



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVENBÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

MINIMÁLNÍ PŘEPADOVÁ VÝŠKA  
U TENKOSTENNÝCH PŘELIVŮ S TROJÚHELNÍKOVÝM  
VÝŘEZEM

MINIMAL OVERFLOW HEIGHT OF THIN-PLATE WEIR WITH TRIANGULAR NOTCH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

Dušan Vicena

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2020



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| <b>Studijní program</b>        | B3607 Stavební inženýrství                            |
| <b>Typ studijního programu</b> | Bakalářský studijní program s prezenční formou studia |
| <b>Studijní obor</b>           | 3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby            |
| <b>Pracoviště</b>              | Ústav vodních staveb                                  |

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

|                        |   |
|------------------------|---|
| <b>Student</b>         | Dušan Vicena  |
| <b>Název</b>           | Minimální přepadová výška u tenkostěnných přelivů s trojúhelníkovým výřezem |
| <b>Vedoucí práce</b>   | doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.  |
| <b>Datum zadání</b>    | 30. 11. 2019  |
| <b>Datum odevzdání</b> | 22. 5. 2020   |

V Brně dne 30. 11. 2019

---

prof. Ing. Jan Šule, CSc.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

Jandora, J., Šulc, J. 2006. Hydraulika. Brno: AN CERM.

Shen, J., 1981. Discharge Characteristics of Triangular-notch Thin-plate Weirs. US Geological Survey Water Supply Paper 1617-B.

ČSN ISO 1438, 2012. Hydrometrie - Měření průtoku vody v otevřených korytech pomocí tenkostěnných přelivů. Praha: Český normalizační institut.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Pojednání o tenkostěnných přelivech s trojúhelníkovým výřezem.

Pojednání o povrchovém napětí.

Změření minimální přepadové výšky.

Vyhodnocení změřené přepadové výšky ve vztahu k velikosti úhlu trojúhelníkového výřezu.

Závěr a zhodnocení.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP 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 VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP 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 VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

---

doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## **Abstrakt**

Bakalárska práca sa skladá z rešeršnej a experimentálnej časti. Obsahom rešeršnej časti je popis prepadu cez tenkostenný preliv s trojuholníkovým výrezom, popis povrchového napätia a prehľad odbornej literatúry zaoberajúcej sa meraním prepadu cez tenkostenný preliv s trojuholníkovým výrezom. Experimentálna časť obsahuje popis experimentálneho zariadenia, postup merania a výsledky merania. Výsledkom je vyhodnotenie nameraných hodnôt a stanovenie závislosti minimálnej prepadovej výšky na uhle trojuholníkového výrezu a porovnanie so vzťahmi uvedenými v odbornej literatúre.

## **Kľúčové slová**

Tenkostenný preliv s trojuholníkovým výrezom, povrchové napätie, minimálna prepadová výška, experimentálny výskum

## **Abstract**

The bachelor's thesis consists of research and experimental part. The content of research part is the description of the overflow height of thin-plate weir with triangular notch, description of surface tension and overview of literature dealing with measuring of overflow height of thin-plate weir. Experimental part contains the description of the experimental equipment, process of measurement and results of experiment. The results are evaluation of measured values and determination dependence of minimal overflow height on the angle of triangular notch and comparison with formulas given in scientific literature.

## **Key words**

Thin-plate weir with triangular notch, surface tension, minimal overflow height, experimental research



Bibliografická citácia VŠKP

Vicena Dušan, *Minimální přepadová výška u tenkostěnných přelivů s trojúhelníkovým výřezem*. Brno, 50 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.

Prehlásenie:

Prehlasujem, že som bakalársku prácu spracoval samostatne a že som uviedol všetky použité informačné zdroje.

V Brne, dňa 22. 5. 2020

.....

Dušan Vicena

Prehlásenie:

Prehlasujem, že elektronická forma odovzdanej práce je zhodná s odovzdanou papierovou formou.

V Brne, dňa 22. 5. 2020

.....

Dušan Vicena

#### Podakovanie:

V prvom rade by som chcel poďakovať vedúcemu práce pánovi doc. Ing. Zbyňku Zachovalovi, Ph.D., za rady pri vypracovaní práce a za čas strávený pri konzultáciách, taktiež by som chcel poďakovať pánovi Ing. Šimonovi Pospíšilíkovi za pomoc a čas strávený pri nastavovaní prelivu a taktiež ďakujem mojej rodine za podporu pri štúdiu.

# OBSAH

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1    | Úvod.....   | 11 |
| 2    | Cieľ práce.....   | 12 |
| 2.1  | Metóda riešenia.....  | 12 |
| 3    | Tenkostenné prelivy.....  | 13 |
| 3.1  | Rozdelenie tenkostenných prelivov.....  | 13 |
| 3.2  | Požiadavky na tenkostenné prelivy.....  | 14 |
| 3.3  | Rovnica prepadu.....  | 15 |
| 4    | Povrchové napätie.....  | 17 |
| 4.1  | Uhol zmáčania.....  | 18 |
| 4.2  | Kapilárna elevácia a depresia.....  | 18 |
| 5    | Rešerš prevedených experimentov.....  | 20 |
| 6    | Experiment.....   | 23 |
| 6.1  | Parametre modelu.....   | 23 |
| 6.2  | Zhotovenie experimentálneho zariadenia.....   | 24 |
| 6.3  | Konštrukčné požiadavky na zhotovenie prelivu podľa normy.....                                       | 24 |
| 6.4  | Chyby merania.....  | 24 |
| 6.5  | Meracie zariadenie.....   | 24 |
| 6.6  | Určenie nulovej hodnoty.....  | 25 |
| 6.7  | Postup merania.....   | 27 |
| 6.8  | Namerané hodnoty.....   | 30 |
| 6.9  | Prehľad niektorých nameraných výrezov – tvar hladiny vody pred začatím prepadu a počas prepadu..... | 32 |
| 7    | Vyhodnotenie.....   | 33 |
| 7.1  | Zhodnotenie výsledkov.....  | 34 |
| 7.2  | Zhodnotenie možných chýb pri meraní.....  | 34 |
| 8    | Porovnanie výsledkov experimentu s odbornou literatúrou.....  | 36 |
| 8.1  | Zhodnotenie výsledkov z porovnania.....   | 36 |
| 9    | Záver a zhodnotenie.....  | 38 |
| 10   | Zoznamy.....  | 39 |
| 10.1 | Zoznam použitej literatúry.....   | 39 |
| 10.2 | Zoznam použitých obrázkov.....  | 40 |
| 10.3 | Zoznam tabuliek.....  | 40 |
| 10.4 | Zoznam grafov.....  | 40 |

|      |                       |    |
|------|-----------------------|----|
| 10.5 | Zoznam veličín .....  | 41 |
| 10.6 | Zoznam skratiek ..... | 42 |

# 1 Úvod

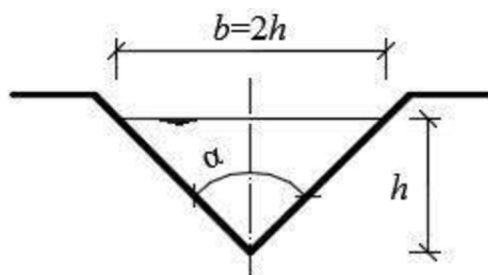
Meranie prietoku cez tenkostenné prelivy je zložitá činnosť. Na presné určenie prietoku, prepadovej výšky, geometrických parametrov prelivu alebo iných požadovaných veličín má vplyv mnoho faktorov. Preto sú väčšinou typy prelivov štandardizované.

Špecifikáciu tenkostenných prelivov s trojuholníkovým výrezom určuje norma ČSN ISO 1438 [1].

Tenkostenný preliv s trojuholníkovým výrezom je tvorený výrezom tvaru V vo zvislej stene. Stena prelivu musí byť rovinná, pevná a kolmá k stenám a dna koryta. Návodní líc steny musí byť hladký. Osa súmernosti výrezu musí byť zvislá a rovnako vzdialená od oboch stien koryta. Povrch stien výrezu musí predstavovať roviny, ktorých priesečnica s návodným lícom steny prelivu tvorí ostrú hranu.

Problém určenia prietoku nastáva pri prelivoch s trojuholníkovým výrezom, ktorého uhol  $\alpha$  je významne iný ako  $90^\circ$  (Obrázok 2 Typy prelivov [3]). Pri prelivoch s trojuholníkovým výrezom je obzvlášť obťažné určenie minimálnej prepadovej výšky, kvôli nedostatku výskumov zaoberajúcich sa obzvlášť malými uhlami výrezov.

Bakalárska práca sa zaoberá zistením závislosti minimálnej prepadovej výšky  $h_{min}$  na veľkosti uhlu trojuholníkového výrezu tenkostenného prelivu  $\alpha$ . Pre dosiahnutie minimálnej prepadovej výšky neovplyvnenej dolnou vodou je požadovaný dokonalý prepad vody. Prepadová výška je závislá na geometrických vlastnostiach prelivu, ako je uhol výrezu a fyzikálne vlastnosti vody, najmä povrchové napätie, ktoré je ovplyvnené teplotou vody, zmáčavosť a drsnosť povrchu.



Obrázok 1 Thompsonov preliv [3]

## 2 Cieľ práce

Cieľom bakalárskej práce je experimentálne stanovenie závislosti minimálnej prepadovej výšky na veľkosti uhlu trojuholníkového výrezu tenkostenného prelivu.

### 2.1 Metóda riešenia

Metóda riešenia spočíva v experimentálnom stanovení závislosti minimálnej prepadovej výšky na veľkosti uhlu trojuholníkového výrezu tenkostenného prelivu. Stanovenie závislosti je uskutočnené experimentálnym meraním a následným vyhodnotením výsledkov. Experimentálne meranie je uskutočnené na zariadení, ktoré je umiestnené v Laboratóriu vodohospodárskeho výskumu Ústavu vodných stavieb Fakulty stavebnej Vysokého učení technického v Brne.

Pre stanovenie sa berie do úvahy povrchové napätie. Predpokladá sa, že teplota vody a okolia je počas celého merania nemenná alebo nemá vplyv na jednotlivé výsledky meraní pri rôznych výrezoch. Tak isto sa predpokladá, že prítok vody neovplyvňuje pohyb hladiny. A meranie je uskutočnené v dostatočnej vzdialenosti od prepadovej hrany a stien, aby sa neprejavil vplyv kapilárnej depresie a elevácie. Prepad vody nebol ovplyvnený hladinou dolnej vody, bol dokonalý.

Meranie spočíva v stanovení minimálnej prepadovej výšky pri stúpajúcej hladine, ale aj pri hladine klesajúcej. Dôvod merania stúpajúcej aj klesajúcej hladiny je vplyv povrchového napätia, ktoré sa správa pri klesaní a stúpaní hladiny inak – dochádza ku kapilárnej depresii alebo elevácii. Každé meranie bolo opakované desať krát pre stanovenie rozsahu výsledkov. Meranie prebiehalo na deviatich výrezoch s rôznou veľkosťou uhlu výrezu, veľkosti výrezov boli v rozmedzí  $2,67^\circ$  až  $90^\circ$ . Toto rozmedzie uhlov bolo zvolené z dôvodu možnosti stanovenia krivky závislosti v širokom rozsahu hodnôt uhla, to znamená, aby začiatok výslednej krivky závislosti bol čo najbližšie k nule a taktiež z dôvodu použitia v praxi, výrezy s menšími uhlami nemusia byť dostatočne presne vyrobené. Výrezy s uhlom väčším ako  $90^\circ$  sú ťažko zmerateľné, nakoľko hladina prepadajúcej vody nemusí byť zhodná na oboch stranách koruny prelivu.

Očakávaným výsledkom práce je vzťah a graf pre závislosť minimálnej prepadovej výšky na veľkosti uhlu trojuholníkového výrezu tenkostenného prelivu pri stúpajúcej a taktiež aj pri klesajúcej hladine.



### 3 Tenkostenné prelivy

Tenkostenné prelivy, alebo inak nazývané ostrohranné prelivy, sú také prelivy, u ktorých sa pri prepade prúd vody odtrhne od návodnej hrany koruny prelivu a vzniknutý prepádový paprsok vody nie je ovplyvňovaný prelivom. Podmienkou pre prepád vody cez ostrú hranu je splnenie podmienky hrúbky steny prelivu

$$t < 0,66 h \quad (1)$$

kde  $h$  je prepádová výška. Prepádová výška  $h$  je prevýšenie hladiny nad najnižším bodom prelivnej hrany. Najčastejšie využitie ostrohranných prelivov je meranie prietokov, pretože sú experimentálne najlepšie overené. [2]

Prepad je fyzikálny dej, ktorý sa definuje ako výtok kvapaliny otvorom bez horného uzavretia alebo otvorom, pri ktorom hladina nedosahuje horný obrys otvoru.

