



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

TENKOSTĚNNÝ PŘELIV S TROJÚHELNÍKOVÝM VÝŘEZEM UMÍSTĚNÝ NA KONCI POTRUBÍ

TRIANGULAR-NOTCH THIN-PLATE WEIR LOCATED AT THE END OF THE PIPE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Bečička

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav vodních staveb
Student: **Filip Bečička**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24
Studijní program: B0732A260005 Stavební inženýrství
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Tenkostěnný přeliv s trojúhelníkovým výřezem umístěný na konci potrubí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá stanovením součinitele průtoku tenkostěnného přelivu s trojúhelníkovým výřezem umístěného na konci potrubí s kruhovým průřezem a nulovým sklonem dna. Student provede měření průtokových a hladinových charakteristik, na jehož základě vyhodnotí závislost součinitele průtoku na relativním zaplnění potrubí.

Cíle a výstupy bakalářské práce:

Cílem práce je stanovení součinitele průtoku tenkostěnného přelivu s trojúhelníkovým výřezem umístěného na konci potrubí s kruhovým průřezem a nulovým sklonem dna.

Požadovanými součástmi práce jsou pojednání o tenkostěnných přelivech s trojúhelníkovým výřezem, popis experimentálního zařízení, měření a vyhodnocení dat a doporučení pro výpočet.

Seznam doporučené literatury a podklady:

ÚNMZ, 2023. ČSN ISO 1438, Hydrometrie – Měření průtoku vody v otevřených korytech pomocí tenkostěnných přelivů. Praha: ÚNMZ.

Gabriel, P., 2023. Vliv šířky přítokového koryta na přepad přes tenkostěnný přeliv s trojúhelníkovým výřezem. Bakalářská práce. Brno: VUT, FAST, ÚVST.

Pospíšilík, Š., Zachoval, Z., 2023. Discharge coefficient, effective head and limit head in the Kindsvater-Shen formula for small discharges measured by thin-plate weirs with a triangular notch. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 71, 1, 35-48. ISSN: 1338-4333.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 6. 11. 2023

L. S.

doc. Ing. Aleš Dráb, Ph.D.
vedoucí ústavu

doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývala stanovením součinitele průtoku tenkostěnného přelivu s trojúhelníkovým výřezem umístěného na konci kruhového potrubí s nulovým sklonem dna. Pro jeho stanovení bylo použito měření. Měření bylo provedeno pro pět různých úhlů trojúhelníkového výřezu a pro dva průměry potrubí. Součinitel průtoku byl vypočítán dvěma způsoby vycházejícími z Bernoulliho rovnice. Součinitel průtoku byl zobrazen graficky ve vztahu k různým veličinám z důvodu stanovení jejich vhodnosti pro zobecnění. Grafické zobrazení je provedeno i pro poměr vyjadřující relativní zaplnění potrubí. Na základě grafických zobrazení a náročnosti výpočtu bylo uvedeno doporučení pro výpočet.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tenkostěnný přeliv, trojúhelníkový výřez, součinitel průtoku, kruhové přítokové potrubí

ABSTRACT

The bachelor thesis dealt with the determination of the discharge coefficient of a thin-plate weir with a triangular notch located at the end of a circular pipe with zero bottom slope. Measurements were used for its determination. Measurements were taken for five different angles of the triangular notch and for two pipe diameters. The discharge coefficient was calculated in two ways based on Bernoulli's equation. The discharge coefficient was plotted graphically against the different quantities to determine their suitability for generalisation. A graphical representation has also been made for the ratio expressing the relative filling of the pipe. Based on the graphical representations and the complexity of the calculation, a recommendation for the calculation was given.

KEYWORDS

Thin-plate weir, triangular notch, discharge coefficient, circular approach pipe

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BEČIČKA, Filip. Tenkostěnný přeliv s trojúhelníkovým výřezem umístěný na konci potrubí. Brno, 2024. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Tenkostěnný přeliv s trojúhelníkovým výřezem umístěný na konci potrubí zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 23. 5. 2024

Filip Bečička

autor

PODĚKOVÁNÍ

Především děkuji panu doc. Ing. Zbyňku Zachovalovi, Ph.D., za pomoc, odborné vedení, vstřícnost a hodnotné rady, které mi významně pomohly při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině a přátelům, kteří mě při studiu podporovali.

OBSAH

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Úvod..... | 10 |
| 1.1 | Členění přepadu a přelivů | 10 |
| 1.2 | Popis tenkostěnných přelivů..... | 12 |
| 1.3 | Podmínky pro měření na tenkostěnných přelivech..... | 12 |
| 1.4 | Rovnice průtoku pro tenkostěnný přeliv s trojúhelníkovým výřezem..... | 13 |
| 1.5 | Předchozí výzkumy..... | 15 |
| 1.6 | Použití tenkostěnných přelivů s trojúhelníkovým výřezem | 16 |
| 2 | Cíl práce a metoda řešení..... | 18 |
| 2.1 | Cíl práce..... | 18 |
| 2.2 | Metoda řešení..... | 18 |
| 3 | Experimentální zařízení..... | 20 |
| 3.1 | Měrný žlab | 21 |
| 3.1.1 | Tenkostěnné trojúhelníkové přelivy..... | 23 |
| 3.1.2 | Kruhové potrubí..... | 24 |
| 3.2 | Měřidla..... | 25 |
| 3.2.1 | Elektromagnetický indukční průtokoměr DN50 | 25 |
| 3.2.2 | Elektromagnetický indukční průtokoměr DN10 | 25 |
| 3.2.3 | Digitální hrotové měřidlo | 26 |
| 3.2.4 | Délkové měřidlo..... | 27 |
| 3.2.5 | Vodováha | 27 |
| 4 | Měření..... | 28 |
| 4.1 | Rozsah výzkumu..... | 28 |
| 4.2 | Postup měření..... | 28 |
| 4.2.1 | Stanovení průtoku..... | 28 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.2.2 | Stanovení přepadové výšky | 29 |
| 4.3 | Chyby a nejistoty měření..... | 30 |
| 4.4 | Změřená data | 31 |
| 5 | Zpracování změřených dat a jejich Vyhodnocení..... | 34 |
| 5.1 | Zpracování dat | 34 |
| 5.2 | Vyhodnocení změřených dat..... | 35 |
| 6 | Výsledky..... | 43 |
| 6.1 | Součinitel průtoku pro přepadovou výšku C_d | 43 |
| 6.2 | Součinitel průtoku pro energetickou přepadovou výšku C_D | 46 |
| 6.3 | Doporučení pro výpočty..... | 50 |
| 7 | Závěr a zhodnocení..... | 51 |
| 8 | Seznamy | 52 |
| 8.1 | Seznam použité literatury..... | 52 |
| 8.2 | Seznam veličin | 53 |
| 8.3 | Seznam zkratk | 54 |
| 8.4 | Seznam obrázků..... | 54 |
| 8.5 | Seznam grafů | 55 |

1 ÚVOD

Přepad může být definován jako výtok kapaliny o volné hladině otvorem, přičemž hladina nedosahuje k jeho hornímu obrysu. Samotná konstrukce, přes kterou kapalina přepadá, se pak nazývá přeliv. [1]

Při stanovování průtoku vody s použitím tenkostěnného přelivu s trojúhelníkovým výřezem vyvstává problém se zvolením vhodné hodnoty součinitele průtoku. Ten závisí na mnoha faktorech, jako například na typu přelivu, příčném a podélném tvaru přelivu, přepadové výšce, výšce přelivu atd. Zároveň je nutné zohlednit i tvarovou charakteristiku přítokového koryta. [3]

1.1 Členění přepadu a přelivů

Přepad se člení v závislosti na ovlivnění hladinou dolní vody na [1]:

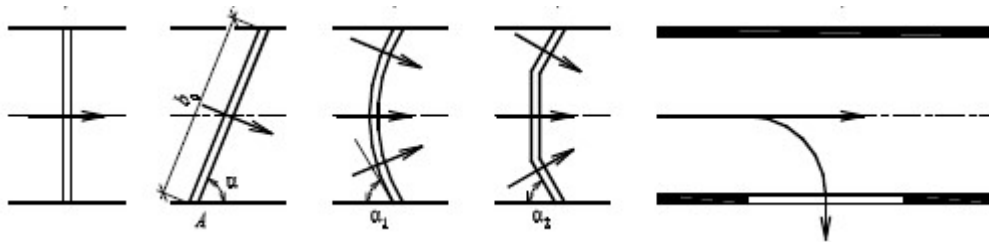
- dokonalý přepad, kdy hladina dolní vody neovlivňuje přepad,
- nedokonalý přepad, kdy hladina dolní vody ovlivňuje přepad.

Na přepad vody přes přeliv má značný vliv tvar a tloušťka přelivné stěny ve směru proudu. Z uvedeného důvodu se přelivy člení na [1]:

- ostrohranné přelivy (tenkostěnné),
- jezové nebo přehradní přelivy (proudnicové),
- přelivy se širokou korunou,
- zvláštní typy přelivů (šachtové, boční).

Přelivy se také člení s ohledem na půdorysný tvar vůči přítékajícímu proudu na [1] (Obrázek 1):

- čelní,
- šikmé,
- obloukové,
- lomené,
- boční.



Obrázek 1 Rozdělení přelivů: čelní, šikmý, obloukový, lomený a boční [1]

Členění tenkostěnných přelivu je dle tvaru příčného průřezu (tvaru výřezu). Tvary výřezů jsou nejčastěji geometricky jednoduché, mezi nejpoužívanější patří tenkostěnné přelivy s [1]:

- obdélníkovým výřezem (Ponceletův nebo Bazinův),
- trojúhelníkovým výřezem (speciální typ je pak Thomsonův),
- lichoběžníkovým výřezem (Cipolettiho),
- kruhovým výřezem,
- parabolickým výřezem.

Existují i složené tenkostěnné přelivy, které jsou kombinací jednoduchých tvarů výřezů.

U tenkostěnných přelivů se v neposlední řadě hledí na boční zúžení. Obdélníkový přeliv, který má výřez stejně široký jako je obdélníkové přítokové koryto, neovlivňuje svojí konstrukcí šířku proudu a jedná se tedy o přeliv bez bočního zúžení. Všechny ostatní výše uvedené přelivy zasahují v případě pravoúhlého přítokového koryta do přitékajícího proudu a ovlivňují šířku přepadového paprsku. Jedná se tedy o přelivy s bočním zúžením. Ty se dále člení na přelivy s úplným zúžením a s částečným (neúplným) zúžením proudu. [1]

Tenkostěnné přelivy s trojúhelníkovým výřezem umístěné na konci kruhového potrubí relativně malých průměrů se v případě velkých hodnot úhlů výřezu řadí mezi přelivy s částečným zúžením proudu a v případě malých úhlů výřezu je jejich zařazení proměnné po relativním zaplnění potrubí.

