$ ) činí  $\pm 0,00129$  m a pro výšku 0,14785 m ( $z_8$ ) činí  $\pm 0,00136$  m v bodě  $x = -0,35$  m, je možné říci, že průběh hladin je v rámci nejistot stejný.

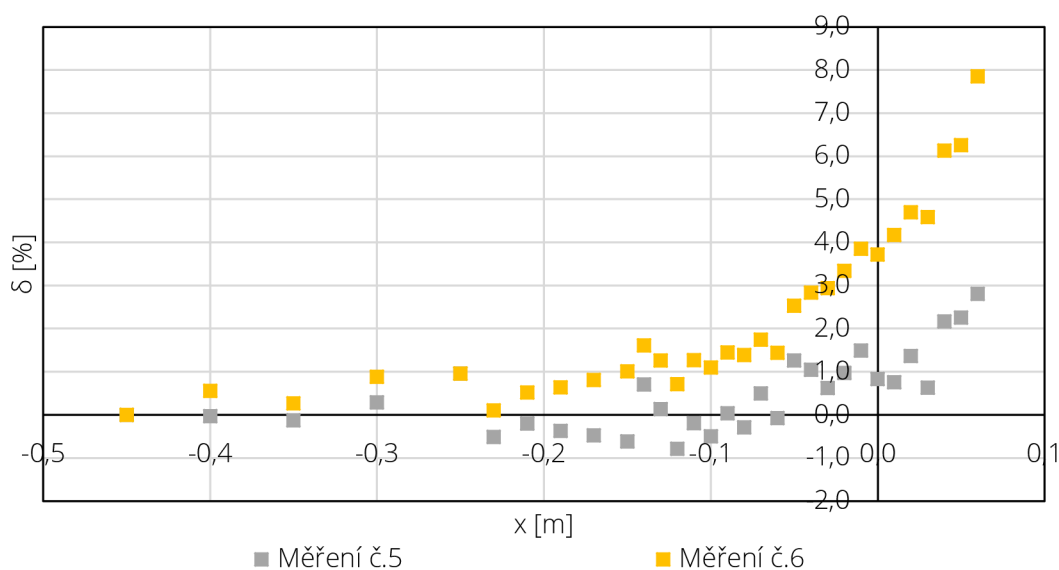
Pro průběh hladin (Graf 31), pokud uvažujeme průměrné vyjádření výšky  $z$  pro dané  $x$ , vychází, že pro všechny měřené hladiny se hodnota úrovně hladiny postupně ustálí ve vzdálenosti  $2,95h$ .

### 7.3.1 Ovlivnění průběhu hladiny

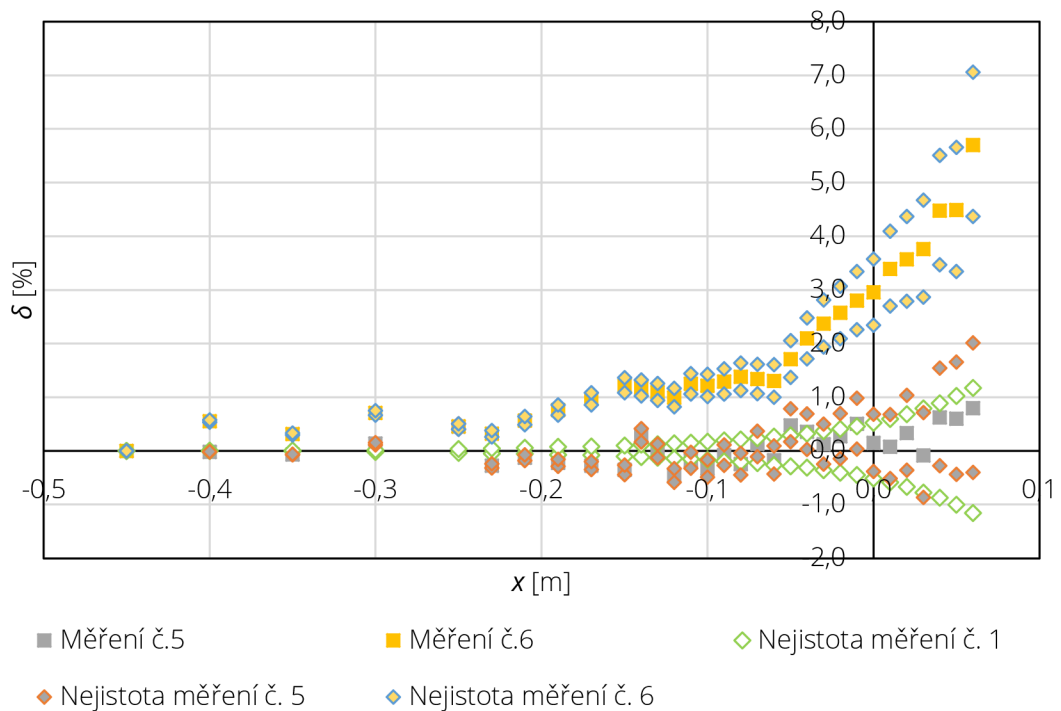
Předchozí výzkumy [3], [4] zmiňují možnost ovlivnění průběhu hladiny poměrem  $h/P$ . Dle [3] může toto ovlivnění při malé hodnotě  $P$  dosáhnout až 1 % polohy hladiny oproti hladině neovlivněné hydraulickými charakteristikami. Pro ověření tohoto závěru je použit obměněný vztah (7.2.1), kdy namísto průtoku je použit parametr  $z/h$  (7.3.1).

$$\delta = \frac{z/h_{\text{měření č.1}} - z/h_i}{z/h_{\text{měření č.1}}} \times 100 \% \quad (7.3.1)$$

K porovnání míry vlivu faktoru poměru  $h/P$  pomocí vztahu (7.3.1) jsou použity výsledky z měření průběhu hladiny pro měření číslo 1, 5 a 6 a relativizovány, viz (Graf 31). Vypočtené hodnoty jsou vyneseny v (Graf 33). Pokud započítáme nejistoty měření a zobrazíme je do grafu, tak relativní chyba větší než 1 %, jak je uvedeno v Schoder a Turner [3] je dosažena ve vzdálenosti  $x > -0,151$  m mezi měřeními č. 1 a č. 6, pro měření č. 5 a č. 6 je chyba větší než 1 % dosažena ve vzdálenosti  $x = -0,05, -0,04, -0,01$  m (viz Graf 32). Pro výpočet nejistot k daným výškám jsou použity vztahy (7.1.10) a (7.1.13). Použitá data jsou převzata z Tab. 12, Tab. 13, Tab. 19.