Dokonalý prepád nastáva, ak prietok vody nie je ovplyvňovaný hladinou dolnej vody.

Nedokonalý prepád nastáva, ak je hladina dolnej vody nad úrovňou prepádovej hrany a zároveň hladina dolnej vody znižuje prepádové množstvo. [2] [3]

#### 3.1 Rozdelenie tenkostenných prelivov

Delenie tenkostenných prelivov je určené podľa tvaru výrezu prelivu. Tvar výrezu môže byť jednoduchý alebo zložený.

Jednoduché tvary tenkostenných prelivov sú:

- Tenkostenný preliv s obdĺžnikovou prelivnou hranou (Bazinov preliv).
- Tenkostenný preliv s trojuholníkovou prelivnou hranou (pre  $90^\circ$  Thompsonov preliv).
- Tenkostenný preliv s lichobežníkovou prelivnou hranou (pre sklon 1:4 Cipolettiho preliv).
- Tenkostenný preliv s kruhovou prelivnou hranou.
- Tenkostenný preliv s parabolickou prelivnou hranou.
- Iné.[5]

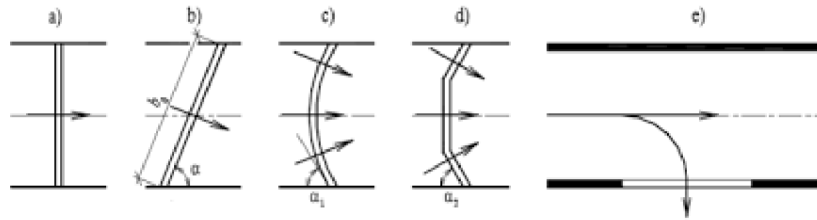
Najviac používané sú Bazinov, Thompsonov a Cipolettiho preliv. Názvy prelivov sú odvodené od autorov, ktorí sa ako prvý (obsiahle) zaoberali výskumom týchto typov prelivov.

Tenkostenné prelivy sa taktiež delia podľa bočného zúženia. Preliv bez bočného zúženia má šírku koryta a šírku výrezu v každej úrovni nad korunou prelivu rovnakú. O preliv s bočným zúžením ide ak prítokové koryto je aspoň v jednej úrovni výrezu širšie ako výrez v prelive.

Tenkostenné prelivy sa taktiež delia podľa pôdorysného umiestnenia prelivnej hrany k pritekajúcemu prúdu (Obrázok 2):

- a) Čelné prelivy, prelivná hrana je umiestnená k nabiehajúcemu prúdu vody kolmo.
- b) Šikmé prelivy, prelivná hrana je umiestnená k nabiehajúcemu prúdu vody šikmo.
- c) Oblúkové prelivy, prelivná hrana má pôdorysne tvar oblúku, prúd vody má premenný smer po dĺžke koruny prelivu.
- d) Lomené prelivy, prelivná hrana je pôdorysne lomená, prúd vody má premenný smer po dĺžke koruny prelivu.

- e) Bočné prelivy, prelivná hrana neprehradzuje koryto, je buď kolmá na osu prúdu alebo je od nej odklonená.
- f) Labyrintové prelivy.



Obrázok 2 Typy prelivov [3]

Tenkostenné prelivy sa taktiež rozdeľujú na prelivy pevné a pohyblivé.

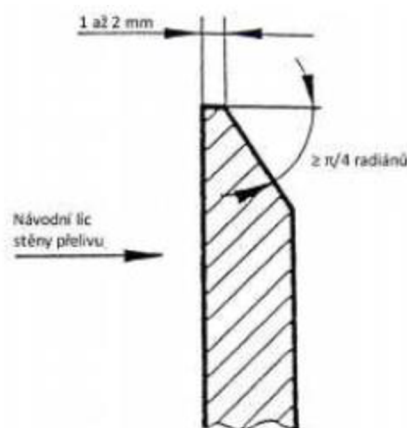
- Pevný preliv – preliv s pevnou výškou prelivnej hrany.
- Pohyblivý preliv – preliv, pri ktorom je možné meniť výšku alebo dĺžku prelivnej hrany. [3]

Rovnoramenný trojuholníkový preliv je preliv, ktorého výrez má tvar V. Trojuholníkové (rovnoramenné) prelivy sa od seba líšia stredovým uhlom. Ide o prelivy s bočným zúžením.

### 3.2 Požiadavky na tenkostenné prelivy

Medzi požiadavky na tenkostenné prelivy patria:

- Dosiachnutie vyvinutého rýchlostného profilu pritekajúceho prúdu v prítokovom koryte, aby nedošlo k negatívnemu ovplyvneniu prepadu. Uvedené podmienky treba dosiahnuť dlhým priamym prítokovým korytom alebo umiestnením usmerňovacieho telesa kolmo na smer pritekajúcej vody. Funkciu usmerňovacieho telesa môže spĺňať napríklad dierované kovové sito, lamely.
- Zvislosť steny prelivu.
- Hladkosť steny prelivu.
- Jednostranné zošíkmenie hrany vonkajšej strany prelivu pod uhlom väčším ako  $\pi/4$  (Obrázok 3). [1]



Obrázok 3 Detail koruny prelivu [1]

### 3.3 Rovnica prepadu

Rovnica prepadu sa odvodí na základe dosadenia rovnice vyjadrujúcej šírku prelivu  $y$  v úrovni  $z = h - K$ , kde  $h$  je prepadová výška a  $K$  vyjadruje vzdialenosť úrovne  $z$  od hladiny (Obrázok 4)

$$y = 2(h - K) \tan \frac{\alpha}{2}. \quad (2)$$

Tento vzťah sa dosadí do rovnice pre výpočet prepadu cez ostrú hranu

$$Q = C\sqrt{2g} \int_0^h \left(K + \frac{\alpha v_0^2}{2g}\right)^{1/2} y dK, \quad (3)$$

kde  $C$  je súčiniteľ prepadu,  $g$  je tiažové zrýchlenie,  $\alpha$  je súčiniteľ kinetickej energie a  $v_0$  je prietoková rýchlosť. V prípade zanedbania vplyvu prítokovej rýchlosti v rovnici (3) sa dosadením rovnice (2) do rovnice (3) získa vzťah pre výpočet prietoku cez trojuholníkový preliv

$$Q = C\sqrt{2g} \int_0^h K^{1/2} \left[2(h - k) \tan \frac{\alpha}{2}\right] dK = 2C\sqrt{2g} \tan \frac{\alpha}{2} \left[h \int_0^h K^{1/2} dK - \int_0^h K^{3/2} dK\right]. \quad (4)$$

Po integrácii má rovnica (4) tvar

$$Q = 2C\sqrt{2g} \tan \frac{\alpha}{2} \left[h \frac{2}{3} h^{3/2} - \frac{2}{5} h^{5/2}\right]. \quad (5)$$

Rovnica (5) sa ďalej upraví na vzťah

$$Q = \frac{8}{15} C\sqrt{2g} \left(\tan \frac{\alpha}{2}\right) h^{5/2}. \quad (6)$$

Z rozmerovej analýzy za výše uvedeného predpokladu zanedbania vplyvu prietokovej rýchlosti (geometrické parametre prietokového korytá sú oproti rozmerom prelivu veľké) vyplýva [4], že súčiniteľ  $C = f(\alpha, Re, We)$ , kde  $Re$  je Reynoldsovo číslo a  $We$  je Weberovo číslo.

Za predpokladu, že sa rýchlosť  $v$  v číslach vypočíta na základe rovnice pro výtok otvorom ideálnej kvapaliny, tak Reynoldsovo číslo je

$$Re = \frac{(2g)^{1/2} h^{3/2}}{v} \quad (7)$$

a Weberovo číslo je

$$We = \frac{2\rho g h^2}{\sigma}, \quad (8)$$

kde  $\rho$  vyjadruje hustotu,  $\nu$  kinematickú viskozitu kvapaliny a  $\sigma$  povrchové napätie.

Špecifickým prípadom rovnoramenného prelivu je preliv ktorého hodnota stredového uhla je  $90^\circ$ . Tento preliv sa nazýva Thompsonov preliv. Thompson po experimentálnom preskúmaní tohto typu prelivu, kde platí  $\alpha = 90^\circ$  a  $\tan(\alpha/2) = 1,0$  (Obrázok 1), stanovil rovnicu pre výpočet prietoku

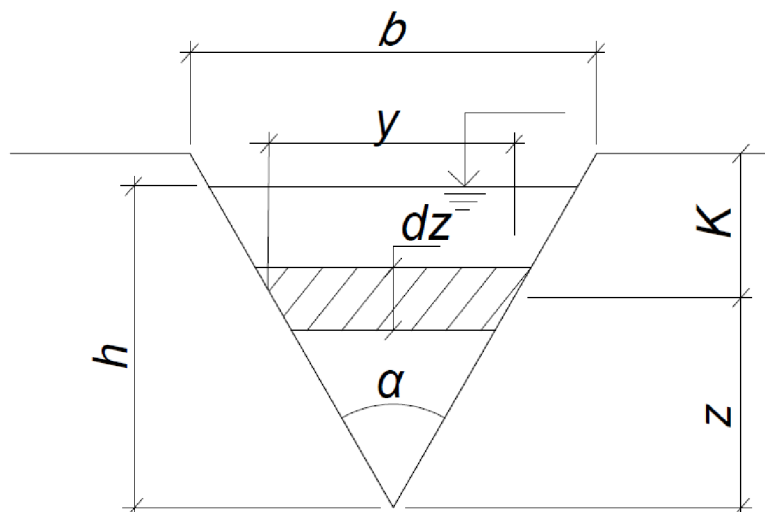
$$Q = 1,4h^{5/2}. \quad (9)$$

Táto rovnica platí ak sú splnené nasledovné podmienky [2] [3]:

$$B \geq 8h, \quad (10)$$

$$S_1 \geq 3h, \quad (11)$$

kde  $B$  je šírka prietokového korytá a  $S_1$  je výška prelivu.



Obrázok 4 Preliv s trojuholníkovým výrezom

## 4 Povrchové napätie

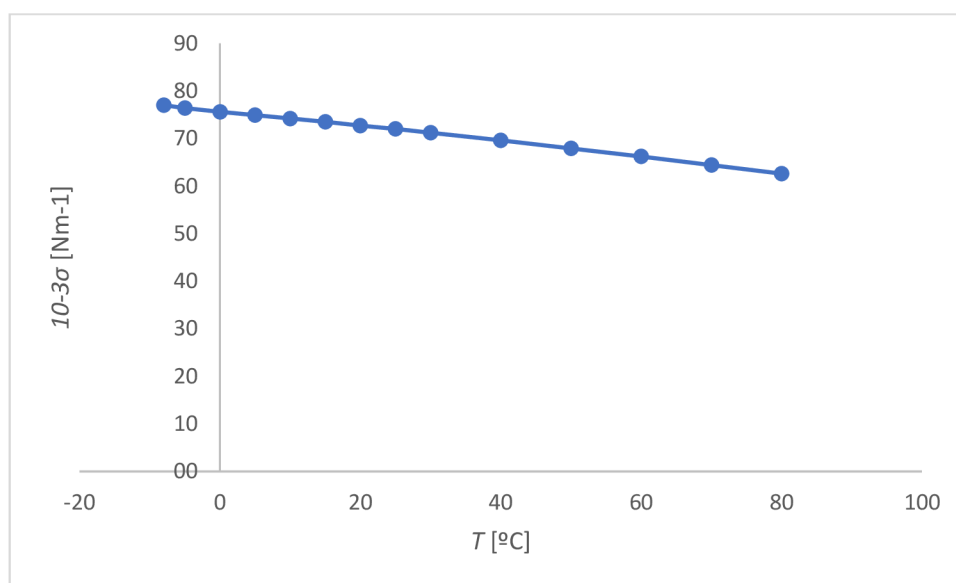
Povrchové napätie je fyzikálna vlastnosť kvapalín. Toto napätie pôsobí na kontaktnej ploche medzi kvapalinou a plynom alebo medzi dvoma nemiešajúcimi sa kvapalinami. Pôsobením povrchového napätia na styku kvapaliny s iným telesom dochádza k prilíhaniu. Povrchové napätie  $\sigma$  sa určuje ako výsledok účinku kohéznych síl  $F$ , vzťahujúcich sa na jednotku dĺžky  $l$  povrchu voľnej hladiny

$$\sigma = \frac{dF}{dl}. \quad (12)$$

Hodnota povrchového napätia  $\sigma$  je závislá na vlastnostiach kvapalín a plynov a taktiež na ich teplote. Pri teplote 20°C je hodnota povrchového napätia  $\sigma$  vody pri styku so vzduchom rovná  $\sigma = 0,0755 \text{ N/m}$ , hustota vody  $\rho$  je  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ .