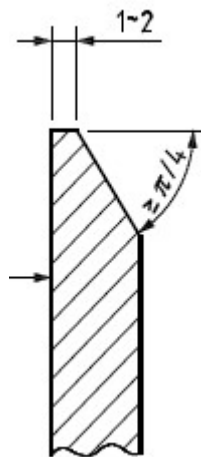
1.2 Popis tenkostěnných přelivů

Tenkostěnné přelivy jsou konstrukce, jejichž tloušťka přelivné stěny t_l (pravoúhlý přeliv v podélném směru) je

$$t_l < 0,66 \cdot h, \quad (1.1)$$

kde h je přepadová výška. [1]

Norma ČSN ISO 1438 Hydrometrie – Měření průtoků vody v otevřených korytech pomocí tenkostěnných přelivů [2] udává přesné požadavky pro instalaci tenkostěnných přelivů. Podle ní musí být stěna přelivu rovinná, tuhá a kolmá ke stěnám a dnu koryta. Osa souměrnosti výřezu musí být svislá a navazovat na podélnou rovinu symetrie přítokového koryta. Tloušťka stěny výřezu v místě koruny má být 1–2 mm a poproudňní hrana může být zkosená ale ne méně než $\pi/4$ radiánů (45°) (Obrázek 2). [2]



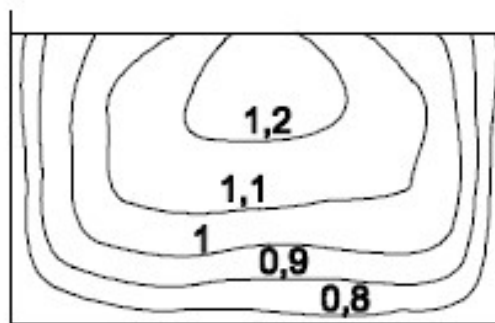
Obrázek 2 Detail přelivné hrany [2]

1.3 Podmínky pro měření na tenkostěnných přelivech

Pro použití tenkostěnných přelivů s trojúhelníkovým výřezem při měření průtoků definuje norma ČSN ISO 1438 [2] podmínky pro správné a přesné měření průtoků. Délka přítokového koryta nesmí být menší než pětinasobek šířky přepadového paprsku při maximální přepadové výšce. Pokud je přeliv umístěn v přelivovém boxu, jeho délka by měla být až desetinásobek šířky přepadového paprsku při maximální přepadové výšce. Proudění vody musí být ustálené. Rozložení

rychlosti musí odpovídat rozložení rychlosti v hladkém přímém korytě (Obrázek 3). Hladina dolní vody v odtokovém korytě musí být v takové úrovni, aby byl zajištěn dokonalý a plně zavzdušněný přepad. Přeliv musí být pevně a vodotěsně spojen s bočními stěnami a dnem koryta a musí odolávat maximálnímu průtoku bez deformací nebo poškození. [2]

Pro měření úrovně hladiny se používá hákové měřidlo, hrotové měřidlo, manometr nebo jiné zařízení se stejnou přesností. Pokud jsou rychlosti v přítokovém korytě zanedbatelné, lze měřit úroveň hladiny vody přímo v přítokovém korytě. V opačném případě je vhodné použít oddělenou uklidňovací šachtu. Měření úrovně hladiny vody v přítokovém korytě musí být prováděno v takové vzdálenosti, aby nebylo ovlivněno oblastí poklesu hladiny způsobeného formováním paprsku. Zároveň musí být prováděno dostatečně blízko, aby ztráta energie mezi profilem měření úrovně hladiny a přelivem byla zanedbatelná. Z těchto důvodů se vzdálenost volí dvojnásobek až čtyřnásobek maximální přepadové výšky. [2]



Obrázek 3 Typické rozložení rychlosti v korytě pravoúhlého průřezu [2]

1.4 Rovnice průtoku pro tenkostěnný přeliv s trojúhelníkovým výřezem

Pro výpočet průtoku přepadajícího přes tenkostěnný přeliv lze použít obecnou rovnici odvozenou z Bernoulliho rovnice pro výpočet průtoku vytékajícího otvorem ve svislé stěně do volna

$$Q = C_d \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \int_0^h \left(z + \frac{\alpha_0 \cdot v_0^2}{2 \cdot g} \right)^{1/2} \cdot y \cdot dz, \quad (1.2)$$

kde y je funkcí z (je ve směru tíhového zrychlení), Q je průtok vody, C_d je součinitel průtoku pro přepadovou výšku, g je tíhové zrychlení, h je přepadová výška, α_0 je Coriolisovo číslo (součinitel kinetické energie) a v_0 je přítoková rychlost (Obrázek 4). Za předpokladu zanedbání přítokové rychlosti je její tvar

$$Q = C_d \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \int_0^h z^{1/2} \cdot y \cdot dz. \quad (1.3)$$

Dosažením šířky výřezu

$$y = 2 \cdot (h - z) \cdot \tan \frac{\alpha}{2}, \quad (1.4)$$

kde α je úhel výřezu přelivu, se obdrží rovnice

$$Q = C_d \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \int_0^h z^{1/2} \cdot \left[2 \cdot (h - z) \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \right] \cdot dz \quad (1.5)$$

a její úpravou rovnice

$$Q = C_d \cdot 2 \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot \int_0^h z^{1/2} \cdot (h - z) \cdot dz. \quad (1.6)$$

Po její integraci se získá vztah

$$Q = C_d \cdot 2 \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot \left[\frac{2}{3} \cdot h^{5/2} - \frac{2}{5} \cdot h^{5/2} \right] \quad (1.7)$$

a po následném zjednodušení se získá rovnice

$$Q = C_d \cdot \frac{8}{15} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \left(\tan \frac{\alpha}{2} \right) \cdot h^{5/2}. \quad (1.8)$$

Zohlednění přítokové rychlostní výšky

$$k = \frac{\alpha_0 \cdot v_0^2}{2 \cdot g}, \quad (1.9)$$

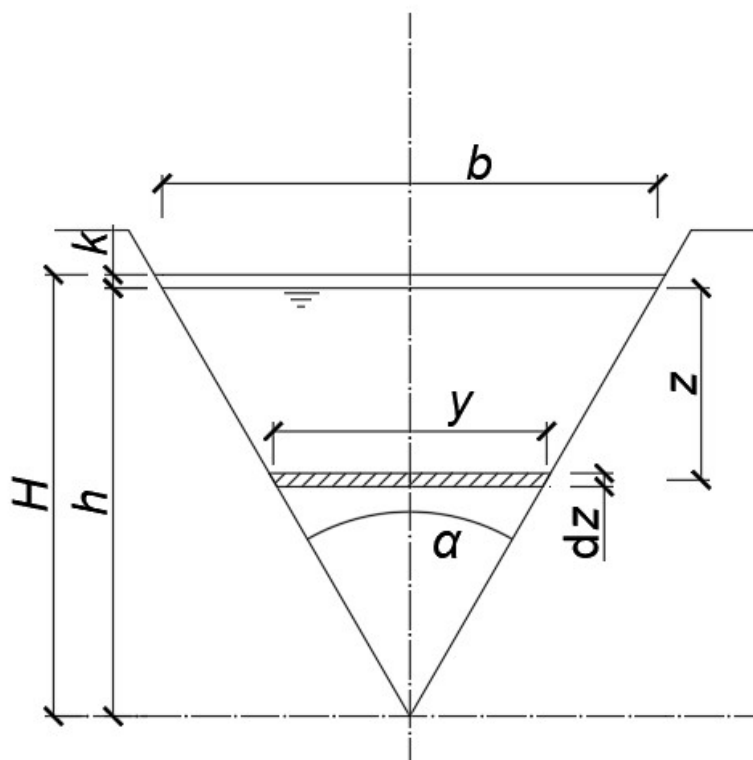
pomocí energetické přepadové výšky

$$H = h + k, \quad (1.10)$$

se získá dosažením rovnic (1.9) a (1.10) do vztahu (1.8)

$$Q = C_D \cdot \frac{8}{15} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \left(\tan \frac{\alpha}{2} \right) \cdot H^{5/2}, \quad (1.11)$$

kde C_D je součinitel průtoku pro energetickou přepadovou výšku.



Obrázek 4 Trojúhelníkový výřez

1.5 Předchozí výzkumy

Za první důležitý výzkum v oblasti tenkostěnných přelivů s trojúhelníkovým výřezem se považuje Thomsonovo měření z roku 1861 [7]. Jeho výsledky ověřil a rozšířil o různé šířky přítokového koryta a výšky přelivu v roce 1910 Barr [8]. Ve 20. století a především v jeho první polovině bylo provedeno množství experimentů zabývajících se různými proměnnými jako například tvar přelivné hrany, šířka přítokového koryta, zavedení energetické výšky do výpočtu a viskozitou. Všechny předchozí experimenty shrnul v roce 1981 Shen [9]. Výzkumy zabývající se tenkostěnným přelivem s trojúhelníkovým výřezem probíhají i nadále. V roce 2023 se Gabriel [3] zabýval vlivem šířky přítokového koryta na přepad přes tenkostěnný přeliv s trojúhelníkovým výřezem pro stejné úhly, kterými se zabývá i tento výzkum. Zároveň se Pospíšilík a Zchoval [5] zabývali součinitelem průtoku pro malé průtoky na tenkostěnném přelivu s trojúhelníkovým výřezem. [4]

Výzkumy zabývající se vlivem kruhového přítokového potrubí na součinitel průtoku tenkostěnného přelivu s trojúhelníkovým výřezem v tuto chvíli chybí.

1.6 Použití tenkostěnných přelivů s trojúhelníkovým výřezem

Použití tenkostěnných přelivů s trojúhelníkovým výřezem je široké. V závislosti na velikosti průtoku se volí velikosti úhlu výřezu. Pro menší průtoky se volí menší úhel výřezu.

Pro použití existují přelivy pevné, které jsou součástí konstrukce a po měření zůstávají na místě a přelivy mobilní, které se umisťují do konstrukce jen na dobu měření a následně se demontují.

Tenkostěnný přeliv s trojúhelníkovým výřezem je možné použít pro měření průtoku v korytech toků. Zvláště užitečné jsou pro měření průtoku v horních částech vodních toků, především v místech s velkým rozsahem průtoků. Přelivy se v mnoha případech zabudují trvale do koryta vodního toku. Díky tomu je možné sledovat průtoky v delším časovém období (Obrázek 5). [6]



Obrázek 5 Tenkostěnný přeliv s trojúhelníkovým výřezem v korytě vodního toku [6]

Další použití tenkostěnných přelivů s trojúhelníkovým výřezem je například v injekčních štolách přehrad. Ty mají v podlaze u stěny vytvořený odvodňovací žlab pro vodu prosakující tělesem hráze. V místech vhodných pro měření průtoku lze do žlabu umístit přeliv s automatickým snímačem úrovně hladiny vody.