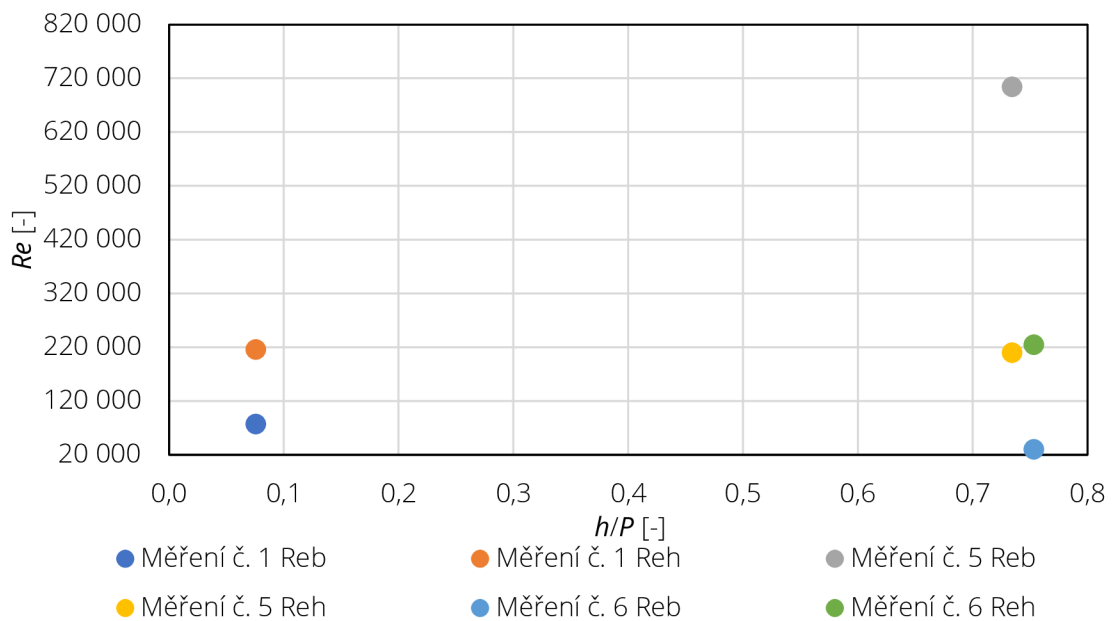


Graf 32: Maximální relativní chyba se započítáním nejistot pro dané měření



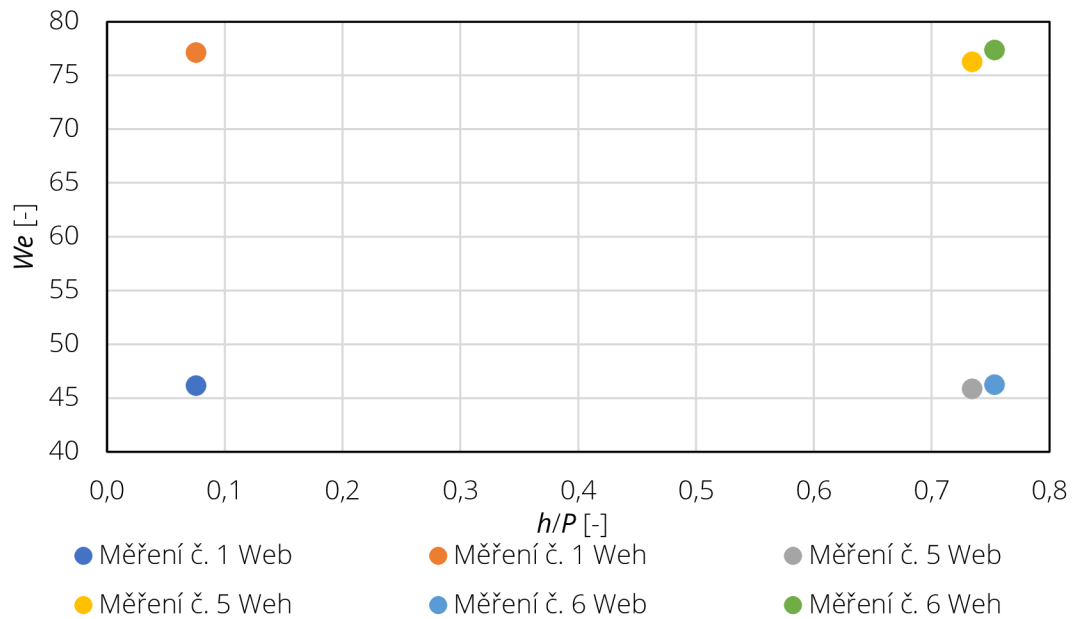
Graf 33: Relativní chyba průběhu hladin pro měření č. 5 a č. 6 od měření č. 1 se započítáním nejistot pro jednotlivé výšky hladin

Pro lepší ilustraci vlivu hydraulických charakteristik na výšku hladiny a potažmo i na hodnotu průtoku je příhodnější zvolit grafy zobrazující hodnoty  $We$  a  $Re$  v závislosti na  $h/P$  a  $b$ , viz kap. 3.3.2. Pro porovnání byly zvoleny průběhy hladin v měření č. 1, č. 5 a č. 6. Pro výpočet jsou použity rovnice (3.3.6), (3.3.7), (3.3.9), (3.3.10). Kinematická viskozita, povrchové napětí a hustota kapaliny byly odvozeny od známých hodnot teploty měřené kapaliny, pro výpočet byly použity fyzikální tabulky [15], [16], [17].



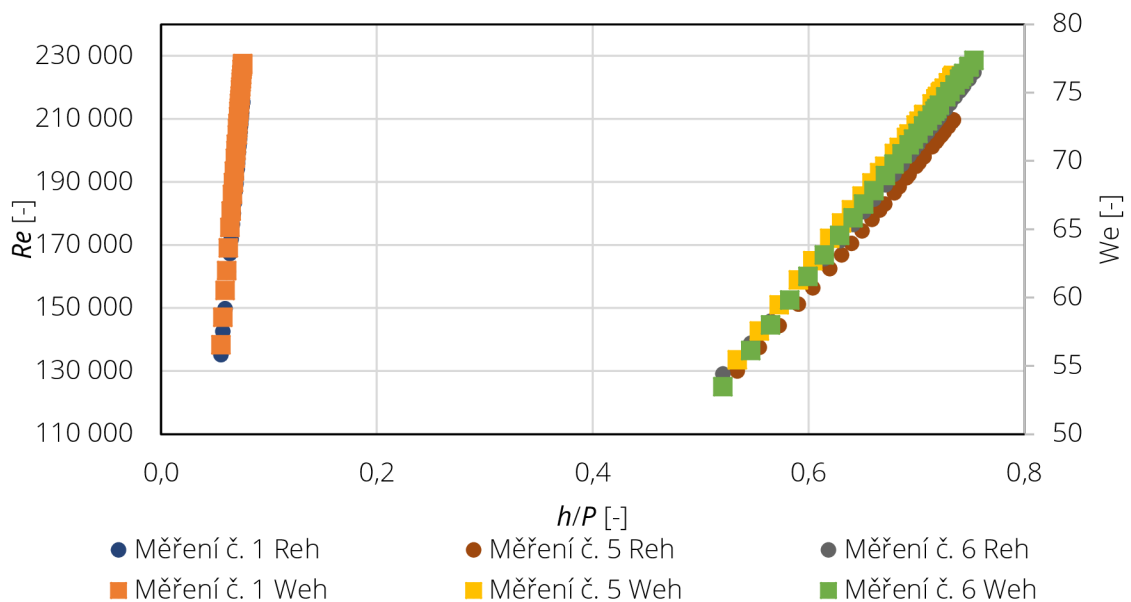
Graf 34: Výpočet Reynoldsova čísla pro jednotlivé průběhy hladin v závislosti na  $h/P$