Tabuľka 1 Závislosť povrchového napätia  $\sigma$  čistej vody na teplote  $T$  [6]

| $T$             | [°C]                | -8   | -5   | 0    | 5    | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   |
|-----------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $10^{-3}\sigma$ | [Nm <sup>-1</sup> ] | 77,0 | 76,4 | 75,6 | 74,9 | 74,2 | 73,5 | 72,7 | 72,0 | 71,2 | 69,6 | 67,9 | 66,2 | 64,4 | 62,6 |



Graf 1 Povrchové napätie  $10^{-3} \sigma$  čistej vody na styku so vzduchom v závislosti na teplote  $T$

Povrch kvapaliny je v napätom stave, kvôli pôsobeniu kohéznych síl. Takto vzniká povrchové napätie, ktoré vysvetľuje tvar kvapiek a tvar menisku medzi kvapalinou a stenou nádoby, zakrivenie hladiny a zdvihnutie alebo pokles kvapaliny v kapilárach. Príčinou vzniku povrchového napätia je nevyrovnané pôsobenie molekulárnych síl pričom na seba vzájomne pôsobia častice kvapaliny. Povrch kvapaliny je napnutý kvôli pôsobeniu tangenciálnych zložiek molekulárnych síl. Tento stav charakterizuje povrchové napätie  $\sigma$ . Povrchové napätie  $\sigma$  pôsobí vo všetkých smeroch plochy rozhrania, takže povrch kvapaliny má vlastnosti napätej tenkej blany.[6]

Pri hydraulických výpočtoch v praxi je povrchové napätie  $\sigma$  často zanedbávané, najčastejšie sa berie v úvahu pri kapilarite [2]. V prípade určenia minimálnej prepadovej výšky je však rozhodujúce.

## 4.1 Uhol zmáčania

Rozhranie medzi kvapalinou a vzduchom alebo medzi dvoma kvapalinami zvierá s tuhým povrchom (stenou nádoby) uhol zmáčania  $\varphi$ . Kvapalina môže zmáčať povrch neúplne alebo úplne. Neúplné zmáčanie nastane, ak sa kvapalina dotýka hydrofilného povrchu a úplné zmáčanie nastane pri povrchu hydrofóbnom. Pri čiastočnom zmáčaní je uhol  $\varphi$  v rozmedzí (0-90°), pri nezmáčanom povrchu je uhol  $\varphi$  väčší ako 90°, pri úplne zmáčanom povrchu je uhol  $\varphi$  presne 0°.

## 4.2 Kapilárna elevácia a depresia

Povrchové napätie a účinok molekulárnych síl sa prejavuje aj pri styku kvapaliny s pevnými stenami. Pri styku kvapaliny s pevnou stenou môžu nastať dva javy:

- Kapilárna elevácia – tento jav nastáva, ak kvapalina prilieha ku stene nádoby. Kvapalina v kapilárach a vo vlásočniciach stúpa a vytvorí sa vydutý meniskus.
- Kapilárna depresia – tento jav nastáva, ak kvapalina neprilieha ku stene nádoby. Kvapalina klesá a vytvorí sa vypuklý meniskus.

Povrchové napätie spôsobuje aj rozdiel medzi tlakmi na oboch stranách povrchu kvapaliny. Pôsobí kolmo k obmedzujúcim stranám zakrivenej plochy po obvode povrchu kvapaliny.

Kapilarita je vlastnosť kvapalín pri ktorej povrchové napätie spôsobuje kapilárnu eleváciu (zdvihnutie hladiny kvapaliny) alebo kapilárnu depresiu (zníženie hladiny kvapaliny) a to v tenkých štrbinách alebo v póroch zemín a hornín. Kapilárna výška  $h_{kap}$  je výška, o ktorú sa zmení úroveň hladiny kvapaliny. Pre kruhovú trubicu sa kapilárna výška určí podľa vzťahu

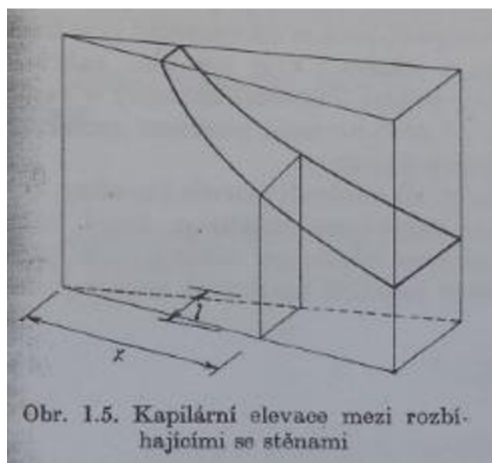
$$h_{kap} = \frac{4 \sigma \cos \varphi}{\rho g D}, \quad (13)$$

kde  $\sigma$  je povrchové napätie,  $\rho$  je hustota kvapaliny,  $D$  je priemer kruhovej trubice a  $\varphi$  je uhol medzi vektorom povrchového napätia a povrchom trubice. [2]

Kapilárna elevácia  $e_k$  v štrbine je nepriamo úmerná vzdialenosti stien  $l$  v otvore, a má polovičnú hodnotu ako pri kruhovej kapiláre o priemere  $D$ . Pre výpočet kapilárnej elevácie  $e_k$  čistej vody na styku so vzduchom v štrbine s úplne zmáčaným povrchom sa používa vzťah

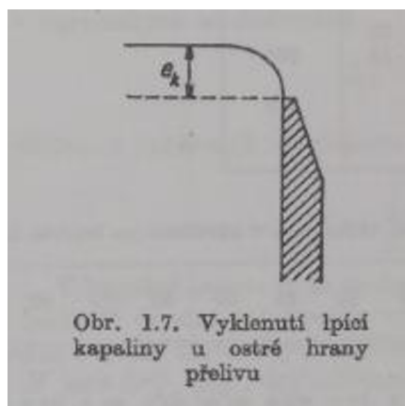
$$e_k = \frac{2\sigma}{\rho g l}. \quad (14)$$

Medzi dvoma zvislými stenami, ktorých vzdialenosť nie je konštantná je hodnota kapilárnej elevácie priliehajúcej kvapaliny premenlivá (Obrázok 5 Kapilárna elevácia medzi rozchádzajúcimi sa stenami [3]). [7]



Obrázok 5 Kapilárna elevácia medzi rozchádzajúcimi sa stenami [3]

Kapilarita kvapaliny priliehajúcej pri prelivnej hrane má vplyv na presnosť merania prietokov pri prelivoch pri malých prepadových výškach. [6]



Obrázok 6 Efekt kapilarity na ostrohrannom prelive[3]

Kapilarita kvapaliny môže mať vplyv aj na presnosť merania pri experimente. Pri meraní hladiny vody hrotovým meradlom môže hodnota kapilárnej elevácie vystúpiť približne až na 3 mm, čo môže mať za následok ovplyvnenie výsledkov.

## 5 Rešerš prevedených experimentov

Problematikou tenkostenných prelivov sa v minulosti zaoberali už viacerí vedci. Veľmi podobnú štúdiu na stanovenie závislosti prepadovej výšky na uhle otvoru na tenkostennom prelive s trojuholníkovým výrezom už spravil pán John Shen. Svoje výsledky publikoval v knihe *Discharge Characteristics of Tirangular-notch Thin-plate Weirs* [4], kde zhrnul viaceré pokusy vedcov zaoberajúcich sa touto problematikou.

Vedci zaoberajúci sa touto problematikou boli Barr, Cone, Yarnall, Greve, Lenz, Numachi a iní. Výsledkom ich pokusov boli vzťahy pre výpočet prepadového súčiniteľa  $C$ .

Barr sformuloval vzťah pre výpočet prepadového súčiniteľa pre uhol  $90^\circ$

$$C = 0,566 + \frac{0,0157}{\sqrt{h}}. \quad (15)$$

Cone testoval výrezy s uhlami  $120^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $30^\circ$  a  $28^\circ$ . Dospel k rovnici

$$C = \frac{0,576}{hj} + \frac{0,00584}{shj}. \quad (16)$$

kde  $S$  je sklon strán výrezu a  $j$  má hodnotu podľa vzťahu

$$j = \frac{0,0195}{S^{0,75}}. \quad (17)$$

Yarnall skúmal výrezy s uhlami  $90^\circ$ ,  $53,8^\circ$ ,  $27^\circ$  a  $13,8^\circ$ .

Greve vykonal najrozsiahlejší výskum. Pokusy robil až na 16 výrezoch s uhlami od  $25^\circ 03'$  do  $118^\circ 11'$ . Dospel k rovnici platiacej pre uhly výrezu od  $20^\circ$  do  $120^\circ$ .

$$C = \frac{0,585}{\left(\tan\frac{\alpha}{2}\right)^{0,004h^{0,03}}}. \quad (18)$$

Pre výpočet prietoku  $Q$  platí základný vzorec:

$$Q = C \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\frac{\alpha}{2} h^{\frac{5}{2}}. \quad (19)$$

Spracovaním výsledkov všetkých vedcov sa zostrojil graf závislosti efektívnej prepadovej výšky  $h_e$  na uhle trojuholníkového výrezu na tenkostennom prelive. [4]

Efektívna prepadová výška je súčtom prepadovej výšky  $h$  a opravnej výšky  $k_h$  (Obrázok 7 Závislosť opravnej výšky  $k_h$  na uhle výrezu  $\alpha$  [4]). Opravná výška zohľadňuje kombinovaný efekt viskozity a povrchového napätia. Tento postup odôvodnil Shen zistením, že vo všeobecnosti sú účinky oboch vlastností úmerné zvýšeniu výrezu a šírke výrezu.

To znamená že opravná výška  $k_h$  upravuje hodnotu súčiniteľa prepadu  $C$  z dôvodu vlastností povrchového napätia a trenia tak, aby bola jednoznačná závislosť prepadového súčiniteľa  $C$  na uhle výrezu.

Alternatívou stanovení hodnoty  $k_h$  je vzťah



$$k_h = k_{h0} \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (20)$$

kde  $k_{h0}$  je základná hodnota opravnej výšky.

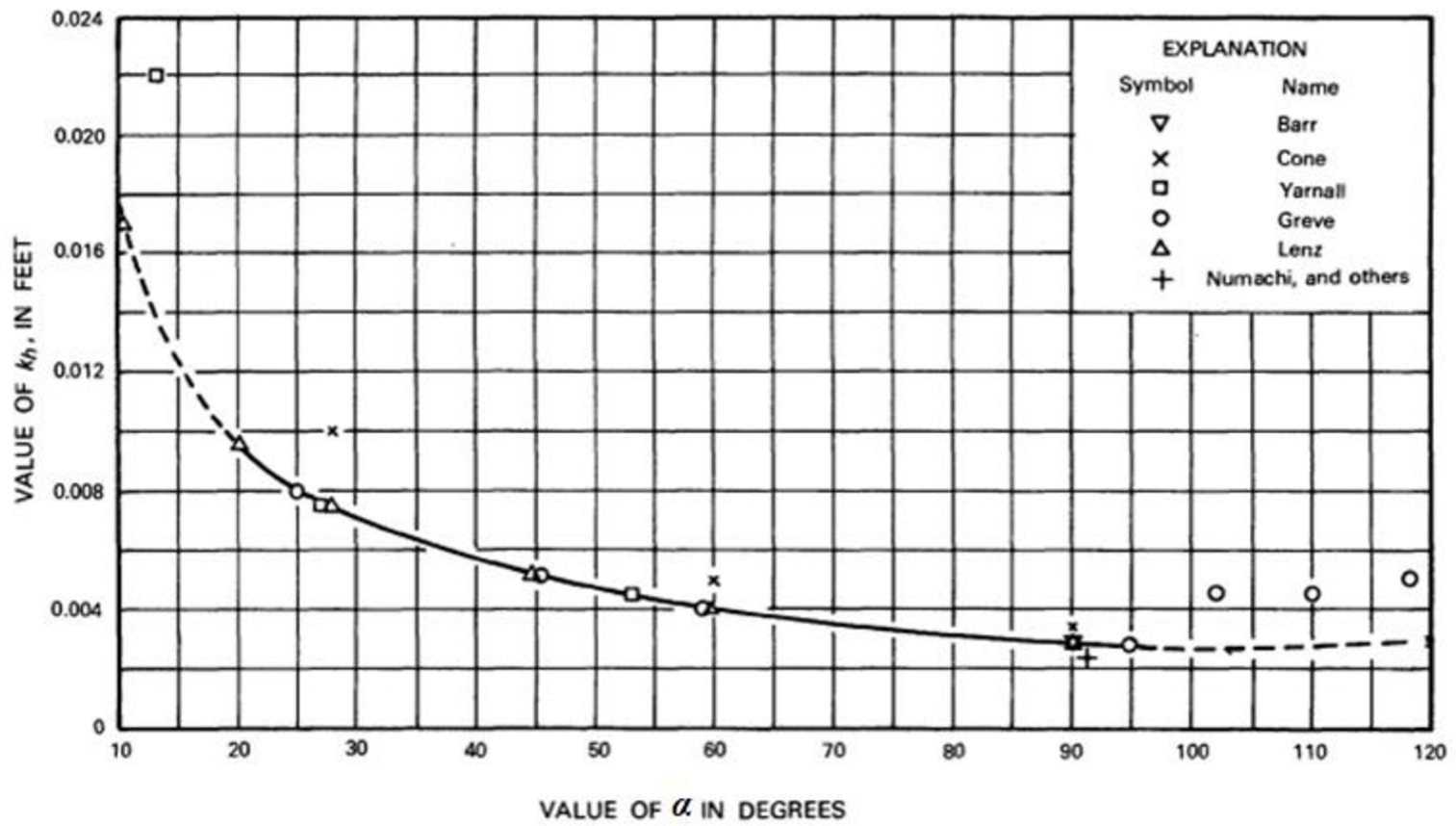
Po zistení hodnoty opravnej výšky  $k_h$  pre požadovanú tekutinu je možné pre výpočet prietoku  $Q$  použiť vzťah

$$Q = C_e \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan \frac{\alpha}{2} h_e^{\frac{5}{2}}. \quad (21)$$

kde  $C_e$  je efektívny prepadový súčiniteľ a  $h_e$  je efektívna prepadová výška, vyjadrená pomocou vzťahu

$$h_e = h + k_h. \quad (22)$$

Obrázok 7 Závislosť opravenej výšky  $k_h$  na uhle výrezu  $\alpha$  [4]