V kruhovém potrubí lze pomocí přelivů měřit například výtok z čistíren odpadních vod nebo průtok vody v uzavřených částech koryt vodních toků. K těmto

účelům se používají tenkostěnné přelivy s trojúhelníkovým výřezem mobilního charakteru. Ty lze kalibrovat v laboratořích.

Kromě použití pro měření průtoku vody lze tenkostěnné přelivy s trojúhelníkovým výřezem použít i v čistírně odpadních vod nebo v úpravně pitné vody pro rovnoměrné rozdělení průtoku vody po šířce nádrže. [3]

2 CÍL PRÁCE A METODA ŘEŠENÍ

2.1 Cíl práce

Cílem práce bylo stanovení součinitele průtoku tenkostěnného přelivu s trojúhelníkovým výřezem umístěného na konci potrubí kruhového průřezu.

2.2 Metoda řešení

Metodou je experimentální výzkum prováděný ve vodohospodářské laboratoři. Hlavním výstupem bylo určení hodnoty součinitele průtoku C_d respektive C_D v závislosti na přepadové výšce h respektive energetické přepadové výšce H , na úhlu výřezu α a na vnitřním průměru potrubí d .

Pro stanovení bylo měřeno několik hodnot. Úroveň hladiny pro stanovení přepadové výšky h a určení průtoku vody Q pomocí naměření proteklého objemu vody příslušným průtokoměrem V a času t , za který tento objem protekl.

Pro výpočet součinitele průtoku pro přepadovou výšku byla rovnice (1.7) upravena na tvar

$$C_d = \frac{Q}{\frac{8}{15} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \left(\tan \frac{\alpha}{2}\right) \cdot h^{5/2}}. \quad (2.1)$$

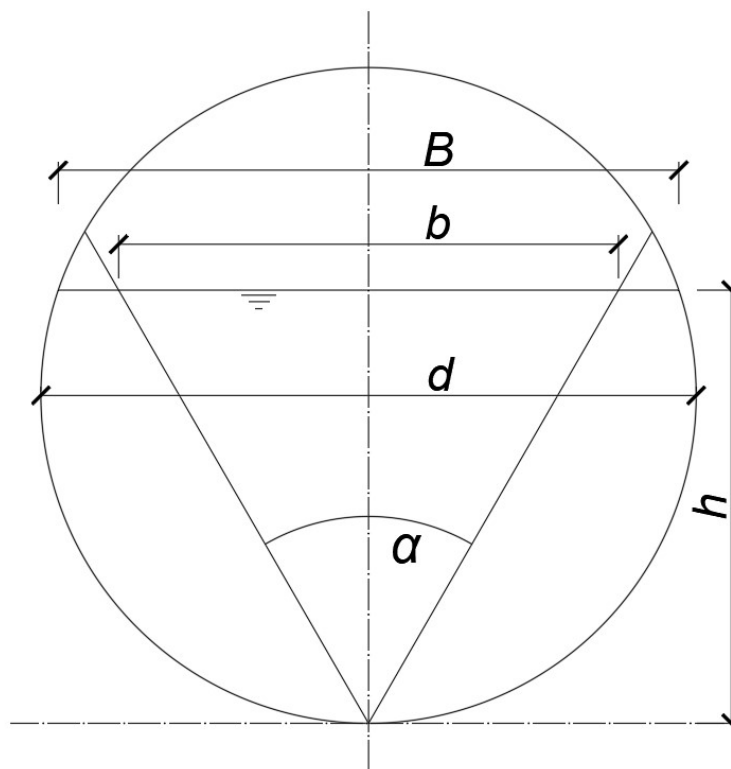
Pro výpočet součinitele průtoku pro energetickou přepadovou výšku byla rovnice (1.11) upravena na tvar

$$C_D = \frac{Q}{\frac{8}{15} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \left(\tan \frac{\alpha}{2}\right) \cdot H^{5/2}}. \quad (2.2)$$

Stanovení součinitelů průtoku bylo provedeno v níže uvedených rozsazích, podrobnostech a omezeních. V první řadě to byla přepadová výška $h = (0,05, 0,07, 0,09, 0,11, 0,13, 0,15, 0,17, 0,19, 0,21, 0,22)$ m, dále pak úhel výřezu přelivu $\alpha = (10,117, 20,230, 30,534, 60,674, 91,167)^\circ$ a potrubí DN250 s vnitřním průměrem $d = 0,2378$ m a DN200 s vnitřním průměrem $d = 0,1910$ m. Volba menších přepadových výšek byla zamezena vlivem povrchového napětí a ulpívání paprsku na přelivu. Z podobného důvodu se upustilo i od použití menších úhlů výřezu. Maximální přepadová výška byla omezena velikostí potrubí.

Pro provedení výzkumu bylo použito experimentální zařízení vytvořené k předchozím výzkumům. To umožňovalo vložení potrubí potřebných průměrů a jeho uchycení na místě, výměnu tenkostěnných přelivů s různými úhly výřezů, nastavení požadovaného průtoku ve žlabu a měření veličin s požadovanou nejistotou stanovení. Úhly výřezu α byly pevně dané výrobou přelivů a vnitřní průměr potrubí d byl dán výrobcem v závislosti na vnějším průměru a tloušťce stěn potrubí.

Vyhodnocení experimentu bylo provedeno graficky, a to jako závislost součinitele průtoku pro přepadovou výšku C_d a součinitele průtoku pro energetickou přepadovou výšku C_D na přepadové výšce h , poměru přepadové výšky a vnitřního průměru potrubí h/d , poměru průtočné plochy výřezu a průtočné plochy potrubí S_v/S_0 , poměru šířky výřezu v úrovni hladiny a šířky hladiny vody v potrubí b/B a poměru šířky výřezu v hladině a vnitřnímu průměru potrubí b/d (Obrázek 6). Veličiny a jejich poměry byly voleny tak, aby byly snadno změřitelné a vypočitatelné.



Obrázek 6 Schéma použitých veličin

3 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ

Stanovení součinitele průtoku pro tenkostěnný přeliv s trojúhelníkovým výřezem na konci kruhového potrubí proběhlo formou experimentálního výzkumu v měrném žlabu (Obrázek 7). Ten se nachází v Laboratoři vodohospodářského výzkumu na Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Pro upevnění potrubí byl žlab doplněn o betonová závaží a dřevěné příčné desky.

Na instalaci tenkostěnných přelivů s trojúhelníkovým výřezem na konci kruhového potrubí byly kladeny požadavky dle normy ČSN ISO 1438 [2]. Byla dodržena vodotěsnost mezi přelivem a žlabem pomocí pásového těsnění, rovněž tak byla dodržena těsnost mezi přelivem a potrubím. Přeliv při maximálním průtoku odolával náporu, nedeformoval se a nechvěl se. Kruhové potrubí bylo uvnitř hladké a bez poškození a bylo ve vodorovné poloze. Proudění vody bylo ustálené. Měření úrovně hladiny probíhalo ve vzdálenosti $2 \cdot h_{\max}$, kde h_{\max} byla maximální (teoretická) přepadová výška (průměr potrubí). Měrný žlab, ve kterém bylo potrubí umístěno, byl vodotěsný, aby voda proudila pouze skrze potrubí. Všechny požadavky byly během experimentu kontrolovány.



Obrázek 7 Měrný žlab

Použité experimentální zařízení je součástí recirkulačního okruhu s podzemním zásobníkem vody o objemu 45 m³. Ponorným odstředivým čerpadlem byla voda tlačena do rozvodného potrubí DN200 a z něj odbočovala hadice DN50. Na ní byl napojený elektromagnetický indukční průtokoměr DN50, ze kterého vedla hadice DN50 do měrného žlabu. V případě potřeby bylo za průtokoměr napojeno potrubí DN25, na které navazoval druhý elektromagnetický indukční průtokoměr DN10, ze kterého skrz potrubí DN25 proudila voda do žlabu. Celý systém byl ovládán dotykovým panelem řídicího systému (Obrázek 8). [3]

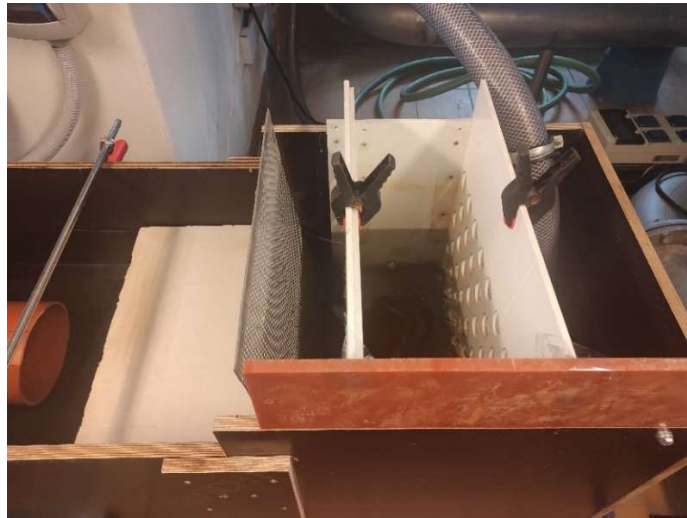


Obrázek 8 Ovládací panel

3.1 Měrný žlab

Měrný žlab, ve kterém bylo umístěno potrubí, byl vyroben z hladké voděodolné překližky. Vnitřní prostor je 3,5 m dlouhý, 0,5 m široký a 0,4 m vysoký [3]. U výtoku vody z hadic se nacházel uklidňovací úsek (Obrázek 9). Ten byl tvořený dvěma dvouvrstvými perforovanými stěnami z polyvinylchloridu (PVC), skrz které protéká voda a ztrácela tak velkou část své kinetické energie. Následovala stěna z děrovaného plechu plnící funkci česlí zachycováním plovoucích nečistot a současně zabezpečující rozpad velkých vírů generovaných dvouvrstvými

perforovanými stěnami. Pro uklidnění vlnění hladiny byla poproudně za děrovaným plechem připevněna plovoucí deska z pěnového polystyrenu.



Obrázek 9 Uklidňovací úsek žlabu

Ve střední části žlabu byl prostor pro umístění potrubí (Obrázek 10). V místě vtoku bylo jeho ukotvení zajištěno příčnými deskami z voděodolné překližky, které byly umístěny po obou stranách potrubí tak, aby potrubí bylo symetricky vystředěné ve žlabu. Na příčné desky a potrubí byly položeny betonové kvádry zabraňující jejich plování. Výtoková část potrubí byla po obvodu zajištěna bloky betonové dlažby z důvodu přesné manipulace s potrubím. Pro urovnání potrubí do vodorovné roviny byly pod něj, v případě potřeby, vkládány plechové destičky.