Graf 35: Výpočet Weberova čísla pro jednotlivé průběhy hladin v závislosti na  $h/P$

Z (Graf 34) a (Graf 35) je viditelný pokles hodnot  $Re_b$ , a to zejména v závislosti na šířce měrného žlabu. Ostatní hodnoty ( $We$  a  $Re_b$ ) zůstávají poměrně konstantní a jejich ovlivnění rozměrem  $b$  či poměrem  $h/P$  není tak významné. Značný rozdíl v hodnotách  $Re_b$  je určen vlivem viskozity v rovnici výpočtu, čím širší je měrný žlab, tím menší je vliv viskozity na vlastnosti přepadového paprsku. Jak se vliv viskozity propaguje je možné vidět v (Graf 32), kdy rozdíl mezi neovlivněným o ovlivněným paprskem činí min. 0,27 % respektive 0,05 %. Nárůst relativní chyby je poté dán vzrůstajícím vlivem povrchového napětí a viskozity ve svislém směru viz (Graf 36).



Graf 36: Hodnoty Weberova a Reynoldsova čísla pro průběh hladin v závislosti na  $h/P$

## 8 Vyhodnocení experimentem dosažených výsledků

V následujících odstavcích jsou zhodnoceny výsledky s ohledem na zadání práce. Kapitola je členěna do podkapitol, které svým charakterem odpovídají posloupnosti témat v této práci.

### 8.1 Rešerše

Základním podkladem k této práci byla norma ČSN ISO 1438, která definuje způsob měření na tenkostěnných profilech, taktéž definuje vztahy (3.1.3) a (3.1.6) pro výpočet průtoku přes přeliv. Jedním ze vztahů je vztah (3.1.3) uveřejněný autory Kindsvaterem a Carterem. Tento vztah uvažuje při svém výpočtu s vlivy šířky (3.1.4) a výšky (3.1.5) na velikost přepadového součinitele (3.3.1.1). Slouží tedy v této práci jako stěžejní vztah určující velikost a rozložení vlivu šířky na přepadový součinitel. Jelikož je tento vztah tak důležitý, byla literatura [4] uceleně rekognoskována. Ve své práci autoři navazují na práce předchozích autorů, a to zejména na Bazina [8], Schodera [3] a Rehbocka [7], tyto práce byly taktéž podrobeny rešerši. U prací Bazina, Schodera a Rehbocka však chybí přímá spojitost s vlivem šířky koryta na přepadový součinitel, jelikož tito autoři se vztahem šířky k součiniteli přepadu nezabývali, viz kapitola 3. Vztahy těmito autory odvozené však byly ve výpočtech použity pro porovnání výsledných hodnot.

### 8.2 Měření

Pro měření měly být sestaveny takové experimentální modely, aby umožňovaly komplexní prozkoumání vlivu šířky tenkostěnného přelivu na přepadový součinitel.

Aby nebyl přepadový koeficient ovlivněn nerovnoměrným rozložením rychlostního pole, byl model pro měření č. 1 až 5 vybaven usměrňovači proudu a byl také dostatečně dlouhý. To že je rozdělení přítokové rychlosti rovnoměrné můžeme pozorovat na obrázku 57, kde vidíme rovnoměrné rychlostní pole, pouze u pole č. 1 a 2 se vyskytovala vyšší rychlost proudění. U modelu sestaveného pro měření č. 6 až 8 bohužel nebylo možné ověřit rovnoměrnost rozložení rychlostí, předpokládá se však, že díky použití usměrňovače před nátokem do trati, byla rovnoměrnost dodržena i v tomto případě. K potlačení hydraulických vlivů jako je povrchové napětí a viskozita měly přispět dostatečné rozměry šířky a výšky přelivu. Jak je možné vidět v tabulkách 27 a 28, tak koeficienty vyjadřující vliv těchto veličin jsou v případě přelivu širokého 0,5 m a vysokého 2 m nejnižší ze všech měření a dá se tedy říci, že tyto vlivy byly úspěšně potlačeny a toto měření mohlo být při následujících výpočtech považováno za referenční.

Pro měření se používala zařízení s přesností odpovídající laboratorní povaze experimentu. Díky jejich vysoké přesnosti mělo být docíleno minimalizace nejistot plynoucích z jejich používání. Jak lze vidět v grafech 12 až 18, toho bylo docíleno ve všech případech, vyjma měření č. 1 a 2. Nárůst nejistoty zejména oproti měření č. 6 až 8 je dáno použitím ocelového pásového měřidla (svinovacího metru), kde díky jeho použití s každou další použitou přepážkou také rostla celková nejistota pro dané měření. Do budoucna se pro tyto úkony doporučuje použití přesnějších nástrojů. Dalším vlivem, který mohl ovlivnit měření, bylo prosakování vody skrze konstrukci žlabu. Pro měření č. 1 až 5, toto bylo eliminováno měřením objemu prosáklé vody a jejím konečným započítáním do celkového průtoku, viz kapitola 6.3. Co však bylo neočekávané a po delší dobu nebylo zpozorováno, byl průsak skrze samotnou konstrukci přelivu pod přepadový paprsek. K eliminaci tohoto jevu byly učiněny nápravná opatření, viz obr. 30.

Aby měření nebylo ovlivněno třením o stěny přítokového koryta a křivkou snížení od přepadu, bylo toto ověřeno kontrolním měřením průběhu hladiny pro měrnou trať č. 1 a 2. Z grafů 29 a 30 je patrné, že ustálení úrovně na  $h_{max}$  dochází v předpokládané vzdálenosti  $3h$ .