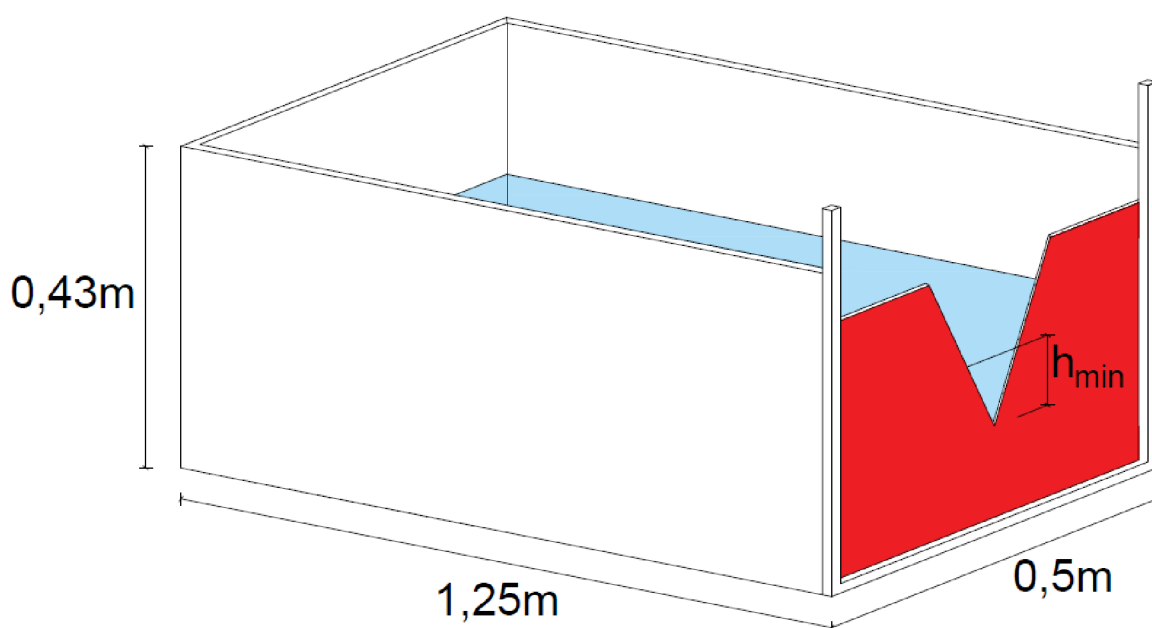


FLOW OF WATER OVER WEIRS AND DAMS

## 6 Experiment

### 6.1 Parametre modelu

Experiment bol uskutočnený v Laboratóriu vodohospodárskeho výskumu Ústavu vodných stavieb Fakulty stavebnej Vysokého učení technického v Brne. Žľab, v ktorom je preliv vložený je obdĺžnikovej podstavy s tromi stenami a predná stena je tvorená rámom s možnosťou pripevnenia prelivnej steny s trojuholníkovým výrezom. Vnútorňa výška žľabu je 0,45 m, vnútorňa šírka je 0,54 m a vnútorňa dĺžka je 1,23 m. Na obrázku 8, červená časť predstavuje vymeniteľnú prelivnú stenu a minimálna prepadová výška  $h_{min}$  je vzdialenosť najnižšej časti výrezu prelivu a hladiny vody, kedy ešte nedochádza k prepadu.



Obrázok 8 Vonkajšie rozmery žľabu

Vymeniteľné tenkostenné prelivy sú vyrobené z plechu z nerezovej oceli hrúbky  $t = 0,001$  m. Steny a dno žľabu sú z vodovzdorných preglejok hrúbky 0,018 m. Prítok vody je zabezpečený hadicou vyvedenou v časti žľabu s tlmiacim priestorom, ktorá je pevne pripevnená k stene žľabu. Prítoková hadica je napojená na okruh v laboratóriu (obrázok 16). Voda bola čerpaná zo zásobných nádrží pomocou čerpadla. Na čerpadle bolo možné nastaviť požadovaný prietok pomocou zmeny frekvencie čerpadla (obrázok 15). Prítoková hadica a prelivná hrana sú oddelené plastovou sieťovinou, ktorej účelom je zmiernenie turbulencií a vírenia vody. Prelivná stena je pripevnená k žľabu kolmo na dno. Kolmost' zabezpečuje podporný rám (Obrázok 14) a skrutky na presné doladenie zvislosti prelivnej steny. Na prelivnú stenu sa umiestňuje žliabok, ktorý usmerňuje prúd prepadávajúcej vody do zásobnej nádrže, ktorá je prepojená so doplnkovými zásobnými nádržami.

## 6.2 Zhotovenie experimentálneho zariadenia

Zhotovenie zariadenia sa skladalo z:

- Zhotovenie konštrukcie podporného rámu pre uchytenie prelivnej steny.
- Zhotovenie prelivných stien (nerezový plech).
- Inštalácia prelivných stien na miesto (umiestnenie, vyrovnanie do vodorovnej a zvislej polohy).
- Inštalácia prírodných hadíc, napojenie hadice na čerpadlo a cirkulačný obvod.
- Inštalácia meracieho zariadenia (posuvné digitálne hrotové meradlo).

## 6.3 Konštrukčné požiadavky na zhotovenie prelivu podľa normy

Konštrukcia prelivu musí byť zhotovená tak, aby bola zabezpečená vodotesnosť a pevnosť priesečníkov stien prelivu s dnom a stenami koryta. Preliv musí byť zhotovený tak, aby odolával maximálnemu prítoku bez poškodenia a deformácií.

V prípade potreby skrátenia prítokového koryta je možné na prítoku vody umiestniť usmerňovač prúdu, ktorého účelom je zaistenie pravidelného a stáleho rozloženia rýchlosti.[1]

## 6.4 Chyby merania

Výsledky merania nemusia byť vždy presné. Rozdiel medzi správnou, ale neznámou hodnotou a hodnotou nameranou sa nazýva chyba merania. Chyby merania v sebe zahŕňa koncepcia neistoty.

Neistotu merania zahŕňa rozptyl hodnôt, ktoré sú priradené danému meraniu. Objektívne hodnoty sú poskytované štatistickými metódami, ktoré sú založené na teoretických podkladoch.

Štandardná neistota je podľa normy ČSN ISO 1438 definovaná ako:

Štandardná neistota odpovedá rozptylu výsledkov merania vyjadrených pomocou smerodajnej odchýlky. [1]

## 6.5 Meracie zariadenie

Na meranie hladiny vody bolo použité digitálne hrotové meradlo (obrázok 10). Meradlo bolo umiestnené na konštrukcii nad korytom. Konštrukcia bola pohyblivá, s možnosťou merania hladiny a stanovenia východiskovej nulovej hodnoty na prelivnej stene (Obrázok 16).

Nulová hodnota bola umiestnená v najnižšom bode výrezu prelivnej steny. Východzia nulová hodnota sa stanovovala pre každý výrez samostatne.

Digitálne hrotové meradlo odpočítavalo hodnoty s presnosťou na stotinu milimetru.

Chyba merania hrotového meradla mohla byť spôsobená vplyvom kolísania hladiny, prevedenia hrotu alebo nie presne zvislým a vodorovným uchytením konštrukcie meradla. Táto chyba bola odhadnutá na  $\pm 0,1$  mm.

Meranie hladiny spočívalo v približnom približovaní hrotu meradla k hladine. V momente styku meradla s hladinou bola odpočítaná hodnota z digitálneho displeju.

## 6.6 Určenie nulovej hodnoty

Východzia nulová hodnota pre experiment bola stanovená podľa postupu z normy ČSN ISO 1438 [1]. Postup je nasledovný:

1. Hladina vody v prítokovom koryte sa zníži pod úroveň výrezu.
2. V koryte sa nainštaluje dočasné meradlo.
3. Valec dokonalého tvaru a známeho priemeru (zmeraného mikrometrom) sa umiestni horizontálne podľa pozdĺžnej osy tak, aby jeden jeho koniec spočíval vo výreze a druhý koniec na hrote meradla. Presná vodováha sa položí na vrchol valca a dočasné meradlo sa zafixuje v polohe, keď je valec presne vodorovný. Zmeraná hodnota meradla sa zaznamená.
4. Dočasné meradlo sa spustí na hladinu vody a jeho odpočet sa zaznamená.
5. Vzdialenosť  $y_{vavec}$  od vrchnej časti valca k vrcholu trojuholníkového výrezu sa vypočíta podľa známej hodnoty vrcholového uhlu výrezu a polomeru valca  $r$  ako

$$y_{vavec} = \left( r / \sin \frac{\alpha}{2} \right) + r. \quad (23)$$

Táto vzdialenosť sa potom odpočíta podľa bodu 3. Výsledkom je odpočet dočasného meradla na vrchole výrezu.

6. Rozdiel medzi odpočtom vypočítaným v bode 5 a odpočtom meradla v bode 4 sa pripočíta k odpočtu trvalého meradla v bode 4. Súčet týchto hodnôt stanovuje hodnotu nuly trvalého meradla.

Táto metóda bola následovne upravená pre experiment (Obrázok 9):

1. U dvoch valcov rôzneho priemeru je posuvným meradlom určený priemer  $d_i$  (1 – malý valec, 2 – veľký valec).

2. Tieto valce sa vložia do výrezu prelivu tak, aby osovo zvierali pravý uhol s rovinou dosky prelivu. Odľahlosť horných hrán valcov  $a_2$  umiestnených vo výreze sa zmeria hrotovým meradlom.