Obrázek 10 Střední část žlabu s potrubím

V poslední části žlabu bylo umístěno digitální hrotové měřidlo ve vzdálenosti přibližně $2 \cdot h_{\max}$ od rámu pro uchycení přelivu. Rám se skládal z ocelových úhelníků a šroubů přichycených ke stěnám a dnu žlabu. Po obvodu závěrné hrany v místě rámu byla nalepena těsnicí guma. Voda ve žlabu byla vypouštěna hadicí umístěnou ve dně žlabu u přelivu (Obrázek 11).

Voda vytékající vypouštěcí hadicí nebo přepadající přes přeliv padala odpadní šachtou zpět do podzemního zásobníku.

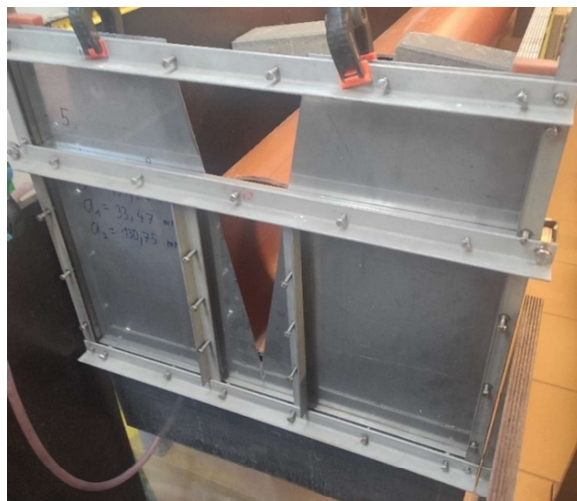


Obrázek 11 Rám pro přeliv na výtoku ze žlabu

3.1.1 Tenkostěnné trojúhelníkové přelivy

Přelivy byly zhotoveny z nerezových plechů s výřezy dle požadovaných úhlů. Jejich osazení do rámu probíhalo v několika krocích. Zprvé byly uvolněny všechny utahovací šrouby. Následně byl do rámu umístěn tenkostěnný přeliv a přichycen dvěma spodními šrouby. Poté bylo pomocí hrotového měřidla stanoveno dno potrubí jako počáteční úroveň s hodnotou 0,0 mm. K přelivu byl připevněn ocelový plech s posuvným válcem, který byl umístěn do výřezu přelivu. Na hrotovém měřidlu byla

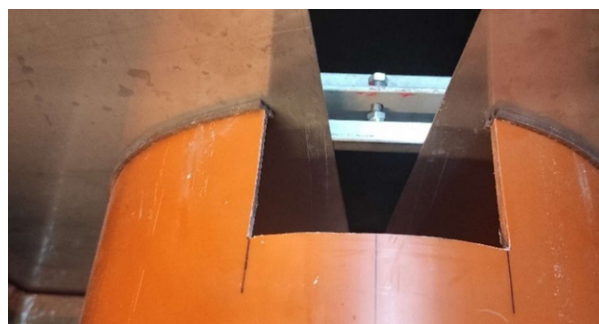
nastavena hodnota a , která udávala vzdálenost mezi dnem potrubí a vrcholem válce. Následně se uvolnily dva utažené šrouby rámu a přeliv se umístil do vodorovné polohy a takové výšky, kde hrot měřidla lícoval s vrcholem válce. V tuto chvíli byl přeliv umístěn tak, aby byl rozdíl mezi dnem potrubí a vrcholem výřezu přelivu maximálně 1 mm. Poté se utáhly všechny šrouby a na rám se osadil vodorovný vyztužující prvek a svislé vyztužující prvky. Šrouby na těchto prvcích byly utaženy tak, aby nedocházelo k deformaci přelivu a zároveň tak, aby byl spoj mezi potrubím a rámem vodotěsný (Obrázek 12).



Obrázek 12 Přeliv upevněný v rámu

3.1.2 Kruhové potrubí

Pro výzkum bylo použito standartní potrubí PVC DN250 a DN200 dlouhé 2 m. Výtokový konec bez hrdla byl opatřen těsněním a vrchní část potrubí byla vyříznuta pro umožnění osazení přelivu (Obrázek 13). Ve vzdálenosti $2 \cdot h_{\max}$ od výtoku byl do horní části potrubí vyříznut otvor pro měření úrovně hladiny hrotovým měřidlem.



Obrázek 13 Spoj mezi potrubím a přelivem

3.2 Měřidla

Pro výzkum byly použity 2 elektromagnetické indukční průtokoměry, hodinky, digitální hrotové měřidlo, délkové měřidlo a vodováha.

3.2.1 Elektromagnetický indukční průtokoměr DN50

Elektromagnetický indukční průtokoměr o průměru potrubí DN50 (Obrázek 14) sloužil k měření průtoků větších než $0,5 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Přístroj zobrazuje hodnoty celkového proteklého objemu v m^3 a aktuální průtok v $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro měření průtoků při experimentu byl použit průtokoměr typu MQI 99 CN od firmy ELA, spol. s r.o. Kalibrace průtokoměru proběhla v rozsahu průtoků od $Q_{\min} = 0,198 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ do $Q_{\max} = 12,05 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ při teplotě $T = 25,0(1) \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $\phi_r = 56,5(1) \text{ }^\circ\text{C}$ [3]. Pro kalibraci byla použita objemová metoda letmého startu [3].



Obrázek 14 Elektromagnetický indukční průtokoměr DN50

3.2.2 Elektromagnetický indukční průtokoměr DN10

Druhý elektromagnetický indukční průtokoměr použitý k výzkumu s průměrem potrubí DN10 (Obrázek 15) byl typu MQI 99 CN od firmy ELA, spol. s r.o. I ten byl vybaven obrazovkou zobrazující hodnoty celkového proteklého objemu v m^3 a aktuálního průtoků v $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$. Kalibrace proběhla v rozsahu průtoků od $Q_{\min} = 0,0159 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ do $Q_{\max} = 0,5000 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ při teplotě $T = 26,4(1) \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $\phi_r = 45,7(1) \text{ }^\circ\text{C}$ [3]. Jako zkušební metoda byla použita objemová metoda letmým startem [3].



Obrázek 15 Elektromagnetický indukční průtokoměr DN10

3.2.3 Digitální hrotové měřidlo

Digitální hrotové měřidlo (Obrázek 16) sloužilo k stanovení úrovně hladiny nad vrcholem výřezu přelivu. K měřidlu byly připevněny PVC destičky a celá konstrukce byla usazená na hliníkovém H-profilu, který byl umístěný ve vodorovné poloze na stěně žlabu. S celou konstrukcí měřidla se dalo v případě potřeby manipulovat nebo ji zcela odstranit. Digitální obrazovka zobrazující vzdálenost na 2 desetinná místa měla rozsah hodnot 0– 430 mm. Ke spodní části posuvného číselníku byl připevněn hrot pro přesné stanovení úrovně hladiny.



Obrázek 16 Digitální hrotové měřidlo

3.2.4 Délkové měřidlo

Délkové měřidlo bylo pravítko délky 430 mm (Obrázek 17). Sloužilo především k urovnání potrubí a přelivu do středu žlabu tak, aby byl vrchol výřezu přelivu v nejnižším místě potrubí. Stupnice měřidla byla znázorněna s přesností na milimetry.



Obrázek 17 Délkové měřidlo

3.2.5 Vodováha

Vodováha značky Horizont (Obrázek 18) s optickou libelou byla použita k urovnání přelivu a potrubí do vodorovné polohy a k jejich kontrole v průběhu měření. Přesnost měřidla byla 0,5 mm na 1 m.



Obrázek 18 Použitá vodováha

4 MĚŘENÍ

4.1 Rozsah výzkumu

Rozsah měření byl závislý na kombinaci 5 přelivů s trojúhelníkovým výřezem o úhlech $\alpha = (10,117, 20,230, 30,534, 60,674, 90,167)^\circ$ a několika požadovaných přepadových výškách $h = (0,05, 0,07, 0,09, 0,11, 0,13, 0,15, 0,17, 0,19, 0,21, 0,22)$ m. Kombinací těchto dvou parametrů bylo pro potrubí DN250 provedeno 36 měření a pro potrubí DN200 24 měření. Celkem bylo provedeno 60 měření.

4.2 Postup měření

Prvním krokem bylo nastavit ve žlabu požadovanou úroveň hladiny. To se provedlo nastavením frekvence čerpadla f na ovládacím panelu. Nastavená frekvence udávala průtok Q , od kterého se odvíjela úroveň hladiny h . Iteračním způsobem se našla taková frekvence, která vytvářela požadovanou úroveň hladiny s maximální odchylkou 1 mm. Frekvence byly zaznamenávány do tabulky pro urychlení následujících iterací. Spolu s frekvencemi byla zaznamenávána i teplota vody T . Po ustálení, kdy se v čase neměnila úroveň hladiny, započalo měření.

Nejprve se fotografií zaznamenal počáteční objem proteklé vody V_1 a aktuální čas t_1 . Poté se pomocí hrotového měřidla 5× odečetla úroveň hladiny, která se rovnala přepadové výšce h . Po odečtení všech pěti hodnot se fotografií zaznamenal koncový objem proteklé vody V_2 a aktuální čas t_2 .

4.2.1 Stanovení průtoku

Na většinu měření byl používán průtokoměr DN50 s měřitelným rozsahem průtoku od $Q_{\min} = 0,48 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ po $Q_{\max} = 9,8 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. V několika málo případech bylo nutné napojit průtokoměr DN10 s rozsahem $Q_{\min} = 0,297 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ po $Q_{\max} = 0,48 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$.

Měření začalo pořízením fotografie obsahující obrazovku průtokoměru zobrazující hodnotu proteklého objemu na začátku měření V_1 s přesností na 3 desetinná místa a displej hodinek ukazující aktuální čas t_1 s přesností na sekundy (Obrázek 19). Následovalo měření úrovně hladiny. Jakmile bylo doměřeno a zároveň

uplynuly minimálně 3 minuty, byla pořízena další fotografie obrazovky průtokoměru zobrazující hodnotu proteklého objemu po dokončení měření V_2 a displej hodinek ukazující přesný čas ukončení měření t_2 . Z časů a objemů byl podle vztahu

$$Q = \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1} \quad (4.1)$$

vypočten průtok Q . Z důvodu zaokrouhlení a průměrování v čase nebyla použita hodnota průtoku zobrazená na obrazovce průtokoměru. Tato hodnota byla použita pouze pro hrubou kontrolu provedeného měření.