Pro určení míry ovlivnění výškou přelivu bylo do měrného žlabu č. 1 umístěno falešné dno, které mělo za cíl zvýšit variabilitu poměru  $h/P$  a umožnit tak lepší pochopení problematiky jeho vlivu na přepad. Aby byla dodržena kontinuita dat, tak v měrné trati č. 2 byla použita stejná výška přelivu jako u trati č. 1 s falešným dnem. Toto se nakonec projevilo jako prozíravé řešení, které umožnilo lépe stanovit ovlivňující veličiny.

### 8.3 Analýza vlivu

Jak bylo uvedeno výše, k analýze vlivu šířky na přepadový součinitel sloužil vztah (3.1.3) a z něho odvozený (3.3.14). Pokud dosadíme (3.3.12) a (3.3.13) do (3.3.14) je možné míru vlivu na  $C_d$  vyjádřit koeficientem  $k_b$ . Koeficient  $k_b$  přímo vyjadřuje vliv šířky na součinitel přepadu, zohledňuje jak povrchové napětí, tak viskozitu, které jsou významnými činiteli při výpočtech průtoku přes přeliv, viz kapitola 3.3.2.

Prvním pokusem o zjištění velikosti tohoto koeficientu bylo jeho prosté vyjádření ze vztahu (3.1.3). Po dosazení známých veličin ( $Q$ ,  $h$ ,  $b$ ,  $g$ ) a hodnoty doporučené  $k_h$  (0,0012 m) byla stanovena velikost koeficientu  $k_b$  (viz tab. 29). Avšak hodnoty takto dopočítaného koeficientu byly mnohonásobně větší, než hodnoty stanovené normou [6] (viz také tab. 29). Bylo tedy nutné ke stanovení koeficientu přistoupit jiným způsobem.

Tím způsobem bylo nalezení vlastních hodnot  $k_b$  iteračním způsobem tak, aby výsledné hodnoty přepadového součinitele byly vůči sobě navzájem s co největší korelací. Takto upravený součinitel byl nadále označován jako efektivní součinitel přepadu  $C_{ef}$ . Jelikož cílem této práce bylo stanovit vliv šířky, nikoli výšky ( $h/P$ ,  $P$ ) musel být tento vliv minimalizován. Minimalizaci vlivu výšky na součinitel přepadu má za úkol koeficient  $k_h$  avšak po dosazení doporučených hodnot literaturou [6] (0,0012 m) nebylo dosaženo uspokojivých hodnot korelace jednotlivých  $C_{ef}$  vyjádřených pro danou šířku  $b$ . Hodnoty koeficientu  $k_h$  tedy byly resetovány na nulu. Autoři Kindsvater a Carter [4] uvádějí, že přepadový součinitel  $C_d$  (ovlivněný viskozitou a povrchovým napětím) je závislý na poměru  $h/P$  a jeho korelaci s touto hodnotou je možné zrušit (a tím pádem zvýšit vzájemnou korelaci hodnot  $C_{ef}$ ) právě koeficientem  $k_h$ . Proto bylo přistoupeno k tomu, že hodnoty  $C_d$  byly vyneseny v závislosti na poměru  $h/P$  a koeficientem  $k_h$  byla hledána co nejvyšší (nejméně však 0,95) hodnota koeficientu determinace na lineární regresi těchto hodnot. Jak je patrné z tabulky 27 a grafu 22, hodnoty koeficientu se od udávaných normou [6] značně liší, a to zejména pro měření č. 5 až 7. Je tedy zřejmé, že není možné koeficient  $k_h$  stanovit plošně pro všechny hodnoty  $b$  a  $h$ , ale je toto nutné při výpočtu zohlednit. Rozdíl mezi započteným a nezapočteným koeficientem  $k_h$  je možné vidět v grafech 23 a 24. Nyní, když byl koeficient  $k_h$  stanoven, čili vliv výšek  $h$  a  $P$  potlačen, bylo možné stanovit, jak moc se šířka na přepadovém koeficientu projevuje (graf 25). Aby bylo možné určit velikost ovlivnění a to např. porovnat s údaji autorů Kindsvater & Cartera [4], vyhodnotil se samotný koeficient  $k_b$ . Vyhodnocení probíhalo podobným způsobem jako u výše zmíněného koeficientu  $k_h$  s tím rozdílem, že se hledala co nejvyšší korelace mezi hodnotami  $C_{ef}$  ovlivněnými šířkou a  $C_{ef}$  neovlivněnými šířkou (zde bylo stanoveno odborným odhadem a taktéž velikostí  $k_h$ , že šířkou neovlivněné měření je měření č. 5 a 4). Hodnoty takto nalezených velikostí koeficientů  $k_b$  je možné vidět v tabulce 29, kde je i porovnání s hodnotami zjištěnými z literatury (obr.4) a hodnotami vypočtenými dosazením. Je zde patrný rozdíl u hodnot měření č. 1, 2 a 3 mezi hodnotami zjištěnými dosazením do vztahu a hodnotami zjištěnými z literatury

[6] a postupnou iterací hodnot  $k_b$ . To může být právě dáno tím, že literatura [6] nezohledňuje vliv šířky taktéž na koeficient  $k_h$ .

Pro bod zlomu, místo, kde začíná docházet k ovlivnění přepadového součinitele šířkou, jsou porovnány hodnoty  $C_{ef}$ s nulovým koeficientem  $k_b$  a hodnoty  $C_{ef}$  se započtenými hodnotami  $k_b$  (hodnoty  $k_b$  iterační). Relativní chyba mezi těmito hodnotami je poté zobrazena v grafu 27. Avšak z důvodu malého pokrytí vstupními daty v inkriminované oblasti přechodu, není možné určit bod zlomu zcela přesně. Navíc, pokud do relativní chyby započteme ještě nejistoty pro dané měření, vychází u měření č. 1 až 4 (výška přelivu 2 m) takový rozsah hodnot, že bod zlomu nelze určit vůbec. Pro měření č. 6 až 7 se bod zlomu nachází mezi body 0,35 m až 0,45 m.

## 8.4 Komparace

Pro zajímavost byly porovnány také přístupy jednotlivých autorů k výpočtu průtoku přes přeliv a k výpočtu samotného přepadového součinitele.