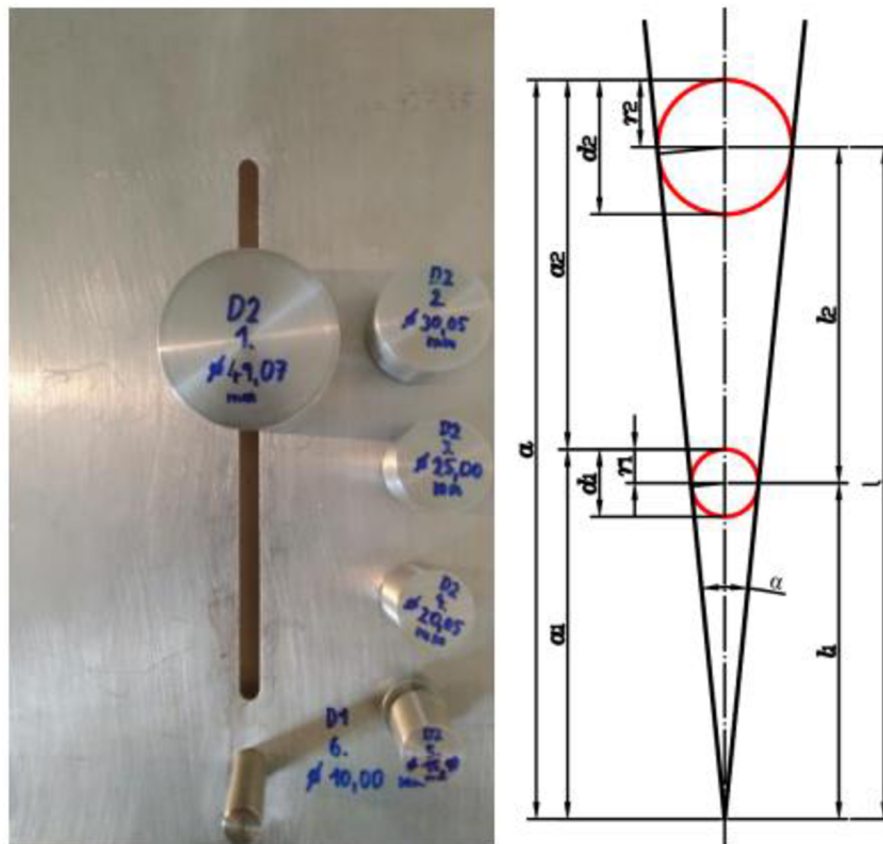
3. Uhol roztvorenia trojuholníkového výrezu sa spočíta z rovnice

$$\alpha = 2 \sin^{-1} \left( \frac{d_2 - d_1}{2a_2 + d_1 - d_2} \right) \quad (24)$$

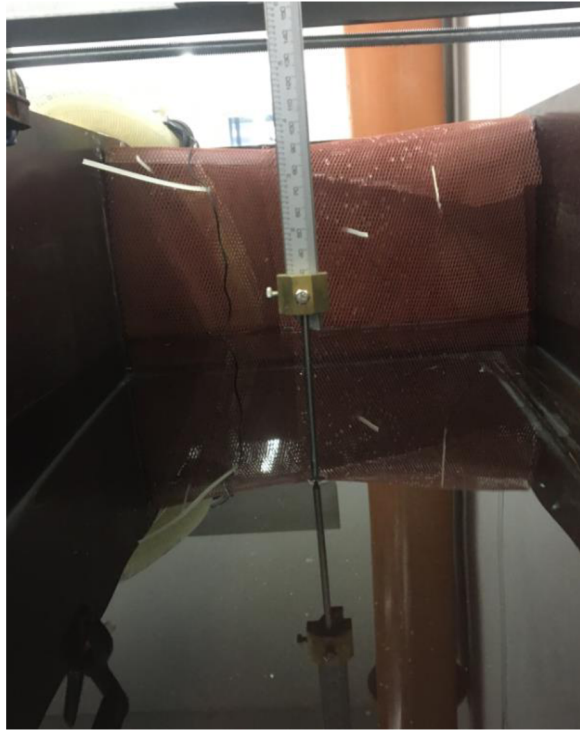
4. Vrchol výrezu určuje nulovú hodnotu na prelive. Stanovenie odľahlostí úrovne nuly odpočtu voči úrovni vrchnej časti horného valca  $a$  sa prevedie výpočtom pomocou rovnice

$$\alpha = \left( \frac{a_2 d_2}{d_2 - d_1} \right) \quad (25)$$

5. Pre zmeranie uhlu a úrovne vrcholu výrezu bolo na mieru vyrobené montážne zariadenie, ktoré sa skladalo z nosnej dosky s pevne umiestneným valcom o priemere 10 mm a drážkou slúžiacou k posuvnému umiestneniu ďalších valcov, sada valcov o priemere 15 –50 mm. [8]



Obrázok 9 Meracie zariadenie a schéma umiestnenia valcov[7]



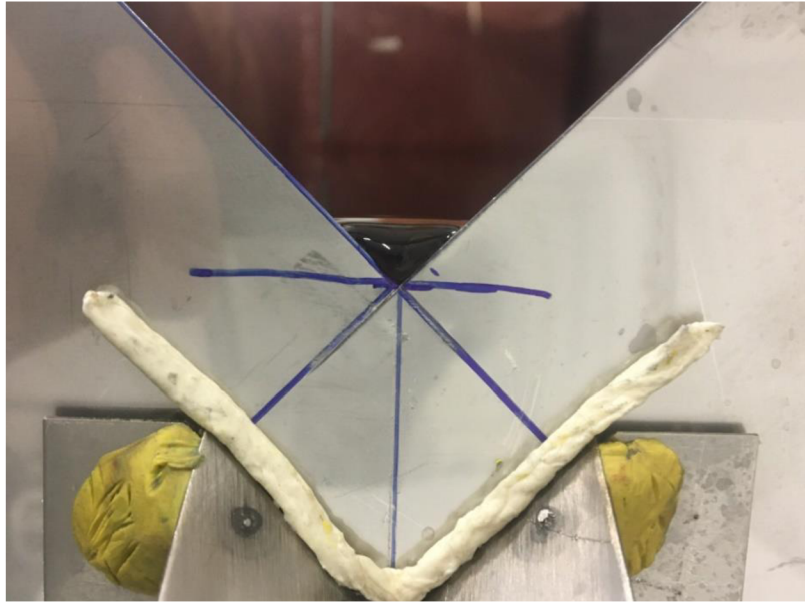
Obrázok 10 Hrotové meradlo

## 6.7 Postup merania

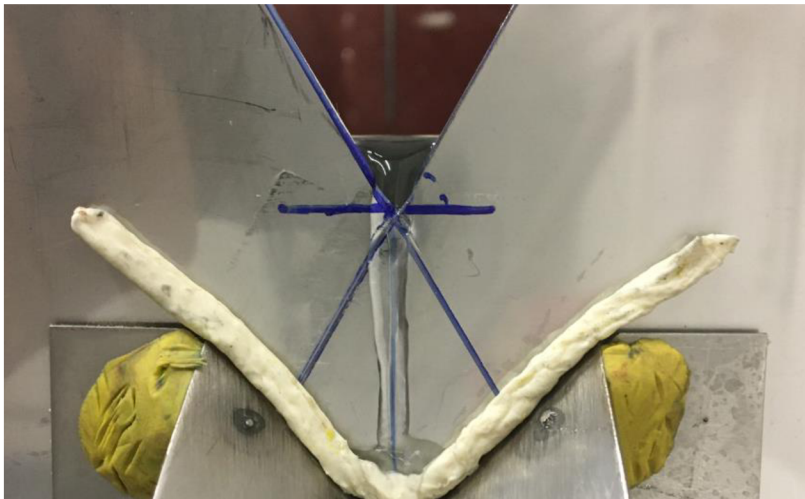
Meranie prebiehalo v nasledných krokoch:

1. Do žľabu bola nainštalovaná prelivná stena s požadovaným výrezom.
2. Bola stanovená východzia nulová hodnota.
3. Žľab bol napustený vodou pod najnižší bod výrezu.
4. Bola zmeraná teplota vody.
5. Žľab bol postupne napúšťaný pri malom prietoku (približne 0,1 l/s) pokiaľ voda nezačala prepadať cez výrez prelivu (Obrázok 12).
6. Uzavrel sa prítok vody a hladina bola zmeraná pomocou hrotového meradla – stanovenie minimálnej prepadovej výšky pri stúpajúcej hladine v koryte.
7. Z koryta sa začala voda vypúšťať cez výtokový otvor na dne koryta až po zastavenie prepadu cez výrez – stanovenie minimálnej prepadovej výšky pri klesajúcej hladine v koryte.
8. Meranie bolo opakované desať krát pre každý výrez.
9. Namerané hodnoty boli zapísane do tabuľky.
10. Bol zhotovený graf závislosti minimálnej prepadovej výšky na veľkosti uhlu trojuholníkového výrezu tenkostenného prelivu.





*Obrázok 11 Tvar hladiny tesne pred začatím prepadu pre uhol výrezu  $90^\circ$*



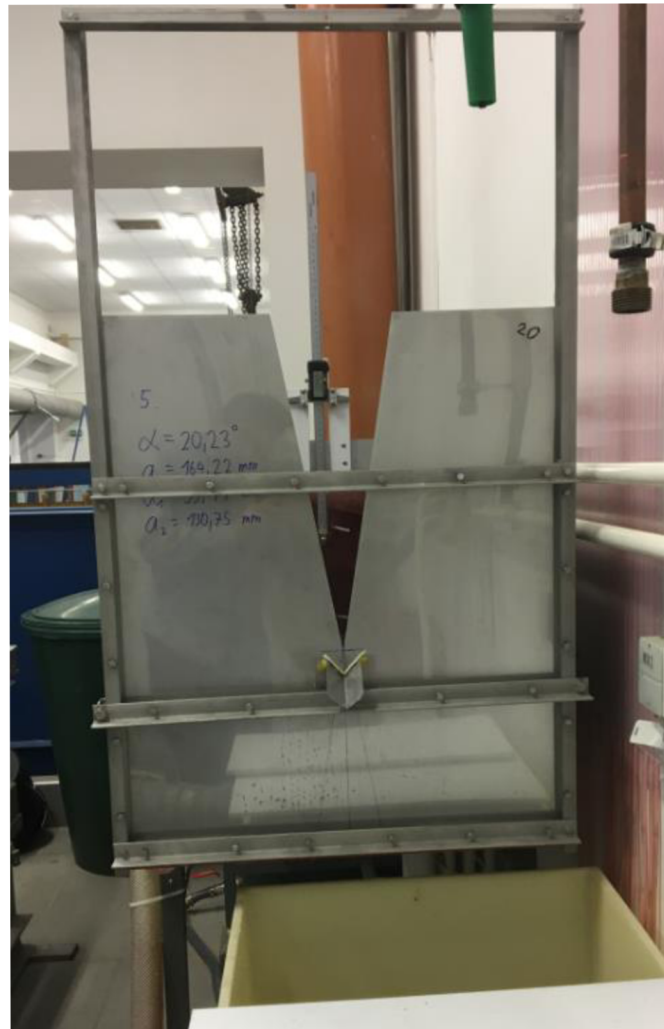
*Obrázok 12 Prepad vody cez trojuholníkový výrez s uhlom výrezu  $60,69^\circ$*



*Obrázok 13 Tvar prúdu prepádajúcej vody pri uhle výrezu  $10,19^\circ$  (pohľad z boku)*



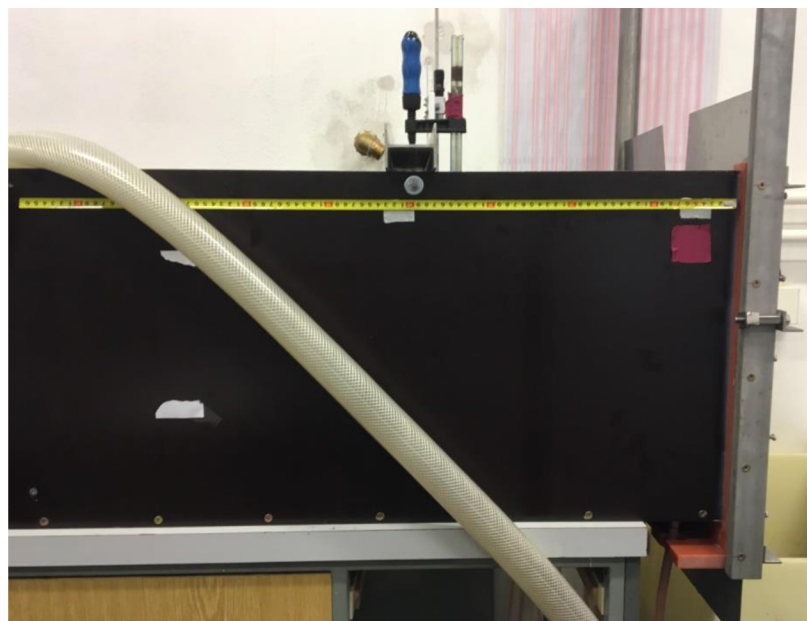
Pri experimente bol kladený veľký dôraz na čo najmenší prítok vody do koryta na zaistenie čo najpresnejšieho stanovenia minimálnej prepadovej výšky. Prítok vody pri experimente sa pohyboval okolo hodnoty 0,1 l/s.



Obrázok 14 Prelivná stena s trojuholníkovým výrezom, rám na uchytienie prelivnej steny



Obrázok 15 Čerpací systém



Obrázok 16 Pohľad na žlab z boku, uchytenie hrotového meradla

## 6.8 Namerané hodnoty

Pre každý výrez bolo zmeraných desať hodnôt minimálnej prepadovej výšky pre stúpajúcu a aj klesajúcu hladinu. Taktiež boli merané teploty vody. Namerané hodnoty popisuje tabuľka 2, 3 a 4.