Obrázek 19 Ukázka zaznamenání proteklého objemu a času

4.2.2 Stanovení přepadové výšky

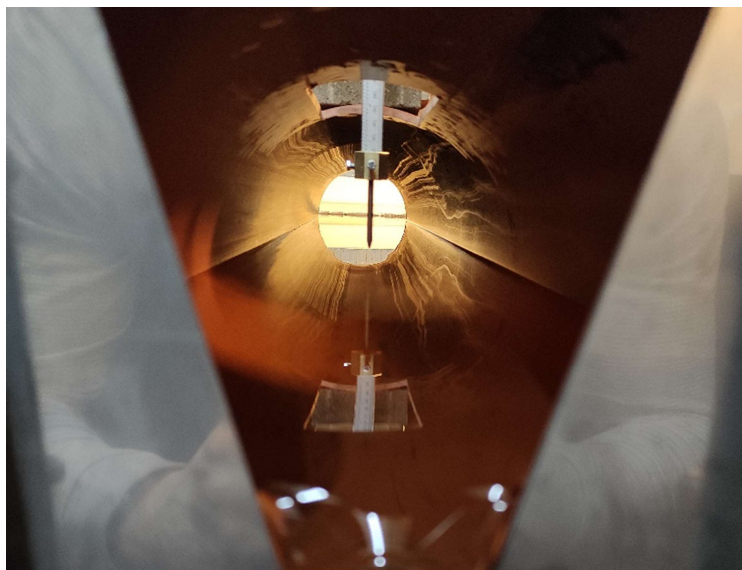
Pro správné měření úrovně hladiny pro stanovení přepadové výšky bylo potřeba počkat určitou dobu, než se úroveň hladiny ustálila. Tato doba se odvíjela od aktuálního průtoku. Ověřování ustálení hladiny probíhalo podobným způsobem jako samotné měření. Pomocí hrotového měřidla se sledoval pokles nebo nárůst úrovně hladiny vody v čase. Jakmile nedocházelo ke změně úrovně hladiny, mohlo začít měření.

Měření úrovně hladiny bylo provedeno digitálním posuvným měřidlem s připevněným hrotem (digitální hrotové měřidlo), které bylo umístěno 0,50 m od přelivu v případě potrubí DN250 a 0,40 m od přelivu v případě potrubí DN200. Posuvná část měřidla s hrotem se pomalu spouštěla k hladině (Obrázek 20). Hladina byla bez pulzací. Při kontaktu hrotu měřidla s hladinou vody došlo vlivem povrchového napětí k přilnutí vody k hrotu. V tento moment byla nalezena úroveň hladiny nad vrcholem výřezu přelivu a byl zaznamenán údaj z displeje měřidla. Následně se měřidlo vysunulo nad hladinu, hrot se usušil a celý postup se opakoval.

Měření úrovně hladiny bylo prováděno na 2 desetinná místa s požadovanou odchylkou menší než 0,5 mm při pěti měřeních.

Přepadová výška byla vypočítána z pěti změřených hodnot úrovně hladiny (výška přelivu byla 0 m), tedy z pěti přepadových výšek, provedených v čase stanovení průtoku dle rovnice

$$h = \frac{\sum_{i=1}^5 h_i}{5}. \quad (4.2)$$



Obrázek 20 Pohled na digitální hrotové měřidlo při měření úrovně hladiny

4.3 Chyby a nejistoty měření

Během přípravy měřicího zařízení i při samotném měření docházelo ke vzniku chyb. Velký vliv na ně má především lidský faktor. Jedná se například o netěsné

upevnění přelivu v rámu nebo potrubí na přelivu a tím způsobený průtok vody mezi přelivem a žlabem nebo přelivem a potrubím, prohnutí desky přelivu, nesymetrické uspořádání přelivu vůči potrubí, nepřesné určení úrovně hladiny hrotovým měřidlem atd. Potrubí nemuselo být dokonale přesně vyrobené a mohlo být prohnuté nebo mít v některých místech větší tloušťku stěny. Výřez nemusel mít z výroby zcela rovné hrany, úprava hran koruny nemusela být zcela pravoúhlá.

Mezi významné nejistoty při stanovení součinitele průtoku patří zejména nejistoty měřených veličin, které obsahuje rovnice (2.1):

- nejistota měření úrovně hladiny a úrovně vrcholu výřezu pro stanovení přepadové výšky,
- nejistota měření proteklého objemu a doby pro stanovení průtoku,
- nejistota měření úhlu výřezu.

4.4 Změřená data

Změřená data pro potrubí DN250 uvádí Tabulka 4-1 a data pro DN200 Tabulka 4-2.

Tabulka 4-1 Změřená data pro potrubí DN250

| d [m] | α [°] | T °C | h [m] | Q [l/s] |
|------------|-----------------|-----------|------------|--------------|
| 0.2378 | 10.12 | 16.2 | 0.1104 | 0.5743 |
| 0.2378 | 10.12 | 16.2 | 0.1307 | 0.8558 |
| 0.2378 | 10.12 | 16.1 | 0.1501 | 1.1981 |
| 0.2378 | 10.12 | 16.2 | 0.1703 | 1.6264 |
| 0.2378 | 10.12 | 16.2 | 0.1904 | 2.1269 |
| 0.2378 | 10.12 | 16.1 | 0.2104 | 2.7321 |
| 0.2378 | 10.12 | 16.1 | 0.2204 | 3.0644 |
| 0.2378 | 20.23 | 15.7 | 0.0732 | 0.3960 |
| 0.2378 | 20.23 | 15.6 | 0.0936 | 0.7269 |
| 0.2378 | 20.23 | 15.6 | 0.1138 | 1.1687 |
| 0.2378 | 20.23 | 15.3 | 0.1323 | 1.6890 |
| 0.2378 | 20.23 | 15.3 | 0.1537 | 2.4292 |
| 0.2378 | 20.230 | 15.3 | 0.1731 | 3.2837 |
| 0.2378 | 20.23 | 15.2 | 0.1932 | 4.3402 |
| 0.2378 | 20.23 | 15.2 | 0.2124 | 5.5129 |
| 0.2378 | 20.23 | 15.2 | 0.2240 | 6.3029 |
| 0.2378 | 30.53 | 16.0 | 0.0701 | 0.5377 |
| 0.2378 | 30.53 | 16.0 | 0.0902 | 1.0000 |
| 0.2378 | 30.53 | 16.0 | 0.1097 | 1.6176 |
| 0.2378 | 30.53 | 16.0 | 0.1305 | 2.4769 |
| 0.2378 | 30.53 | 15.9 | 0.1501 | 3.4975 |
| 0.2378 | 30.53 | 15.9 | 0.1703 | 4.7952 |
| 0.2378 | 30.53 | 15.9 | 0.1900 | 6.3660 |
| 0.2378 | 30.53 | 15.9 | 0.2100 | 8.2786 |
| 0.2378 | 30.53 | 15.8 | 0.2201 | 9.3731 |
| 0.2378 | 60.67 | 16.2 | 0.0499 | 0.4950 |
| 0.2378 | 60.67 | 16.2 | 0.0699 | 1.1390 |
| 0.2378 | 60.67 | 16.3 | 0.0898 | 2.1231 |
| 0.2378 | 60.67 | 16.3 | 0.1099 | 3.5638 |
| 0.2378 | 60.67 | 16.3 | 0.1300 | 5.4731 |
| 0.2378 | 60.67 | 16.2 | 0.1503 | 8.0860 |
| 0.2378 | 60.67 | 16.2 | 0.1699 | 11.159 |
| 0.2378 | 91.17 | 15.3 | 0.0502 | 0.9126 |
| 0.2378 | 91.17 | 15.3 | 0.0698 | 2.1364 |
| 0.2378 | 91.17 | 15.3 | 0.0902 | 4.1968 |
| 0.2378 | 91.17 | 15.4 | 0.1102 | 7.2421 |

Tabulka 4-2 Změřená data pro potrubí DN200

| d [m] | α [°] | T °C | h [m] | Q [l/s] |
|------------|-----------------|-----------|------------|--------------|
| 0.191 | 10.12 | 16.7 | 0.10998 | 0.5812 |
| 0.191 | 10.12 | 16.7 | 0.12996 | 0.8679 |
| 0.191 | 10.12 | 16.7 | 0.14986 | 1.2204 |
| 0.191 | 10.12 | 16.8 | 0.17006 | 1.6486 |
| 0.191 | 20.23 | 17.3 | 0.07019 | 0.3558 |
| 0.191 | 20.23 | 17.3 | 0.09004 | 0.6613 |
| 0.191 | 20.23 | 17.3 | 0.11001 | 1.0773 |
| 0.191 | 20.23 | 17.2 | 0.12988 | 1.6284 |
| 0.191 | 20.23 | 17.2 | 0.15004 | 2.3315 |
| 0.191 | 20.23 | 17.1 | 0.17018 | 3.1882 |
| 0.191 | 30.53 | 17.1 | 0.07018 | 0.5455 |
| 0.191 | 30.53 | 17.2 | 0.08978 | 0.9892 |
| 0.191 | 30.53 | 17.2 | 0.10995 | 1.6296 |
| 0.191 | 30.53 | 17.2 | 0.12978 | 2.4509 |
| 0.191 | 30.53 | 17.1 | 0.14992 | 3.5746 |
| 0.191 | 30.53 | 17.1 | 0.17002 | 4.9534 |
| 0.191 | 60.67 | 16.5 | 0.05037 | 0.5183 |
| 0.191 | 60.67 | 16.4 | 0.07023 | 1.1915 |
| 0.191 | 60.67 | 16.4 | 0.08979 | 2.2092 |
| 0.191 | 60.67 | 16.3 | 0.10989 | 3.8382 |
| 0.191 | 60.67 | 16.3 | 0.13017 | 6.0183 |
| 0.191 | 91.17 | 16.3 | 0.05002 | 0.8974 |
| 0.191 | 91.17 | 16.4 | 0.06996 | 2.1723 |
| 0.191 | 91.17 | 16.4 | 0.09016 | 4.4464 |

5 ZPRACOVÁNÍ ZMĚŘENÝCH DAT A JEJICH VYHODNOCENÍ

5.1 Zpracování dat

Energetická přepadová výška byla vypočítána dle rovnice (součinitel kinetické energie nebyl uvažován z důvodu neznalosti rychlostního pole)

$$H = h + \frac{Q^2}{S_0^2 \cdot 2 \cdot g'} \quad (5.1)$$

kde S_0 je průtočný průřez potrubí v profilu měření hladiny vody, který se vypočítá z rovnice

$$S_0 = \frac{r^2}{2} (\phi - \sin \phi), \quad (5.2)$$

kde ϕ je středový úhel, který se vypočítá z rovnic

$$\phi_{h < r} = 2 \cdot \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right), \quad (5.3)$$

$$\phi_{h > r} = 2 \cdot \pi - 2 \cdot \arccos\left(\frac{h-r}{r}\right). \quad (5.4)$$

kde r je vnitřní poloměr potrubí.

Součinitel průtoku pro přepadovou výšku C_d byl vypočítán rovnicí (2.1). Součinitel průtoku pro energetickou přepadovou výšku C_D byl vypočítán rovnicí (2.2).