Pro průtok byl porovnán výpočet dle Bazina, Kindsvater & Cartera (ve formě vycházející z ČSN [6]) a Rehbocka. Toto porovnání je vidět v grafech 19, 20 a 21, do hodnot jsou také započítány nejistoty pro daná měření (v grafech kvůli přehlednosti jsou zobrazeny jen nejistoty konvergující k naměřeným datům). Jak je z grafu 20 patrné, pro měření č. 1 až 4 je relativní chyba mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami značná. Lepší je situace v grafu 21 pro měření č. 6 až 8, kdy hodnoty Kindsvatera & Cartera (ve formě vycházející z ČSN [6]) a Bazina postupně konvergují k hodnotám naměřeným. To může být dáno tím, že u výpočtu dle Bazina byly v určitém momentě ( $h > 0,1$  m) splněny podmínky pro použití vztahu.

Pro porovnání různých cest k výpočtu přepadového součinitele byli zvoleni opět Bazin, Kindsvater & Carter (s hodnotami doporučenými z normy [6] a s hodnotami nově vypočtenými), Rehbock a nově Weisbachův vztah, ve kterém je zohledněn vliv Coriolisova čísla zvláště. Pro výpočet Coriolisova čísla byla využita data z měření rychlostí v profilech PF1, PF2 a PF3. Zjištěné hodnoty Coriolisových čísel a rychlostí v profilech jsou zobrazena v tabulce 30. Jelikož měření rychlostí proběhlo pouze v trati č. 1 a pro plnou šíři bez přepážek a o maximální možné hladině (0,15 m), není možné výpočet porovnávat s jinými měřeními. Nicméně porovnání bylo provedeno alespoň pro měření č. 4. Aby mohlo dojít k porovnání, byly všechny koeficienty relativizovány vzhledem k počáteční výšce a poté vynesena jejich závislost na výšce  $h$ . Z grafu 28 je patrné, že hodnoty vypočtené na základě vztahu (3.3) se nejvíce přibližují hodnotám určeným vztahem (3.1.3) a s nově použitými koeficienty  $k_h$  a  $k_b$ . Toto může být dáno tím, že nově vypočtené koeficienty  $k_h$  a  $k_b$  věrohodněji (v porovnání s hodnotami  $k_h$  a  $k_b$  určenými normou [6]) zohledňují chování kapaliny. Avšak při porovnání absolutních hodnot přepadových součinitelů v tabulce 31 je evidentní rozdíl mezi výsledky Weisbachova vztahu a výsledky ostatních autorů.

## 8.5 Doporučení pro výpočet

Při výpočtu průtoku přes přeliv dle ČSN ISO [6], je nutné při hledání hodnot koeficientu  $k_b$  (který zohledňuje tření kapaliny o stěny koryta) zohlednit také to, že tento koeficient je závislý i na poměru  $h/P$  a nelze ho tudíž stanovit pouze na základě poměru  $b/B$  (obr.4). Taktéž není možné stanovit koeficient  $k_h$  plošně, nehledě na šířku a výšku ( $h/P$ ) daného přelivu. Není však možné, z důvodu nedostatku měřených dat, jasně vymezit jaké velikosti hodnot, s ohledem na šířku a výšku ( $h$ ,  $P$ ), koeficientů  $k_h$  a  $k_b$  při výpočtech zvolit.

## 9 Závěr a doporučení pro následující výzkum

Cílem této práce bylo stanovení ovlivnění součinitele přepadu šířkou tenkostěnného přelivu. Tento cíl byl splněn, když byl přepadový součinitel analyzován pomocí efektivního součinitele přepadu vyjádřeného vztahem (3.3.14). Míra ovlivnění pak byla charakterizována koeficientem  $k_b$ .

V teoretické části byla popsána problematika tenkostěnných přelivů s popisem jednotlivých přístupů k výpočtu průtoku a přepadových součinitelů. Byly popsány vlivy, na nichž je součinitel přepadu závislý, a to nejdříve v teoretické části objasněním vztahu součinitele s povrchovým napětím a viskozitou. A poté i v části analytické, kdy byly tyto vlivy zastoupeny hydraulickými koeficienty  $k_h$  a  $k_b$ . Jejich vztahy vůči součiniteli byly podrobeny výpočtům, zejména pak byl důležitý koeficient  $k_b$ , který zahrnuje i vliv tření kapaliny o povrch přítokového žlabu. V praktické části ještě byla popsána laboratoř s měrnými tratěmi, použita technika pro měření a prováděný postup měření.

Byly potvrzeny závěry autorů [3], [4], že pro relevantní stanovení průtoku přes přeliv, nebo přepadového součinitele je třeba uvažovat s hydraulickými charakteristikami, a to zejména pro přelivy s malými hodnotami rozměrů  $h$ ,  $P$  a  $b$ .

Výsledkem této práce je stanovení návrhu na výpočet průtoku přes přeliv. Pro stanovení průtoku byl zvolen výpočet na základě efektivního součinitele, který zohledňuje vliv hydraulických charakteristik. Z kap. 7 dostáváme vztahy pro výpočet vlivu hydraulických koeficientů. Koeficienty jsou vyjádřeny pouze pro  $P = 2$  m a  $P = 0,2$  m.

Pro  $b < 0,05$  m a  $P = 0,2$  m je odvozena rovnice k výpočtu koeficientu  $k_h$  (7.2.2).

Pro  $b > 0,05$  m a  $P = 0,2$  m je odvozena rovnice k výpočtu koeficientu  $k_h$  (7.2.2A).

Pro  $b > 0,05$  m a  $P = 2,0$  m je odvozena rovnice k výpočtu koeficientu  $k_h$  (7.2.3).

V rozporu s ČSN [6] je nutné uvažovat s vlivem viskozity pro  $b < 0,5$  m ( $b/B = 1$ ), ČSN stanoví pouze konstantní hodnotu  $-0,0009$  m, což je v rozporu s výsledky, viz Tab. 29. Byly tedy stanoveny rovnice zohledňující hydraulické charakteristiky pro  $b < 0,5$  m.

Pro  $b < 0,05$  m a  $P = 0,2$  m je odvozena rovnice k výpočtu koeficientu  $k_b$  (7.2.4).

Pro  $b > 0,05$  m a  $P = 0,2$  m je odvozena rovnice k výpočtu koeficientu  $k_b$  (7.2.5).

Doporučením pro následný výzkum je doplnění dat vyjadřujících vliv jednotlivých parametrů ( $h$ ,  $P$ ,  $b$ ) na dané koeficienty, potažmo na přepadové součinitele. Zejména se jedná o oblasti s  $b < 0,05$  m, kde je třeba určit, jak moc při těchto šířkách zasahuje do výpočtu poměr  $h/P$ . Dále doplnit provedený výzkum o změnu vlivu viskozity a povrchového napětím změnou teploty kapaliny.

Pokud by bylo možné zpětně provést změnu některých vlastností měrného žlabu, byl by to větší počet hodnot  $P$  a  $b$  a měření rychlostí průběžně pro každý průtokový stav.