Tabuľka 2 Namerané hodnoty pre uhol výrezu 2,67°, 5,26° a 10,19°

| $\alpha$   | 2,67                      |                           |      | 5,26                      |                           |      | 10,19                     |                           |      |
|------------|---------------------------|---------------------------|------|---------------------------|---------------------------|------|---------------------------|---------------------------|------|
| č. merania | $h_{min}$ - hladina stúpa | $h_{min}$ - hladina klesá | T    | $h_{min}$ - hladina stúpa | $h_{min}$ - hladina klesá | T    | $h_{min}$ - hladina stúpa | $h_{min}$ - hladina klesá | T    |
|            | [m]                       | [m]                       | [°C] | [m]                       | [m]                       | [°C] | [m]                       | [m]                       | [°C] |
| 1          | 0,0289                    | 0,0188                    | 17,7 | 0,0245                    | 0,0174                    | 16,1 | 0,0199                    | 0,0057                    | 15,4 |
| 2          | 0,0287                    | 0,0161                    | 17,8 | 0,0246                    | 0,0170                    | 16,2 | 0,0178                    | 0,0052                    | 15,4 |
| 3          | 0,0274                    | 0,0139                    | 17,8 | 0,0247                    | 0,0174                    | 16,3 | 0,0182                    | 0,0053                    | 15,4 |
| 4          | 0,0265                    | 0,0146                    | 17,8 | 0,0247                    | 0,0169                    | 16,3 | 0,0175                    | 0,0058                    | 15,4 |
| 5          | 0,0268                    | 0,0131                    | 17,9 | 0,0242                    | 0,0159                    | 16,3 | 0,0176                    | 0,0061                    | 15,5 |
| 6          | 0,0265                    | 0,0148                    | 17,9 | 0,0250                    | 0,0154                    | 16,3 | 0,0175                    | 0,0067                    | 15,5 |
| 7          | 0,0268                    | 0,0146                    | 17,9 | 0,0250                    | 0,0155                    | 16,3 | 0,0173                    | 0,0062                    | 15,5 |
| 8          | 0,0266                    | 0,0143                    | 17,8 | 0,0250                    | 0,0159                    | 16,4 | 0,0178                    | 0,0066                    | 15,5 |
| 9          | 0,0261                    | 0,0140                    | 17,9 | 0,0249                    | 0,0155                    | 16,4 | 0,0180                    | 0,0067                    | 15,5 |
| 10         | 0,0261                    | 0,0142                    | 17,9 | 0,0250                    | 0,0158                    | 16,4 | 0,0175                    | 0,0064                    | 15,5 |

Tabuľka 3 Namerané hodnoty pre uhol výrezu 15,18°, 20,23° a 25,22°

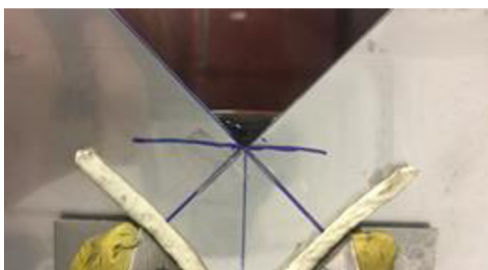
| $\alpha$   | 15,18                     |                           |      | 20,23                     |                           |      | 25,22                     |                           |      |
|------------|---------------------------|---------------------------|------|---------------------------|---------------------------|------|---------------------------|---------------------------|------|
| č. merania | $h_{min}$ - hladina stúpa | $h_{min}$ - hladina klesá | T    | $h_{min}$ - hladina stúpa | $h_{min}$ - hladina klesá | T    | $h_{min}$ - hladina stúpa | $h_{min}$ - hladina klesá | T    |
|            | [m]                       | [m]                       | [°C] | [m]                       | [m]                       | [°C] | [m]                       | [m]                       | [°C] |
| 1          | 0,0157                    | 0,0038                    | 15,3 | 0,0149                    | 0,0021                    | 14,5 | 0,0124                    | 0,0037                    | 16,0 |
| 2          | 0,0156                    | 0,0034                    | 15,2 | 0,0149                    | 0,0027                    | 14,5 | 0,0123                    | 0,0028                    | 16,0 |
| 3          | 0,0158                    | 0,0029                    | 15,3 | 0,0150                    | 0,0034                    | 14,4 | 0,0125                    | 0,0037                    | 16,1 |
| 4          | 0,0160                    | 0,0034                    | 15,4 | 0,0147                    | 0,0026                    | 14,4 | 0,0125                    | 0,0038                    | 16,1 |
| 5          | 0,0157                    | 0,0036                    | 15,4 | 0,0149                    | 0,0031                    | 14,4 | 0,0124                    | 0,0039                    | 16,1 |
| 6          | 0,0158                    | 0,0037                    | 15,5 | 0,0150                    | 0,0031                    | 14,4 | 0,0124                    | 0,0034                    | 16,2 |
| 7          | 0,0160                    | 0,0032                    | 15,5 | 0,0148                    | 0,0030                    | 14,3 | 0,0124                    | 0,0031                    | 16,2 |
| 8          | 0,0150                    | 0,0033                    | 15,5 | 0,0147                    | 0,0031                    | 14,3 | 0,0122                    | 0,0021                    | 16,2 |
| 9          | 0,0150                    | 0,0034                    | 15,5 | 0,0149                    | 0,0027                    | 14,4 | 0,0128                    | 0,0032                    | 16,2 |
| 10         | 0,0158                    | 0,0037                    | 15,5 | 0,0147                    | 0,0029                    | 14,4 | 0,0125                    | 0,0034                    | 16,2 |

Tabuľka 4 Namerané hodnoty pre uhol výrezu 30,54°, 60,69° a 90°

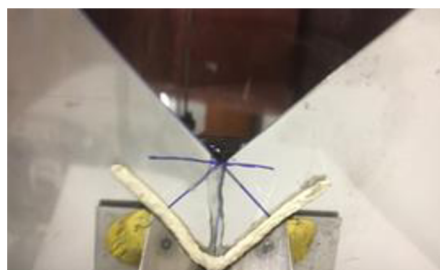
| $\alpha$   | 30,54                     |                           |      | 60,69                     |                           |      | 90                        |                           |      |
|------------|---------------------------|---------------------------|------|---------------------------|---------------------------|------|---------------------------|---------------------------|------|
| č. merania | $h_{min}$ - hladina stúpa | $h_{min}$ - hladina klesá | T    | $h_{min}$ - hladina stúpa | $h_{min}$ - hladina klesá | T    | $h_{min}$ - hladina stúpa | $h_{min}$ - hladina klesá | T    |
|            | [m]                       | [m]                       | [°C] | [m]                       | [m]                       | [°C] | [m]                       | [m]                       | [°C] |
| 1          | 0,0119                    | 0,0012                    | 15,7 | 0,0103                    | 0,0071                    | 14,0 | 0,0076                    | 0,0031                    | 15,7 |
| 2          | 0,0119                    | 0,0016                    | 15,7 | 0,0104                    | 0,0068                    | 14,0 | 0,0075                    | 0,0032                    | 15,6 |
| 3          | 0,0116                    | 0,0015                    | 15,7 | 0,0102                    | 0,0065                    | 14,0 | 0,0076                    | 0,0030                    | 15,6 |
| 4          | 0,0115                    | 0,0017                    | 15,7 | 0,0099                    | 0,0056                    | 14,0 | 0,0074                    | 0,0029                    | 15,6 |
| 5          | 0,0114                    | 0,0011                    | 15,7 | 0,0104                    | 0,0063                    | 14,0 | 0,0081                    | 0,0028                    | 15,6 |
| 6          | 0,0115                    | 0,0016                    | 15,7 | 0,0104                    | 0,0057                    | 14,0 | 0,0081                    | 0,0027                    | 15,6 |
| 7          | 0,0112                    | 0,0015                    | 15,7 | 0,0101                    | 0,0059                    | 14,0 | 0,0081                    | 0,0028                    | 15,6 |
| 8          | 0,0111                    | 0,0014                    | 15,8 | 0,0102                    | 0,0057                    | 14,0 | 0,0078                    | 0,0027                    | 15,6 |
| 9          | 0,0113                    | 0,0016                    | 15,8 | 0,0103                    | 0,0060                    | 14,0 | 0,0077                    | 0,0029                    | 15,6 |
| 10         | 0,0115                    | 0,0014                    | 15,8 | 0,0101                    | 0,0057                    | 14,0 | 0,0079                    | 0,0027                    | 15,6 |

## 6.9 Prehľad niektorých nameraných výrezov – tvar hladiny vody pred začatím prepadu a počas prepadu

Hladina minimálnej prepadovej výšky sa pri experimente líšila pri každom výreze. Dôležitým aspektom práce bolo presné zachytenie hladiny vody tesne pred začatím prepadu (Obrázok 17, 19 a 21) a tým stanovenie minimálnej prepadovej výšky. Na obrázkoch 18, 20, 22, 23 a 24 je vidieť prúd vody po prekonaní minimálnej prepadovej výšky počas prepadu.



Obrázok 17 Hladina vody pri uhle výrezu  $90^\circ$  (voda sa neprelieva, vplyvom povrchového napätia)



Obrázok 18 Hladina vody pri uhle výrezu  $90^\circ$  (voda sa prelieva)



Obrázok 19 Hladina vody pri uhle výrezu  $60,69^\circ$  (voda sa neprelieva, vplyvom povrchového napätia)



Obrázok 20 Hladina vody pri uhle výrezu  $60,69^\circ$  (voda sa prelieva)



Obrázok 21 Hladina vody pri uhle výrezu  $25,22^\circ$  (voda sa neprelieva vplyvom povrchového napätia)



Obrázok 22 Hladina vody pri uhle výrezu  $20,23^\circ$  (voda sa prelieva)



Obrázok 23 Hladina vody pri uhle výrezu  $16,67^\circ$  (voda sa prelieva)



Obrázok 24 Hladina vody pri uhle výrezu  $10,19^\circ$  (voda sa prelieva)

## 7 Vyhodnotenie

Bol zhotovený graf so všetkými nameranými hodnotami a graf, v ktorom boli body preložené aproximačnými krivkami spolu s koeficientami determinácie.

Z experimentu bol odvodený vzťah závislosti minimálnej prepadovej výšky na veľkosti uhlu trojuholníkového výrezu tenkostenného prelivu pre dve možné situácie:

- Hladina vody v koryte stúpa.
- Hladina vody v koryte klesá.

Výsledný vzťah závislosti minimálnej prepadovej výšky na veľkosti uhlu trojuholníkového výrezu tenkostenného prelivu pre stúpajúcu hladinu je

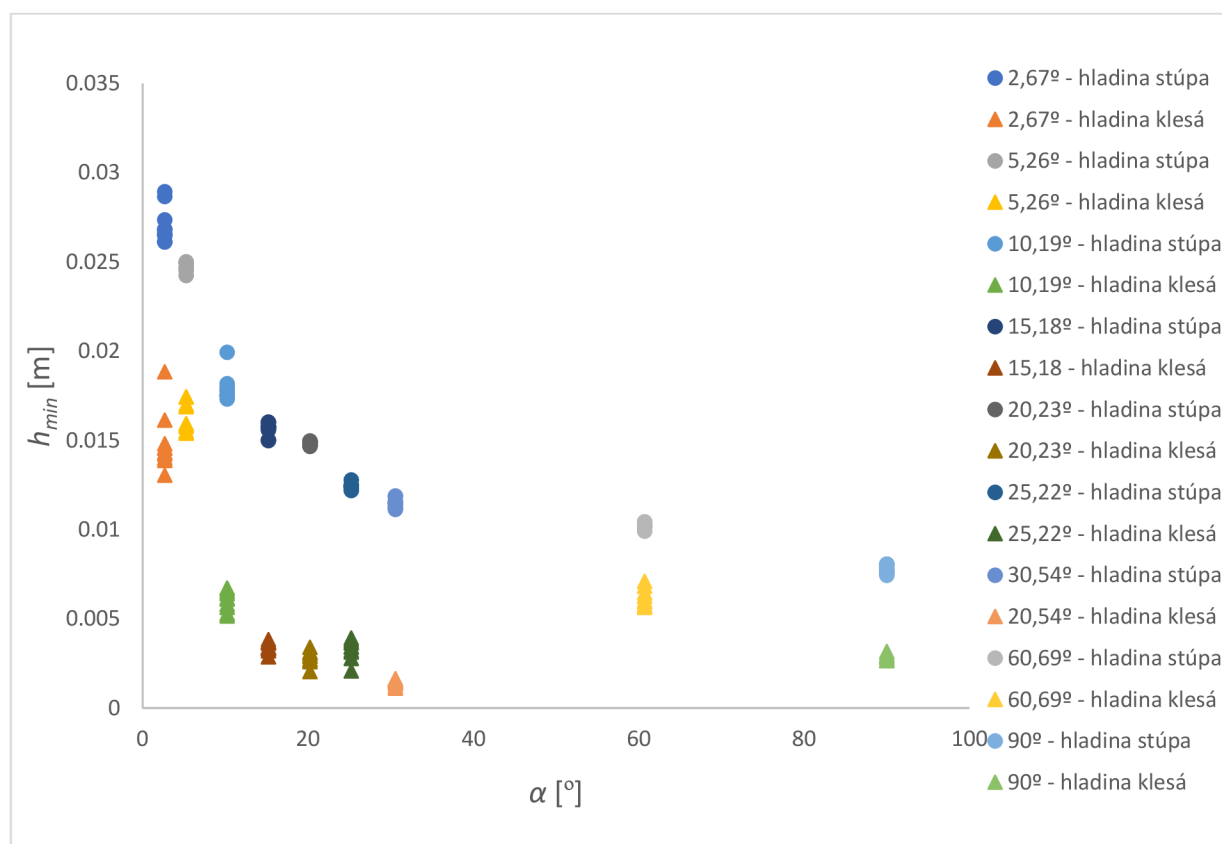
$$h_{min} = 0,4125 \alpha^{-0,359}. \quad (26)$$

Koeficient determinácie nadobúda hodnotu 0,98.