Průtočná plocha výřezu S_V byla spočítána dle rovnice

$$S_V = h \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot h. \quad (5.5)$$

Šířka hladiny vody v potrubí B byla spočítána rovnicí

$$B = 2 \cdot \{[r^2 - (r - s)^2]\}^{1/2}, \quad (5.6)$$

kde

$$s_{h < r} = h, \quad (5.7)$$

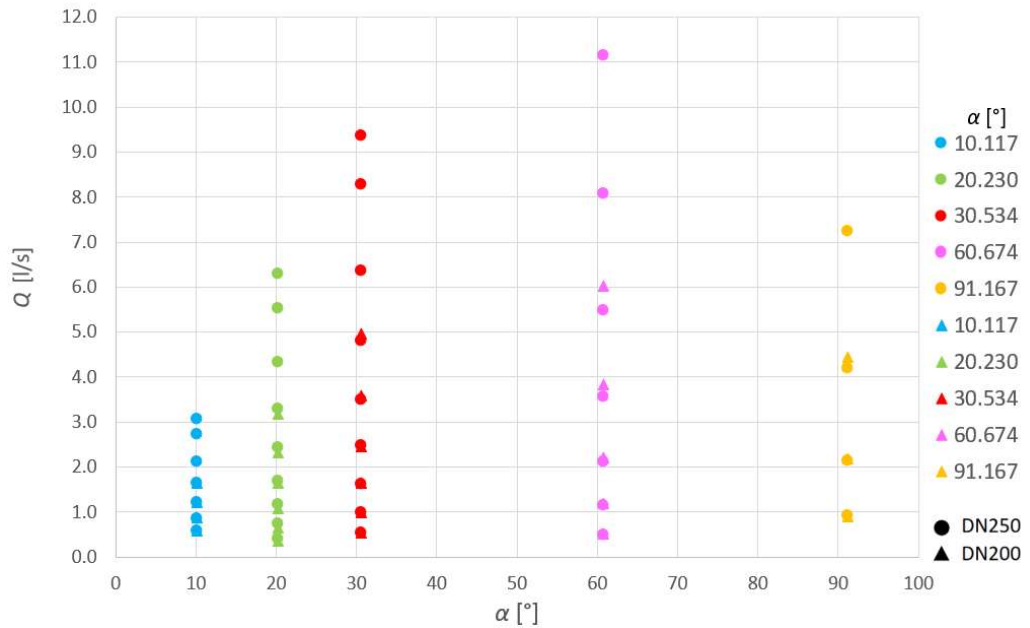
$$s_{h > r} = d - h. \quad (5.8)$$

Šířka výřezu v úrovni hladiny b byla určena rovnicí

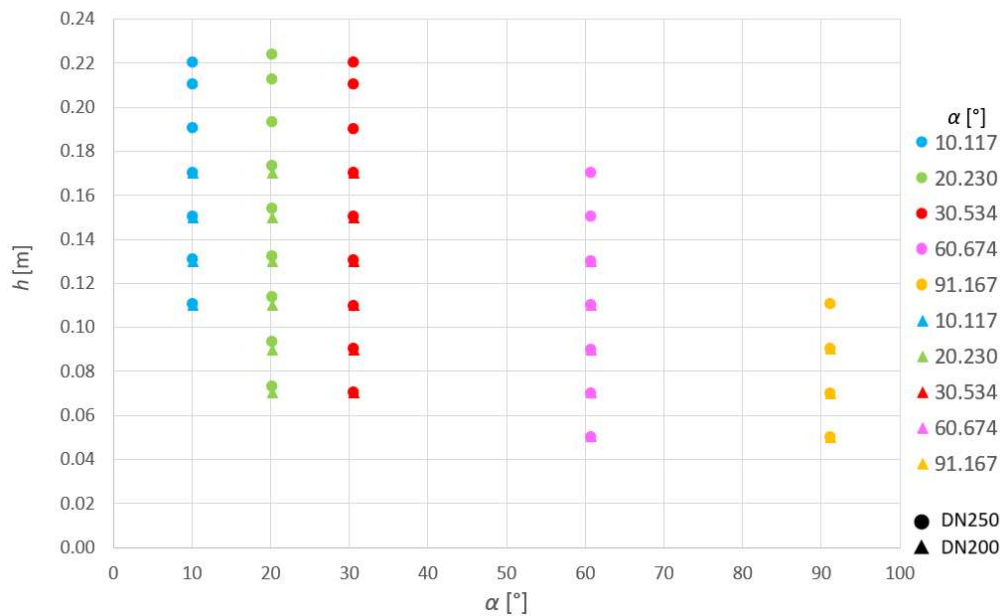
$$b = 2 \cdot h \cdot \tan \frac{\alpha}{2}. \quad (5.9)$$

5.2 Vyhodnocení změřených dat

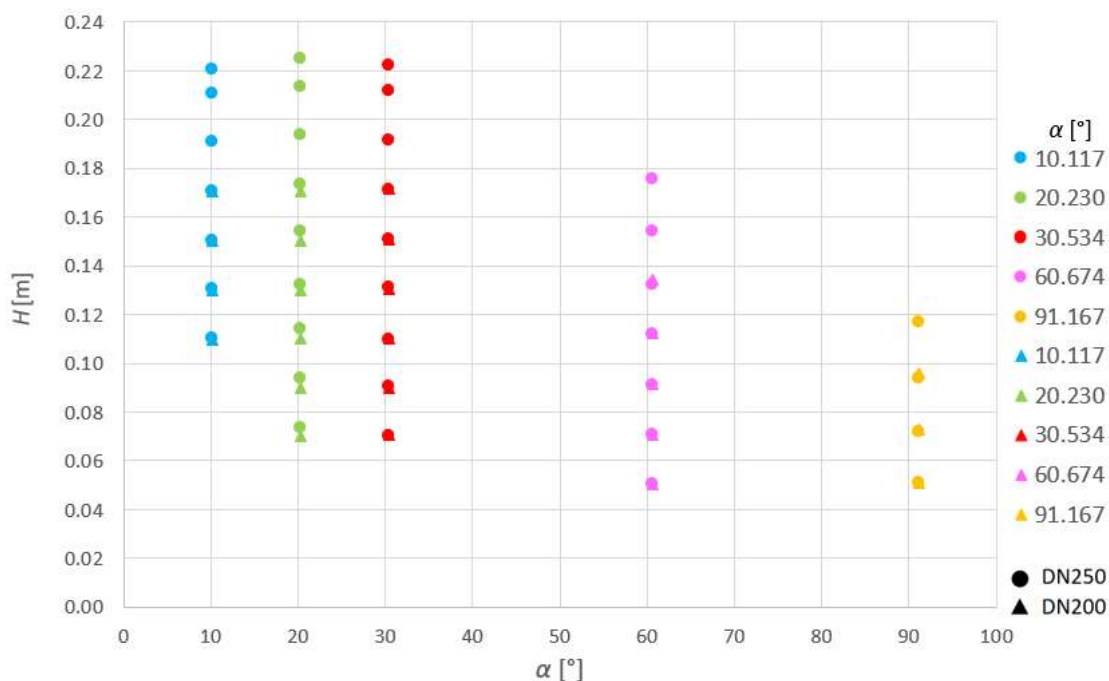
Naměřené hodnoty byly pro lepší pochopení rozsahu měření zpracovány do grafů. Pro vykreslení byl průtok Q (Graf 1), přepadová výška h (Graf 2) a energetická přepadová výška H (Graf 3) pro oba průměry potrubí vztaženy k úhlu výřezu tenkostěnného přelivu α .