Cíle dané zadáním viz kap. 2 a Zadáním diplomové práce této závěrečné práce byly splněny ve všech bodech.

## 10 Bibliografie

- [1] JANDORA, Jan a Jan ŠULC. *Hydraulika: Modul 01*. Brno, 2006. Studijní opora. VUT v Brně.
- [2] BAZIN, H. *Experiments upon the contraction of the liquid vein issuing from an orifice, and upon the distribution of the velocities within it*. 1st edit. New York: J. Wiley, 1896.
- [3] SCHODER, E. a K. TURNER. Precise Weir Measurements. In: *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. Vol.93. New York: American Society of Civil Engineers, 1929, s. 999-1110. ISBN 0784406731. ISSN 978-0784406731.
- [4] KINDSVATER, C. a R. CARTER. Discharge Characteristics of the Rectangular Thin-Plate Weirs. In: *Journal of the Hydraulics Division*. Vol. 83. New York: American Society of Civil Engineers, 1957, s. 1-36. ISSN 0044-796X.
- [5] HEŘMANOVÁ, Lenka. *Hydraulický modelový výzkum měrných clon určených pro stanovení průtoku vody v kruhových profilech s volnou hladinou*. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Michal Žoužela, Ph.D.
- [6] ČSN ISO 1438. *Hydrometrie: Měření průtoku vody v otevřených korytech pomocí tenkostěnných přelivů*. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [7] Weir Experiments, Coefficients and Formulas. In: *Water-Supply and Irrigation Paper*. 200. Washington: Government Printing Office, 1907, s. 193. ISSN 0888-4765.
- [8] BAZIN, Henri. Recent Experiments on the Flow of Water Over Weirs. In: *Proceedings of the Engineers' Club of Philadelphia*. Vol. 7. Philadelphia: Philadelphia : The Club, 1890, s. 260-310.
- [9] KADLEC, Karel. Indukční průtokoměr - princip, vlastnosti a použití. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. Děčín: FCC Folprecht, 2012, 2012(10), 10-13. ISSN 1210-9592.
- [10] *Chyby a nejistoty měření* [online]. Brno: Masarykova univerzita, 2006 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/1441/podzim2009/FY2BP\\_FM3/CHYBY\\_A\\_NEJISTOTY.pdf](https://is.muni.cz/el/1441/podzim2009/FY2BP_FM3/CHYBY_A_NEJISTOTY.pdf)
- [11] ČSN EN ISO 772. *Hydrometrická měření - Terminologie*. Amd. 1. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [12] ŽOUŽELA, M. *Hydraulické okruhy laboratoře Ústavu vodních staveb Fakulty stavební VUT v Brně*. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, 2009.
- [13] *Hloubkoměr digitální* [online]. Brno: WHP TECHNIK s.r.o., 2018 [cit. 2019-01-01]. Dostupné z: <http://www.whp.cz/hloubkomer-digitalni.html>

- [14] SVOBODOVÁ, H. a L. RUTAR. *Kalibrační postup KP / 2 / 2018*. Ústí nad Labem, 2018. Dostupné také z: <http://ams.halenb.cz/wp-content/uploads/2018/10/KP-svinovac%C3%AD-metr.pdf>
- [15] Water - Dynamic and Kinematic Viscosity. *The Engineering ToolBox* [online]. b.r. [cit. 2018-12-2]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d\\_596.html](https://www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d_596.html)
- [16] SVOBODA, E. Molekulová fyzika kapalin. *Docplayer* [online]. Praha: UK v Praze, b.r. [cit. 2018-12-2]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/14189309-Molekulova-fyzika-kapalin.html>
- [17] ČMELÍK, Milan, Lubor MACHONSKÝ a Zdislav ŠÍMA. *Fyzikální tabulky*. Vyd. 2., dopl. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN 80-737-2009-4.
- [18] MINAŘÍK, Petr a Tomáš POKORNÝ. *Certificate of calibration: No. 052/18*. Brno: ENBRA, 2018.

## 11 Seznamy

### 11.1 Seznam zkratk

LW	Laboratoř vodohospodářského výzkumu
ČSN	Česká státní norma
ISO	International Organization for Standardization
VUT	Vysoké učení technické
SI	Systéme International
EN	Evropská norma
FAST	Fakulta stavební
VNC	Virtual Network Computing
UVP	Ultrasonic Velocity Profiler
Wi-Fi	Wireless Fidelity
UTP	Unshielded Twisted Pair
PVC	Polyvinylchlorid
FC	Flow Control
PE	Polyethylen

SMS

Surface-water Modeling System

## 11.2 Seznam veličin

$A_{x,zj}$	citlivostní koeficient	[-]
$b$	šířka přelivu	[m]
$b_0$	účinná šířka přelivu na základě kontrakce od přepážky	[m]
$b_e$	účinná šířka přelivu	[m]
$b_l$	celková šířka (tloušťka) dělicích příček	[m]
$b_b$	šířka měřicí trati	[m]
$b_c$	šířka měřicí trati bez příček	[m]
$C_d$	součinitel přepadu	[-]
$C_e$	efektivní součinitel přepadu	[-]
$g$	tíhové zrychlení	[m·s <sup>-2</sup> ]
$h$	přepadová výška	[m]
$h_0$	energetická přepadová výška	[m]
$h_1...h_8$	přepadová výška v daném poli	[m]
$Hh_{1e}$	účinná přepadová výška	[m]
$h_e$	účinná přepadová výška	[m]
$h_v$	výška měřeného profilu	[m]
$h_{1e}H$	výška těžiště $dh$ nad srovnávací rovinou	[m]
$J_r$	numerická konstanta závislá na typu přelivu nezátížená chybou	[-]
$k$	koeficient rozšíření	[-]
$k_b$	koeficient hydraulického vlivu pro šířku	[m]
$k_h$	koeficient hydraulického vlivu pro výšku	[m]
$L$	charakteristický rozměr	[m]
$m$	součinitel přepadu	[-]
$n$	počet měření	[-]