Výsledný vzťah závislosti minimálnej prepadovej výšky na veľkosti uhlu trojuholníkového výrezu tenkostenného prelivu pre klesajúcu hladinu je

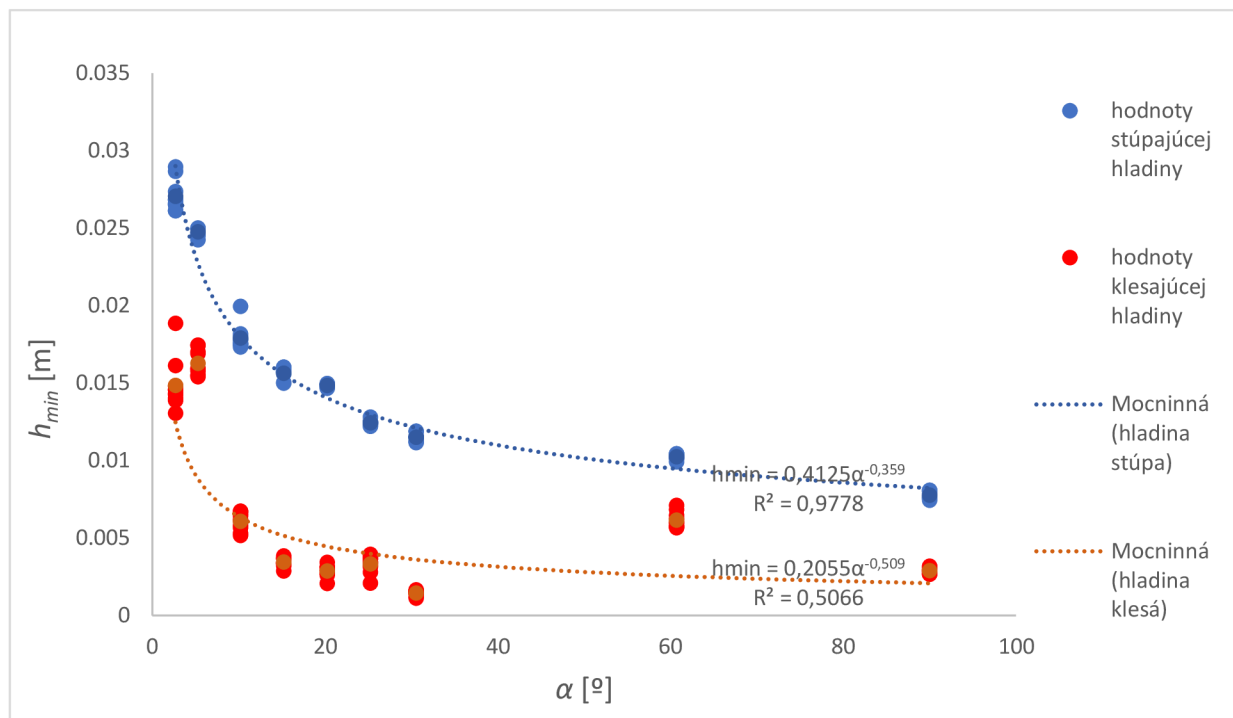
$$h_{min} = 0,2055 \alpha^{-0,509}. \quad (27)$$

Koeficient determinácie nadobúda hodnotu 0,51.



Graf 2 Všetky namerané hodnoty





Graf 3 Namerané hodnoty s preloženými aproximačnými krivkami

## 7.1 Zhodnotenie výsledkov

Ako typ výslednej funkcie bol zvolený mocninný, a to z dôvodu najlepšieho a najpresnejšieho preloženia bodov krivkou. Koeficient determinácie nadobúdal najväčšie hodnoty.

Zhodnotenie výsledkov pri hladine stúpajúcej:

Z grafu 2 je možné pozorovať, že výsledky experimentu sú relatívne presné, nakoľko takmer všetky body merania patria do prijateľného intervalu výslednej funkcie.

Zhodnotenie výsledkov pri hladine klesajúcej:

Z grafu 2 je možné hneď na prvý pohľad zistiť, že niektoré skupiny nameraných hodnôt nezapadajú do prijateľného intervalu výslednej funkcie.

Trend stúpajúcej hladiny je jednoznačnejší ako pri hladine klesajúcej. Dôvodom môže byť nepresné prevedenie výrezu pri malých uhloch, možnosť ovplyvnenia hladiny vody drobnou nečistotou alebo subjektívne zhodnotenie a nepresné odčítanie hodnoty z meradla.

## 7.2 Zhodnotenie možných chýb pri meraní

Rozptyl hodnôt pri meraní mohol byť spôsobený [8]:

- Náhodnými chybami pri meraní.
- Systematickými chybami pri meraní.
- Osobnými chybami pri meraní.

Náhodné chyby sú spôsobené prirodzenými a nepredpovedateľnými fluktuáciami v meracej aparátúre alebo v meranom objekte [8]. Náhodnou chybou pri meraní mohla byť prítomnosť

nežiadúcej látky pri prelivnej hrane (zrno piesku alebo iná nečistota plávajúca v koryte), ktorá mohla narušiť meniskus hladiny a tým predčasne začala voda prepadať cez prelivnú hranu.

Systematické chyby sú chyby, ktoré sa zo série opakovaných meraní vždy vychýlia rovnakým spôsobom na jednu stranu od skutočnej hodnoty [8]. Systematickou chybou pri experimente mohlo byť zlé stanovenie východzej nulovej hodnoty, nastavenie príliš vysokej hodnoty prítoku, zlé uchytenie hrotového meradla.

Osobné chyby sú spôsobené nepozornosťou experimentátora alebo nesprávnym odčítaním z meracích prístrojov [8]. Osobnou chybou mohla byť nepozornosť pri stanovení minimálnej prepadovej výšky, pre presné určenie musí experimentátor dávať neustále pozor a presne zastaviť prítok vody po začatí prepadu alebo nepresné odčítanie hodnoty z hrotového meradla alebo teplomeru.

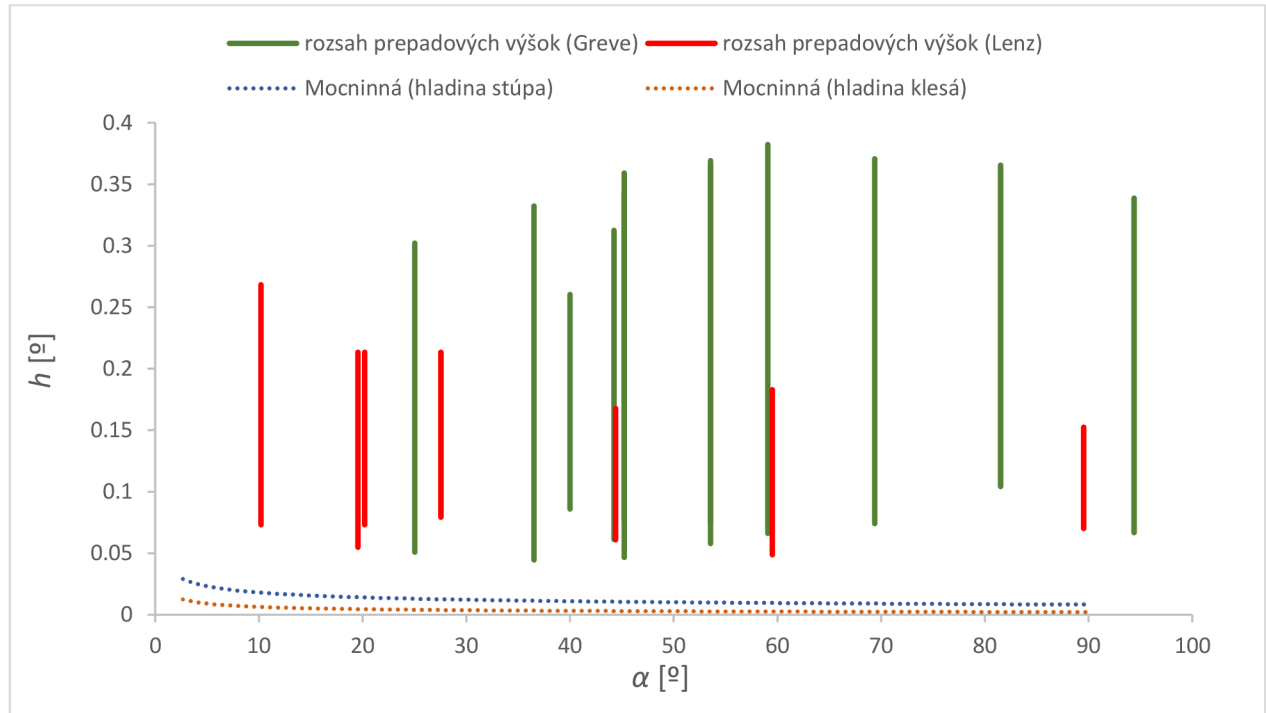
Odchýlka nameraných hodnôt mohla byť spôsobená systematickými chybami pri meraní.

## 8 Porovnanie výsledkov experimentu s odbornou literatúrou

Minimálna prepadová výška  $h_{min}$  je rozdiel medzi kótou najnižšieho bodu výrezu prelivu a kótou hladiny vody v momente, keď voda začne cez preliv prepadávať.

Vyhodnotené výsledky boli porovnané s dostupnou odbornou literatúrou, s dátami z ČSN ISO 1438[1] a s hodnotami z experimentov prevedenými Grevom a Lenzom [4].

Tieto hodnoty boli vynesené do grafu a porovnané (Graf 4).



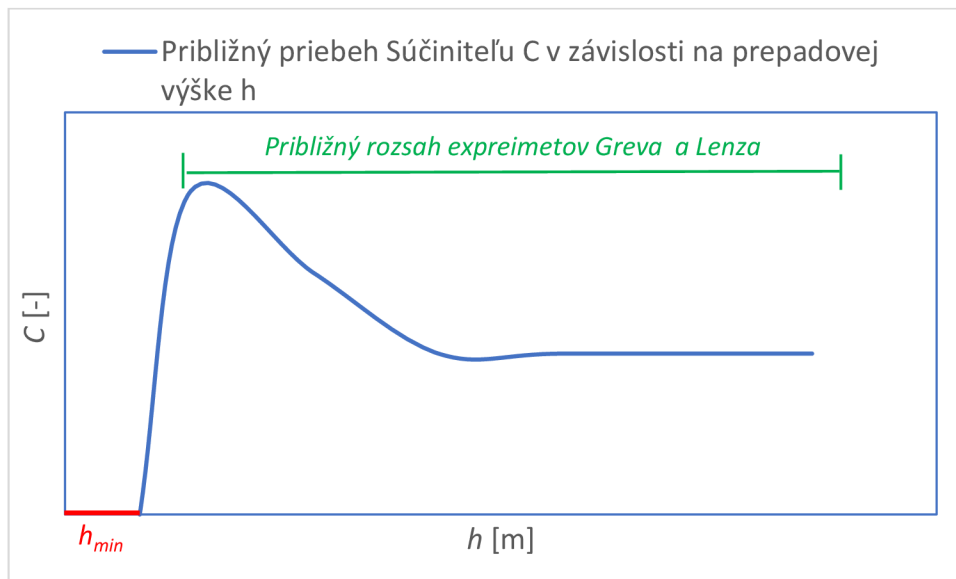
Graf 4 Porovnanie dosiahnutých výsledkov s odbornou literatúrou

### 8.1 Zhodnotenie výsledkov z porovnania

V mojom experimente som sa zaoberal minimálnou prepadovou výškou  $h_{min}$  a výskumníci Greve a Lenz sa zaoberali stanovením prepadového súčiniteľa  $C$  a opravnou výškou  $k_h$ .

Experimenty Greva a Lenza končili pri hodnotách, keď sa súčiniteľ  $C$  blížil k nulovým hodnotám, takže minimálna prepadová výška  $h_{min}$  nebola stanovená.