Graf 1 Rozsah měření v závislosti průtoku na úhlu výřezu přelivu

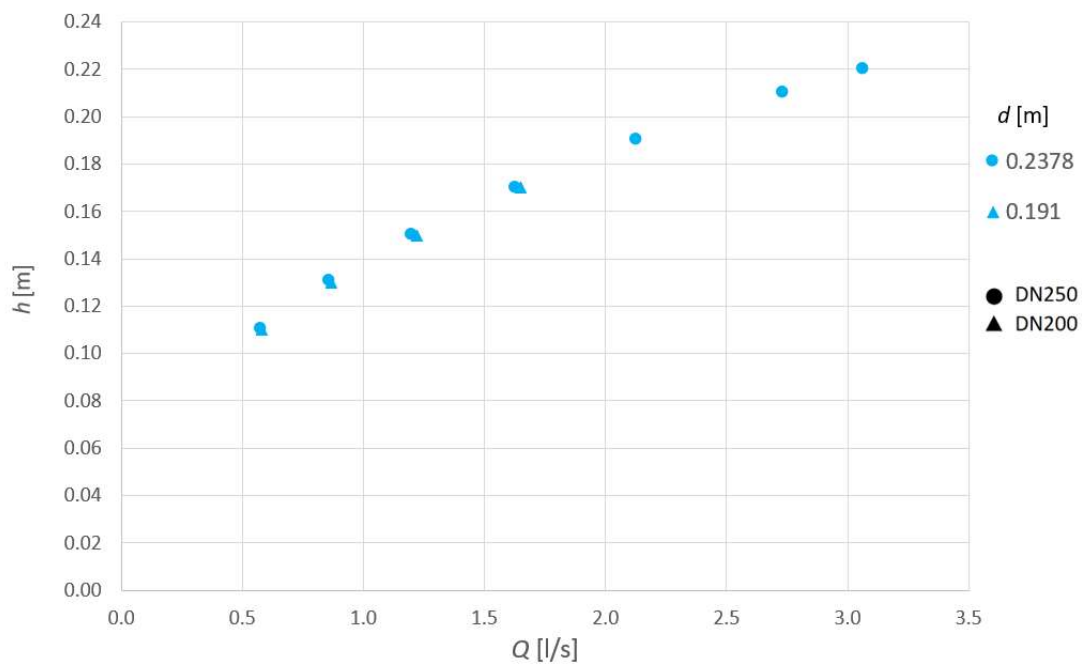


Graf 2 Rozsah měření v závislosti přepadové výšky na úhlu výřezu

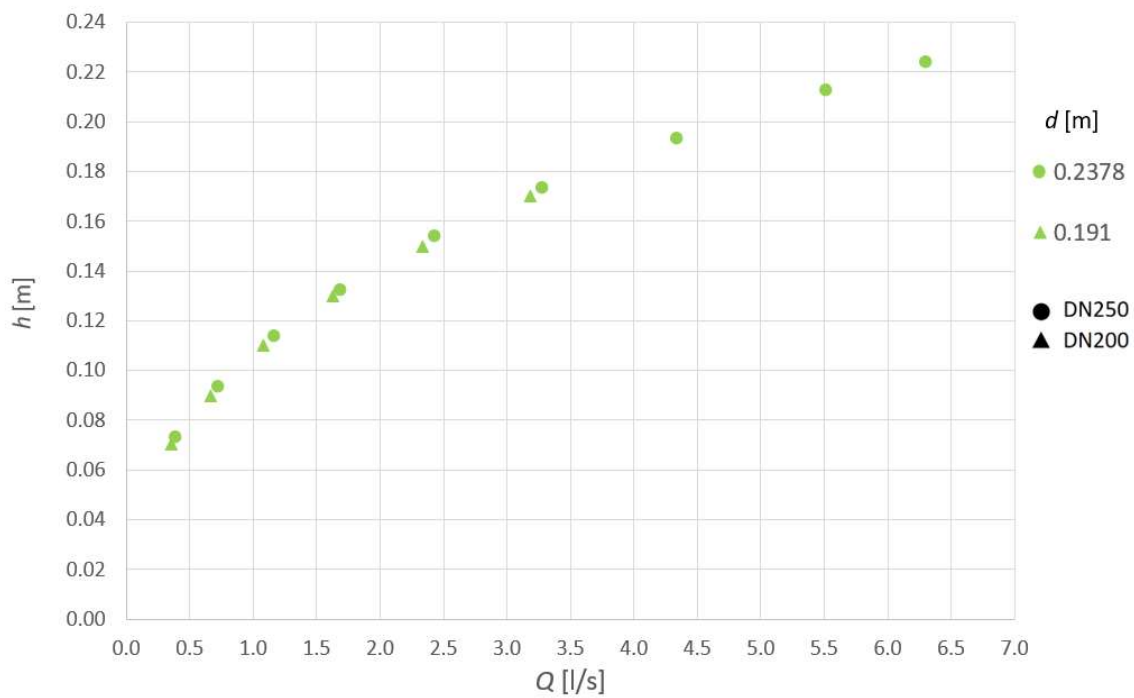


Graf 3 Rozsah měření v závislosti energetické přepadové výšky na úhlu výřezu

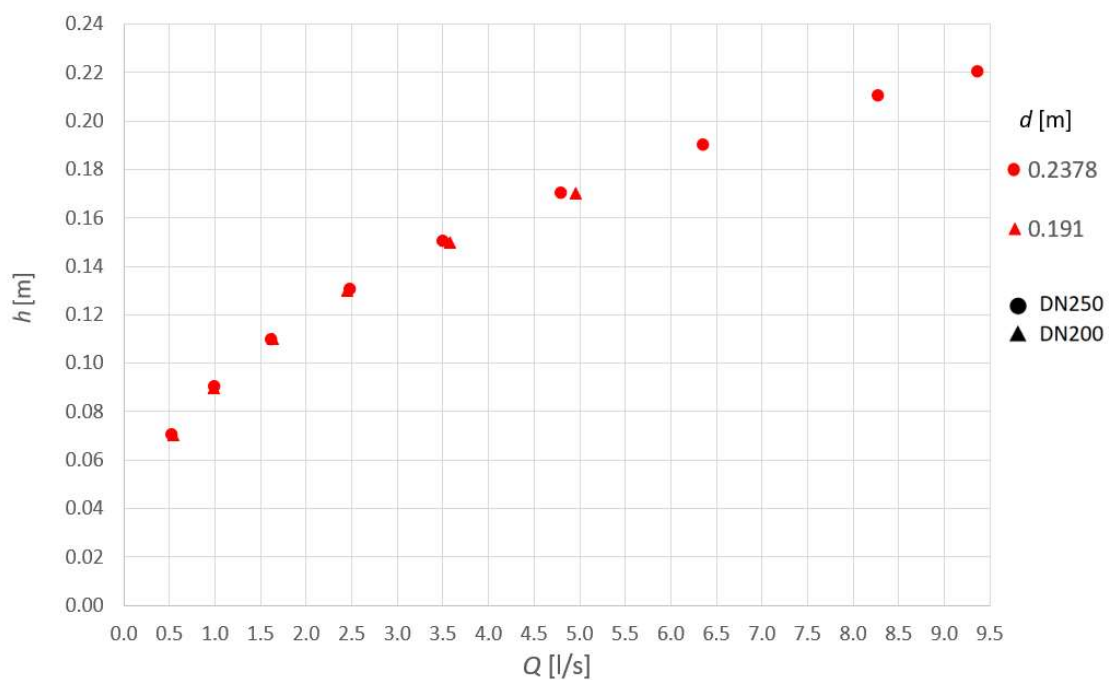
Dále byly z naměřených hodnot vytvořeny grafy zobrazující závislost přepadové výšky h na průtoku Q pro všechny velikosti úhlů výřezů (Graf 4 Graf 10), (Graf 5), (Graf 6), (Graf 7) a (Graf 8). V grafech byly použity oba průměry potrubí DN250 a DN200. Následně byl vytvořen graf obsahující všechny velikosti úhlů výřezů (Graf 9).



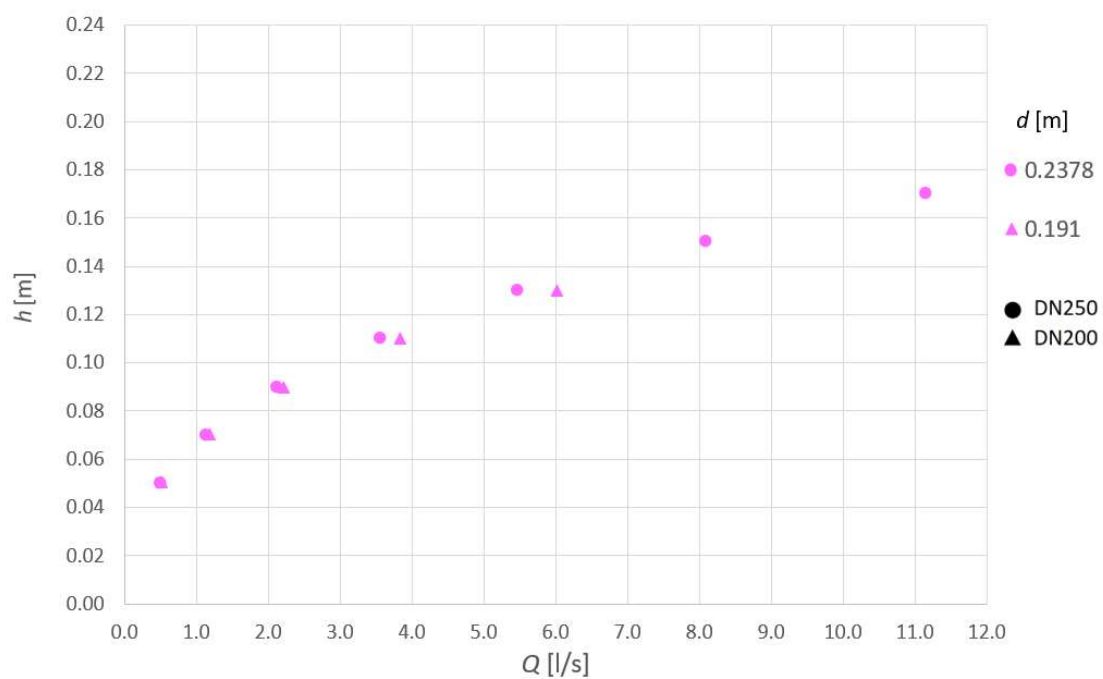
Graf 4 Závislost přepadové výšky na průtoku pro úhel výřezu $\alpha = 10,117^\circ$



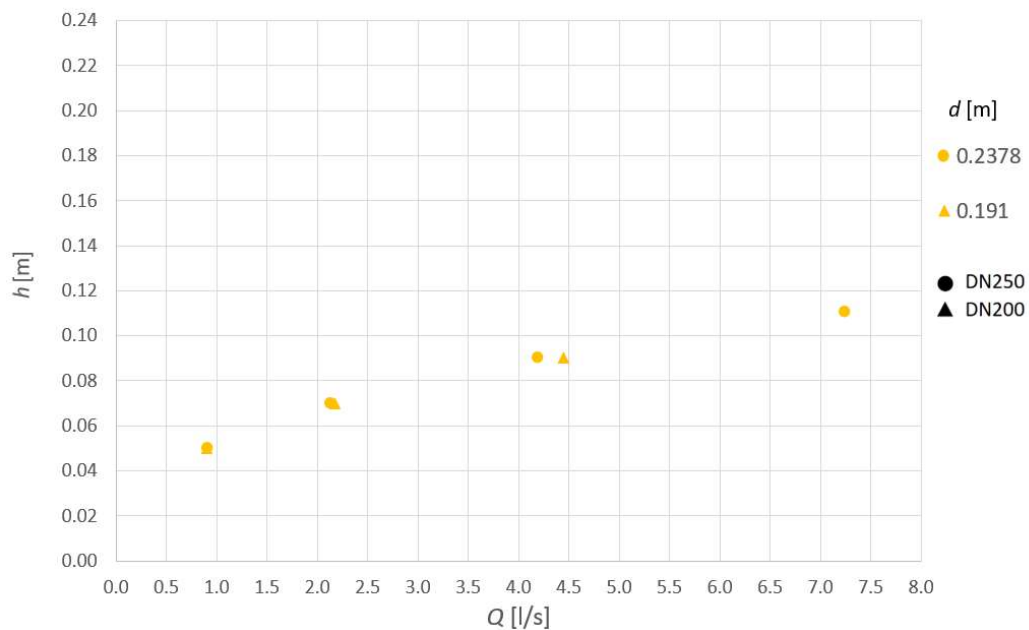
Graf 5 Závislost přepadové výšky na průtoku pro úhel výřezu $\alpha = 20,230^\circ$



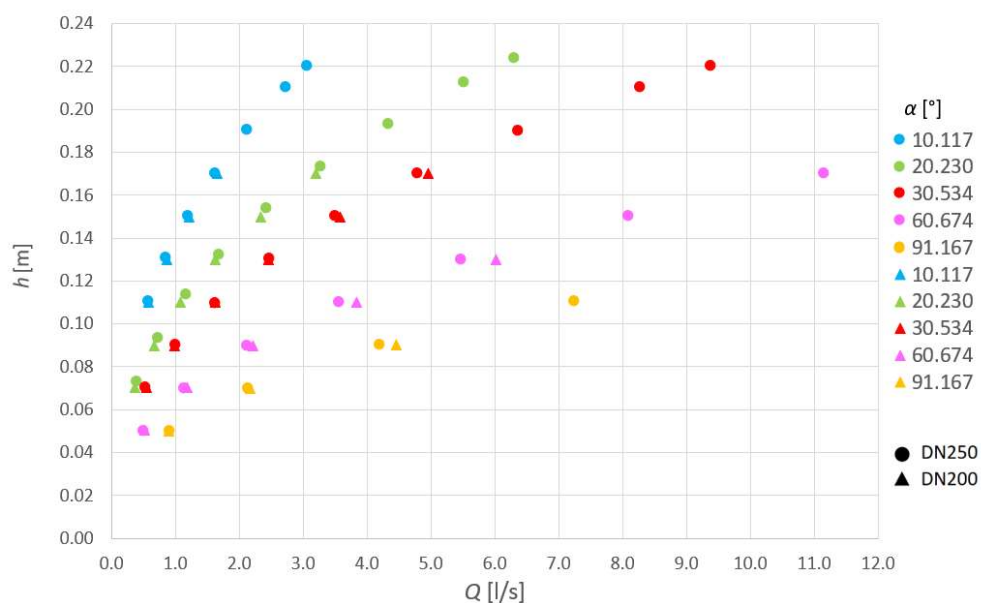
Graf 6 Závislost přepadové výšky na průtoku pro úhel výřezu $\alpha = 30,534^\circ$