$np$	počet dělicích příček	[-]
$P$	výška koruny přelivu nade dnem koryta	[m]
$Q$	průtok	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
$\frac{\Delta Q}{Q}$	relativní chyba průtoku	[-]
$Q_{pr}$	průtok prosáklé vody	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
$Q_{ind\ kal}$	kalibrovaný průtok indikovaný indukčním průtokoměrem	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
$Q_{ind\ v}$	průtok indikovaný indukčním průtokoměrem a vypočtený z $V_0$ a $V_t$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
$Re$	Reynoldsovo číslo (kritérium)	[-]
$s_{\bar{x}}$	směrodatná odchylka aritmetického průměru	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
$t$	tloušťka přelivu	[m]
$T$	teplota vody	[°C]
$u$	standartní nejistota	[%]
$U$	parametr rozšířené nejistoty	[%]
$u_A$	standartní nejistota typu A	[%]
$u_B$	standartní nejistota typu B	[%]
$u_{Cx}$	kombinace standartních nejistot	[%]
$u_{zj}$	standartní nejistota jednotlivých zdrojů	[%]
$u_{x,zj}$	nejistota měřené veličiny	[%]
$u_c(Q)_r$	výsledná nejistota pravoúhlého přelivu	[%]
$v$	rychlost proudění	[m·s <sup>-1</sup> ]
$v_0$	přítoková rychlost	[m·s <sup>-1</sup> ]
$V_0$	počáteční objem zobrazený na parametrizačním panelu	[m <sup>3</sup> ]
$V_t$	objem zobrazený na parametrizačním panelu v čase $t$	[m <sup>3</sup> ]
$V_{pr}$	objem prosáklé vody v čase $t_{pr}$	[m <sup>3</sup> ]
$v_{xb}$	průměrná rychlost v ose $x$ po výšce svislice v daném profilu	[m·s <sup>-1</sup> ]
$v_{xh}$	průměrná rychlost v ose $x$ pro svislici v půdorysu	[m·s <sup>-1</sup> ]

$We$	Weberovo číslo (kritérium)	[-]
$x$	vzdálenost od počátku měření (koruna přelivu)	[m]
$X$	funkce zdrojů standartních nejistot	[-]
$z$	souřadnice	[m]
$z_{max}$	maximální možná relativní odchylka způsobená daným vlivem	[-]
$\alpha$	Coriolisovo číslo (součinitel kinetické energie)	[-]
$\Delta C_d, \Delta b_e, \Delta h_e$	dílčí rozptyly	[-],[m]
$\Delta Q$	absolutní chyba průtoku	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
$\delta$	relativní chyba hodnot	[%]
$\nu$	kinematická viskozita kapaliny	[m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
$\xi$	součinitel boční kontrakce	[-]
$\sigma$	povrchové napětí	[N·m <sup>-1</sup> ]
$\omega$	součinitel přepadu daného přelivu	[-]
$\chi$	převodní koeficient příslušného rozdělení	[-]

### 11.3 Seznam obrázků

Obr. 1: Přepad přes obecný přeliv [1] .....	14
Obr. 2: Tenkostěnný přeliv s definicí tloušťky a výšky přepadu [5] .....	14
Obr. 3: Součinitel přepadu $C_d = a + a'(h/P)$ [6], kde $X = h/P$ a $Y = C_d$ .....	15
Obr. 4: Závislost $k_b$ na $b/B$ [6], kde $X = b/B$ a $Y = k_b$ .....	16
Obr. 5: Půdorys hydraulického žlabu použitého k experimentům [3] .....	17
Obr. 6: Použité usměrňovače proudu [3] .....	18
Obr. 7: Typy použitých přelivných korun [3] .....	18
Obr. 8: Tenkostěnný přeliv s bočním zúžením [4] .....	20
Obr. 9: Vliv viskozity [4] .....	22
Obr. 10: Schéma přepadu přes ostrohranný přeliv [4] .....	23
Obr. 11: Bazinova série měření pro $b/B = 1$ [4] .....	24
Obr. 12: Série E a F měření Schodera a Turnera [4] .....	25
Obr. 13: Měření provedená U.S.B.R. [4] .....	25

Obr. 14: Součinitel $C$ v korelaci s $C_e$ [4] .....	26
Obr. 15: Uplatnění korekce pomocí koeficientu $kb$ [4].....	26
Obr. 16: Závislost $k_b$ na $b/B$ [4].....	27
Obr. 17: $C_e$ v závislosti na $h/P$ při $b/B = 1$ [4] .....	27
Obr. 18: Závislost $C_e$ na $h/P$ pro všechna měření [4].....	28
Obr. 19: Efekt viskozity a povrchového napětí při různých výškách $h$ [4].....	29
Obr. 20: Efekt viskozity a povrchového napětí ve vztahu k šířce $b$ [4].....	30
Obr. 21: Schéma funkce indukčního průtokoměru [9].....	31
Obr. 22: Řídicí systém pro hydraulický okruh č. 4.....	36
Obr. 23: Venkovní trať .....	36
Obr. 24: Schematický řez žlabem .....	37
Obr. 25: Detail koruny přelivu [m].....	37
Obr. 26: Detail uchycení dělicí desky .....	38
Obr. 27: Systém dělicích desek .....	38
Obr. 28: Distanční deska.....	38
Obr. 29: Upevnění falešného dna.....	39
Obr. 30: Dotěsnění průsaku .....	39
Obr. 31: Měrná trať č.2.....	40
Obr. 32: Pohled na přeliv shora .....	41
Obr. 33: Použité posuvné měřidlo pro měření výšky hladiny .....	41
Obr. 34: Uchycení hrotu na posuvném měřidle.....	42
Obr. 35: Zahnutý hrot.....	42
Obr. 36: Příčný hrot .....	42
Obr. 37: Detail sondy .....	43
Obr. 38: Detail uchycení soustrojí .....	43
Obr. 39: Distanční díl .....	44
Obr. 40: Počátek souřadného systému pro měrnou trať č. 1.....	45
Obr. 41: Odečtení nuly vodočtu.....	46
Obr. 42: Hrot se dotýká hladiny .....	46
Obr. 43: Hrot se nedotýká hladiny .....	46
Obr. 44: První sestava měření .....	47
Obr. 45: Přepad ovlivněný konstrukcí přelivu .....	47

Obr. 46: Přepad neovlivněný konstrukcí přelivu .....	48
Obr. 47: Sestava o čtyřech polích .....	48
Obr. 48: Měřicí sestava o dvou polích .....	49
Obr. 49: Měřicí trať bez dělicích přepážek.....	49
Obr. 50: Proudění v trati při malé hodnotě $P$ .....	50
Obr. 51: Profily pro měření rychlostí v měrném žlabu .....	50
Obr. 52: Výšky ve kterých je prováděno měření rychlostí.....	51
Obr. 53: Svislá aretace.....	51
Obr. 54: Příčná aretace .....	51
Obr. 55: Zavzdušňovací otvor .....	52
Obr. 56: Počátek souřadného systému pro měrnou trať č. 2.....	52
Obr. 57: Grafické zobrazení rychlostí v jednotlivých profilech.....	59