Graf 5 Rozsah môjho experimentu a experimentu Greva a Lenza

Z Grafu 5, ktorý zobrazuje typický priebeh súčiniteľa  $C$  na prepadovej výške  $h$ , je zjavné, že hodnoty môjho experimentu sú v grafe závislosti prepadovej výšky  $h$  na uhle výrezu  $\alpha$  pod hodnotami výsledkov Greva a Lenza (Graf 4).

Z porovnania hodnôt v grafe 4 sa dá zistiť, že ako jediný som sa zaoberal uhlami výrezu menšími ako  $10^\circ$ . Takže tieto hodnoty sa nedajú porovnať.

## 9 Záver a zhodnotenie

Cieľom bakalárskej práce bolo experimentálne stanoviť závislosť minimálnej prepadovej výšky na veľkosti uhlu trojuholníkového výrezu tenkostenného prelivu.

Na splnenie bola najprv spravená rešeršná časť, ktorá umožnila spoznať všetky vplyvy, ktoré by mohli ovplyvniť experiment.

Pre experiment bol postavený žľab s možnosťou výmeny prelivnej steny s deviatimi rôznymi uhlami výrezov.

Počas experimentu bolo celkovo prevedených 180 meraní minimálnej prepadovej výšky  $h_{min}$ . Prepádová výška  $h_{min}$  bola stanovená ako rozdiel najnižšieho bodu výrezu a výška hladiny vody pri začatí prepadu. Uhol experimentálnych výrezov bol v rozmedzí 2,67° až 90°. Pre každý uhol výrezu bolo nameraných 10 hodnôt pre hladinu stúpajúcu a 10 hodnôt pre hladinu klesajúcu. Rozsah teplôt vody pri meraní bol 14 °C až 17,9 °C.

Minimálna prepádová výška bola meraná hrotovým meradlom a východzia nulová hodnota bola stanovená upraveným postupom, ktorý vychádzal z postupu z ČSN ISO 1438 [1]. Počas experimentu nebol meraný prietok žľabom, ale bolo dbané na to, aby bola zmena prietoku dostatočne malá počas všetkých meraní, aby boli zaistené vhodné podmienky.

Výsledky experimentu boli spracované ako graf s preloženými aproximačnými krivkami a koeficientami determinácie (Rovnica 26 a 27). Tieto výsledky platia len pre čistú vodu a v rozsahu teplôt experimentu.

Stanovením hodnôt minimálnej prepadovej výšky  $h_{min}$  sa v odbornej sfére nezaoberal takto podrobne nikto. Experimenty najviac podobné môjmu robili výskumníci Greve a Lenz. Rozdiel rozsahu našich experimentov je zobrazený v grafe 5, a v grafe 4 sú zobrazené výsledky nameraných hodnôt.

Po porovnaní hodnôt z grafu 4 je zjavné, že Greve aj Lenz prestali s meraním prepadovej výšky  $h$  pred tým ako mohla byť stanovená minimálna prepádová výška  $h_{min}$ .

Meraním bola stanovená závislosť minimálnej prepadovej výšky na veľkosti uhlu trojuholníkového výrezu tenkostenného prelivu a to podrobnejšie ako doposiaľ prevedené výskumy a experimenty. Po zhodnotení výsledkov bola stanovená závislosť ako mocninná. Zásadný rozdiel môjho experimentu bolo meranie uhlov výrezov, čo najmenších možných hodnôt. Dôvodom bola snaha zostrojiť krivku závislosti, ktorá by sa dala použiť do budúcnosti pre všetky možné uhly výrezu.

## 10 Zoznamy

### 10.1 Zoznam použitej literatúry

- [1] ČSN ISO 1438, 2012. Hydrometrie – Měření průtoku vody v otevřených korytech pomocí tenkostenných přelivů. Praha: Český normalizační institut.
- [2] JANDORA, Jan a ŠULC Jan. Hydraulika: modul 01. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. Studijní opora pro studijní programy s kombinovanou formou studia. ISBN 978-80-7204-512-9
- [3] JANDORA Jan, STARA Vlastimil a STARÝ Miloš. HYDRAULIKA A HYDROLOGIE. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-739-0
- [4] SHEN John. Discharge characteristics of Triangular-notch Thin-plate Weirs. Washington: United states government printing office, 1981. Doc. No.: I 19.13:1617-B
- [5] ŠVÁB, Jiří. Tenkostěnný pravoúhlý přeliv s přítokovou. Brno, 2019. Diplomová práce. VUT Brno, Fakulta stavební. Vedoucí práce doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.
- [6] KOLÁŘ, Václav, PATOČKA Cyril a BÉM Jiří. *Hydraulika*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983. ISBN 30736/81-30.
- [7] POSPIŠILÍK, Šimon. TENKOSTĚNNÝ PŘELIV S  $2,67^\circ$  TROJÚHELNÍKOVÝM VÝŘEZEM. *JUNIORSTAV 2020*. 2020, , 6.
- [8] *MERANIE A JEHO NEURČITOSŤ* [online]. [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: [https://fyzika.uniza.sk/praktika/Ulohy/Meranie\\_a\\_jeho\\_neurcitost\\_uvod.pdf](https://fyzika.uniza.sk/praktika/Ulohy/Meranie_a_jeho_neurcitost_uvod.pdf)

## 10.2 Zoznam použitých obrázkov

|  |    |
|--|----|
| Obrázok 1 Thompsonov preliv [3] .....  | 11 |
| Obrázok 2 Typy prelivov [3].....   | 14 |
| Obrázok 3 Detail koruny prelivu [1] .....  | 14 |
| Obrázok 4 Preliv s trojuholníkovým výrezom .....   | 16 |
| Obrázok 5 Kapilárna elevácia medzi rozchádzajúcimi sa stenami [3].....                                       | 19 |
| Obrázok 6 Efekt kapilarity na ostrohrannom prelive[3] .....  | 19 |
| Obrázok 7 Závislosť opravnej výšky $k_h$ na uhle výrezu $\alpha$ [4].....                                    | 22 |
| Obrázok 8 Vonkajšie rozmery žľabu .....  | 23 |
| Obrázok 9 Meracie zariadenie a schéma umiestnenia valcov[7] .....  | 26 |
| Obrázok 10 Hrotové meradlo.....  | 27 |
| Obrázok 11 Tvar hladiny tesne pred začatím prepadu pre uhol výrezu $90^\circ$ .....                          | 28 |
| Obrázok 12 Prepád vody cez trojuholníkový výrez s uhlom výrezu $60,69^\circ$ .....                           | 28 |
| Obrázok 13 Tvar prúdu prepadajúcej vody pri uhle výrezu $10,19^\circ$ (pohľad z boku).....                   | 28 |
| Obrázok 14 Prelivná stena s trojuholníkovým výrezom, rám na uchytenie prelivnej steny ....                   | 29 |
| Obrázok 15 Čerpací systém.....   | 30 |
| Obrázok 16 Pohľad na žľab z boku, uchytenie hrotového meradla .....  | 30 |
| Obrázok 17 Hladina vody pri uhle výrezu $90^\circ$ (voda sa neprelieva, vplyvom povrchového napätia).....    | 32 |
| Obrázok 18 Hladina vody pri uhle výrezu $90^\circ$ (voda sa prelieva) .....                                  | 32 |
| Obrázok 19 Hladina vody pri uhle výrezu $60,69^\circ$ (voda sa neprelieva, vplyvom povrchového napätia)..... | 32 |
| Obrázok 20 Hladina vody pri uhle výrezu $60,69^\circ$ (voda sa prelieva) .....                               | 32 |
| Obrázok 21 Hladina vody pri uhle výrezu $25,22^\circ$ (voda sa neprelieva vplyvom povrchového napätia).....  | 32 |
| Obrázok 22 Hladina vody pri uhle výrezu $20,23^\circ$ (voda sa prelieva) .....                               | 32 |
| Obrázok 23 Hladina vody pri uhle výrezu $16,67^\circ$ (voda sa prelieva) .....                               | 32 |
| Obrázok 24 Hladina vody pri uhle výrezu $10,19^\circ$ (voda sa prelieva) .....                               | 32 |

## 10.3 Zoznam tabuliek

|  |    |
|--|----|
| Tabuľka 1 Závislosť povrchového napätia $\sigma$ čistej vody na teplote $T$ [6] .....          | 17 |
| Tabuľka 2 Namerané hodnoty pre uhol výrezu $2,67^\circ$ , $5,26^\circ$ a $10,19^\circ$ .....   | 31 |
| Tabuľka 3 Namerané hodnoty pre uhol výrezu $15,18^\circ$ , $20,23^\circ$ a $25,22^\circ$ ..... | 31 |
| Tabuľka 4 Namerané hodnoty pre uhol výrezu $30,54^\circ$ , $60,69^\circ$ a $90^\circ$ .....    | 31 |

## 10.4 Zoznam grafov

|   |    |
|---|----|
| Graf 1 Povrchové napätie $10^{-3} \sigma$ čistej vody na styku so vzduchom v závislosti na teplote $T$ 17 |    |
| Graf 2 Všetky namerané hodnoty.....   | 33 |
| Graf 3 Namerané hodnoty s preloženými aproximačnými krivkami .....  | 34 |
| Graf 4 Porovnanie dosiahnutých výsledkov s odbornou literatúrou .....                                     | 36 |
| Graf 5 Rozsah môjho experimentu a experimentu Greva a Lenza .....   | 37 |

## 10.5 Zoznam veličín

|           |   |                     |
|-----------|---|---------------------|
| $a_2$     | odľahlosť horných hrán valcov                         | [m]                 |
| $b$       | šírka koruny výrezu                                   | [m]                 |
| $B$       | šírka žľabu   | [m]                 |
| $C$       | súčiniteľ prepadu                                     | [-]                 |
| $C_e$     | efektívny súčiniteľ prepadu                           | [-]                 |
| $d_i$     | priemer valcov na určenie východzej hodnoty           | [m]                 |
| $d_1$     | priemer menšieho valca na určenie východzej hodnoty   | [m]                 |
| $d_2$     | priemer väčšieho valca na určenie východzej hodnoty   | [m]                 |
| $D$       | priemer kruhovej trubice                              | [m]                 |
| $e_k$     | kapilárna elevácia                                    | [m]                 |
| $F$       | výslednica kohéznych síl povrchového napätia          | [N]                 |
| $g$       | tiažové zrýchlenie                                    | [m/s <sup>2</sup> ] |
| $h$       | prepadová výška                                       | [m]                 |
| $h_{kap}$ | výška kapiláry  | [m]                 |
| $h_{min}$ | minimálna prepadová výška                             | [m]                 |
| $h_e$     | efektívna prepadová výška                             | [m]                 |
| $j$       | mocniteľ  | [-]                 |
| $l$       | vzdialenosť stien otvoru prelivu                      | [m]                 |
| $l_1$     | vzdialenosť menšieho valca od najnižšieho bodu výrezu | [m]                 |
| $l_2$     | vzdialenosť menšieho valca od väčšieho                | [m]                 |
| $k_h$     | opravná výška   | [m]                 |
| $k_{h0}$  | základná opravná výška                                | [m]                 |
| $K$       | vzdialenosť úrovne $z$ od hladiny                     | [m]                 |
| $r$       | polomer valca na určenie východzej hodnoty            | [m]                 |
| $r_1$     | polomer menšieho valca na určenie východzej hodnoty   | [m]                 |
| $r_2$     | polomer väčšieho valca na určenie východzej hodnoty   | [m]                 |
| $Re$      | Reynoldsovo číslo (kritérium                          | [-]                 |
| $s_1$     | výška prelivnej hrany                                 | [m]                 |
| $S$       | sklon strán výrezu                                    | [m]                 |
| $t$       | hrúbka steny prelivu                                  | [m]                 |

|             |   |                      |
|-------------|---|----------------------|
| $T$         | teplota   | [°C]                 |
| $v_0$       | prietoková rýchlosť                             | [m/s]                |
| $Q$         | prietok   | [m <sup>3</sup> /s]  |
| $We$        | Weberovo číslo (kritérium)                      | [-]                  |
| $y$         | šírka prelivu                                   | [m]                  |
| $y_{valec}$ | vzdialenosť hornej časti valca k vrcholu výrezu | [m]                  |
| $\sigma$    | povrchové napätie                               | [N/m]                |
| $\rho$      | hustota   | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $\alpha$    | uhol výrezu                                     | [°]                  |
| $\alpha_1$  | uhol pri oblúkovom prelive                      | [°]                  |
| $\alpha_2$  | uhol pri lomenom prelive                        | [°]                  |
| $\kappa$    | výšková úroveň merania pri kapilárnej elevácii  | [m]                  |

## 10.6 Zoznam skratiek

ČSN

česká technická norma