## 11.4 Seznam tabulek

Tab. 1: Kombinace parametrů určených ke změření.....	35
Tab. 2: Základní rozměry pro měření č. 1 .....	53
Tab. 3: Naměřené hodnoty měření č. 1 .....	54
Tab. 4: Základní rozměry pro měření č. 2.....	54
Tab. 5: Naměřené hodnoty měření č. 2 .....	54
Tab. 6: Základní rozměry pro měření č. 3.....	55
Tab. 7: Naměřené hodnoty měření č. 3 .....	55
Tab. 8: Základní rozměry pro měření č. 4.....	55
Tab. 9: Naměřené hodnoty měření č. 4.....	55
Tab. 10: Základní rozměry pro měření č. 5.....	56
Tab. 11: Naměřené hodnoty pro měření č. 5 .....	56
Tab. 12: Průběh hladiny pro trať s dělicími přepážkami .....	56
Tab. 13: Průběh hladiny pro trať bez dělicích přepážek s falešným dnem.....	57
Tab. 14: Parametry tratě a proudění při měření rychlostí .....	58
Tab. 15: Časově průměrné bodové rychlosti po výšce profilu.....	58
Tab. 16: Časově průměrné bodové průměrné rychlosti po šířce profilu .....	58
Tab. 17: Základní rozměry tratě v měření č. 6 .....	59
Tab. 18: Naměřené hodnoty v měření č. 6.....	59

Tab. 19: Hodnoty úrovně hladiny pro vzdálenost $x$ od koruny přelivu.....	60
Tab. 20: Základní rozměry tratě v měření č. 7 .....	61
Tab. 21: Naměřené hodnoty v druhém měření č. 7.....	61
Tab. 22: Základní rozměry tratě v měření č. 8 .....	61
Tab. 23: Naměřené hodnoty v měření č. 8.....	61
Tab. 24: Průtoky pro první tři měření.....	62
Tab. 25: Průtoky pro čtvrté až šesté měření.....	62
Tab. 26: Průtoky pro sedmé až osmé měření.....	63
Tab. 27: Vypočtené hodnoty opravných koeficientů $k_h$ .....	78
Tab. 28: Vypočtené koeficienty $k_b$ pro danou výšku $P$ a šířku $b$ .....	81
Tab. 29: Porovnání velikostí koeficientů vypočtených různými způsoby.....	82
Tab. 30: Výpočet účinné šířky na základě boční kontrakce od přepážek.....	83
Tab. 31: Rozdílný přístup k výpočtu poměru $b/B$ a následného určení $k_b$ .....	83
Tab. 32: Vypočtené hodnoty Coriolisova čísla pro daný profil s průřezovou rychlostí pro daný profil.....	84
Tab. 33: Hodnoty součinitelů přepadu pro různé autory a vstupní data .....	85

## 11.5 Seznam grafů

Graf 1: Závislost nejistoty zdroje posuvného měřidla na $h$ .....	64
Graf 2: Standartní nejistoty typu A pro jednotlivé výšky měrné trati č. 1 .....	65
Graf 3: Standartní nejistoty typu A s výslednou rozšířenou nejistotou pro průběh hladiny v měrné trati č.1 – měření průběhu hladin č.1 a č.5 .....	65
Graf 4: Standartní nejistoty typu A pro jednotlivé výšky měrné trati č. 2, šířky 0,02 m.....	66
Graf 5: Standartní nejistoty typu A pro průběh hladiny měrné trati č. 2 šířky 0,02 m .....	67
Graf 6: Standartní nejistoty typu A pro jednotlivé výšky měrné trati č. 2 šířky 0,03 m.....	67
Graf 7: Standartní nejistoty typu A pro jednotlivé výšky měrné trati č. 2 šířky 0,05 m.....	68
Graf 8: Závislost standartní nejistoty typu B ocelového pásového metru na šířce.....	69
Graf 9: Závislost standartní nejistoty typu A pro ocelový pásový metr na šířce .....	69
Graf 10: Kalibrační křivka pro ELA SMQI 99 .....	70
Graf 11: Kalibrační křivka pro Sima FC3 .....	71
Graf 12: Nejistota $C_d$ pro trať č. 1, měření č. 4.....	71
Graf 13: Nejistota $C_d$ pro trať č. 1, měření 3.....	72
Graf 14: Nejistota $C_d$ pro trať č. 1, měření č. 2.....	73
Graf 15: Nejistota $C_d$ pro trať č. 1, měření č. 1.....	73

Graf 16: Nejistota $C_d$ pro trať č. 2, měření č. 6.....	74
Graf 17: Nejistota $C_d$ pro trať č. 2, měření č. 7.....	74
Graf 18: Nejistota $C_d$ pro trať č. 2, měření č. 8.....	75
Graf 19: Relativní chyba vypočtených průtoků vůči průtokům z měření č. 4.....	76
Graf 20: Relativní chyba vypočtených průtoků vůči průtokům z měření č. 4 se započítáním nejistoty	76
Graf 21: Relativní chyba vypočtených průtoků vůči průtokům z měření č. 7 se započítáním nejistoty	77
Graf 22: Závislost koeficientu $k_h$ na šířce.....	78
Graf 23: Závislost $C_{ef}$ na šířce bez použití koeficientu $k_h$ a $k_b$ (koeficienty mají nulové hodnoty).....	79
Graf 24: Závislost $C_{ef}$ na šířce se započteným koeficientem $k_h$ .....	79
Graf 25: Míra ovlivnění přepadového součinitele v závislosti na šířce.....	80
Graf 26: Vyrovnaní hodnot efektivního přepadového součinitele použitím koeficientu $k_b$ .....	81
Graf 27: Součinitel hydraulického vlivu $k_b$ na šířku v závislosti na $b$ .....	82
Graf 28: Relativní chyba $C_{ef}$ se započítaným koeficientem ovlivnění $k_b$ od koeficientu bez započítaného $k_b$ .....	84
Graf 29: Relativní hodnoty součinitelů přepadů v závislosti na $h$ pro měření č. 4.....	85
Graf 30: Průběh hladin pro jednotlivá pole v měření č. 1.....	86
Graf 31: Průběh hladin pro měření č. 1, 5 a 6.....	86
Graf 32: Maximální relativní chyba se započítáním nejistot pro dané měření.....	87
Graf 33: Relativní chyba průběhu hladin pro měření č. 5 a č. 6 od měření č. 1 se započítáním nejistot pro jednotlivé výšky hladin.....	88
Graf 34: Výpočet Reynoldsova čísla pro jednotlivé průběhy hladin v závislosti na $h/P$ .....	88
Graf 35: Výpočet Weberova čísla pro jednotlivé průběhy hladin v závislosti na $h/P$ .....	89
Graf 36: Hodnoty Weberova a Reynoldsova čísla pro průběh hladin v závislosti na $h/P$ .....	89