Graf 7 Závislost přepadové výšky na průtoku pro úhel výřezu $\alpha = 60,674^\circ$

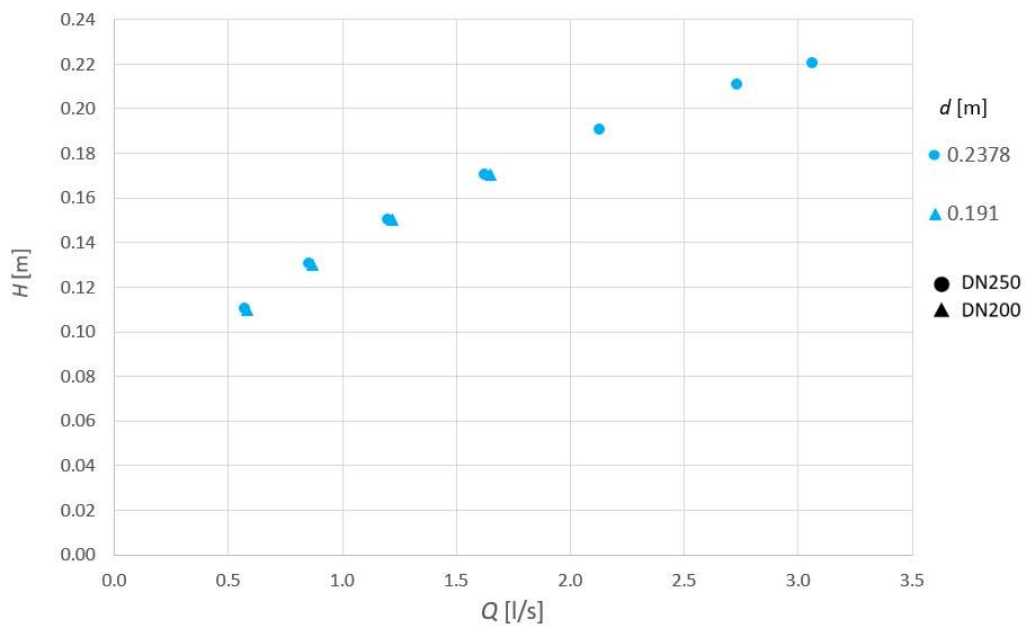


Graf 8 Závislost přepadové výšky na průtoku pro úhel výřezu $\alpha = 91,167^\circ$

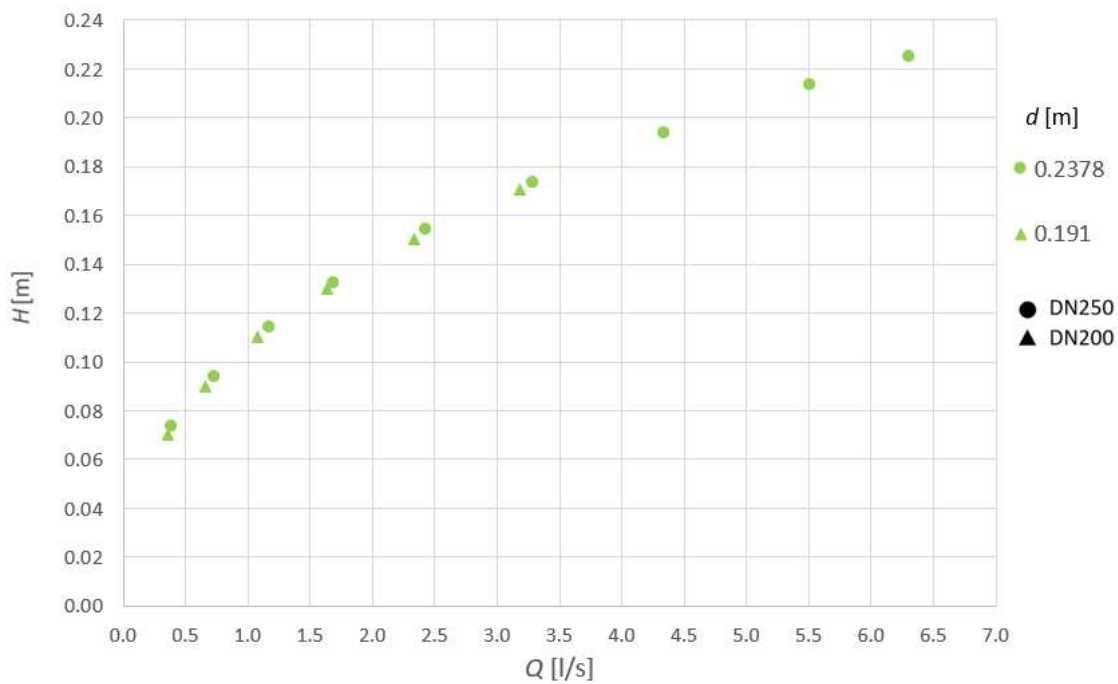


Graf 9 Závislost přepadové výšky na průtoku pro všechny úhly výřezů

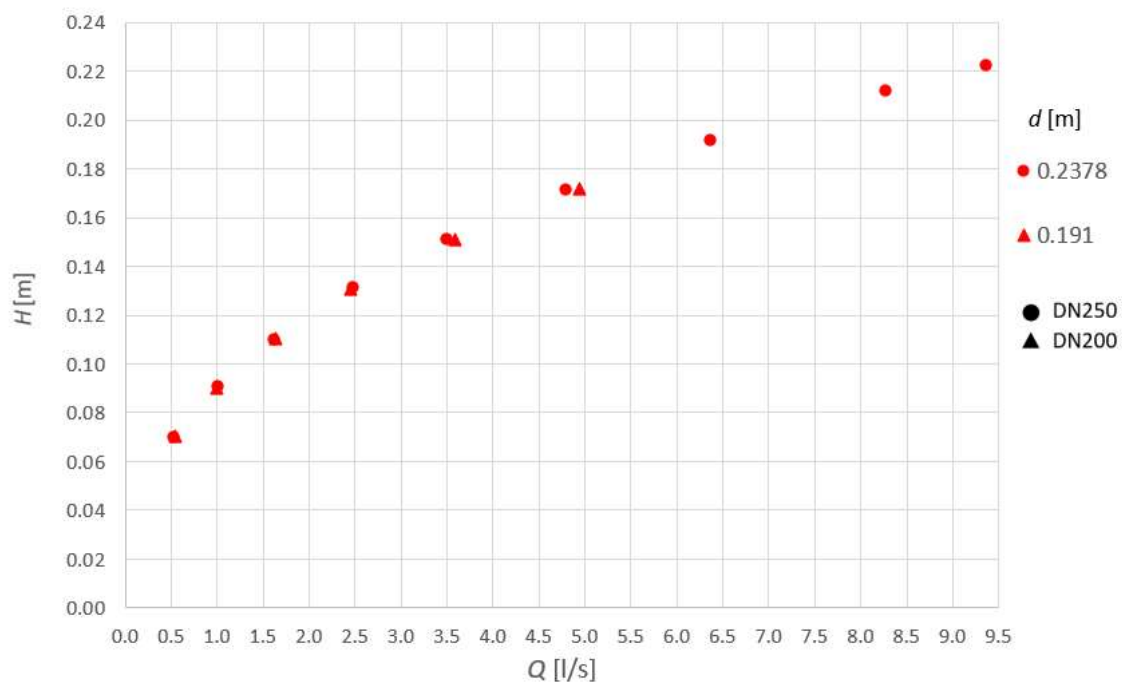
Zároveň byly vytvořeny grafy znázorňující závislost energetické přepadové výšky H na průtoku Q pro všechny velikosti úhlů výřezů s použitím obou potrubí DN250 a DN200 (Graf 10), (Graf 11), (Graf 12), (Graf 13) a (Graf 14). I v tomto případě byl vytvořen graf obsahující všechny velikosti úhlů přelivu (Graf 15).



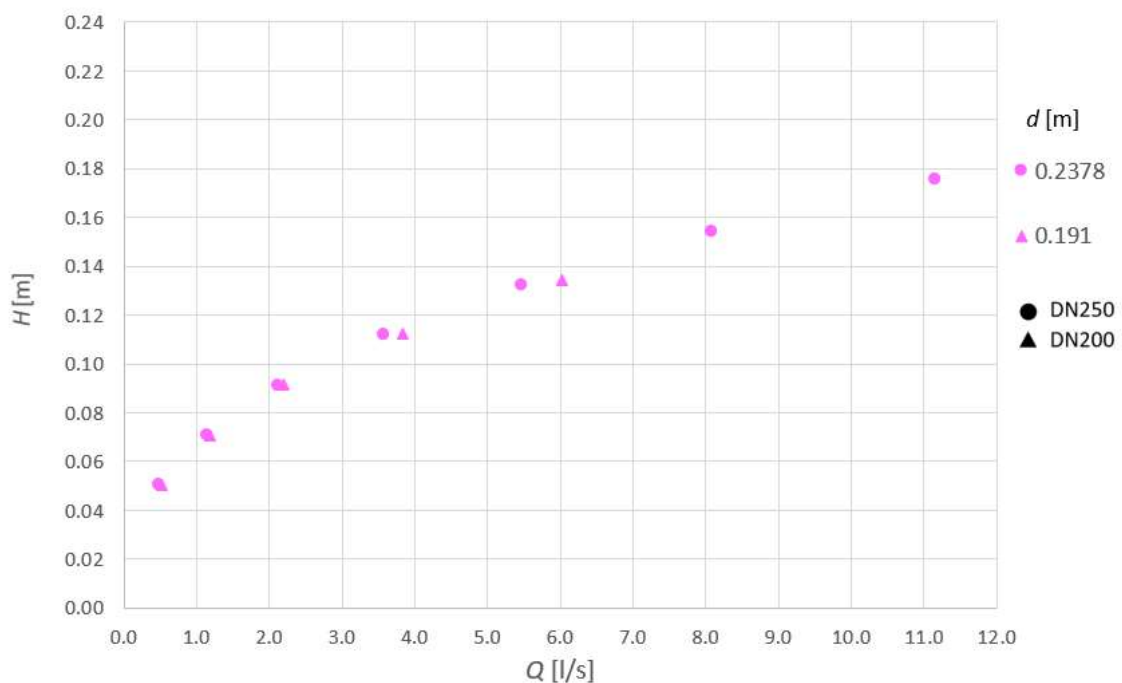
Graf 10 Závislost energetické přepadové výšky na průtoku pro úhel přelivu $\alpha = 10,117^\circ$



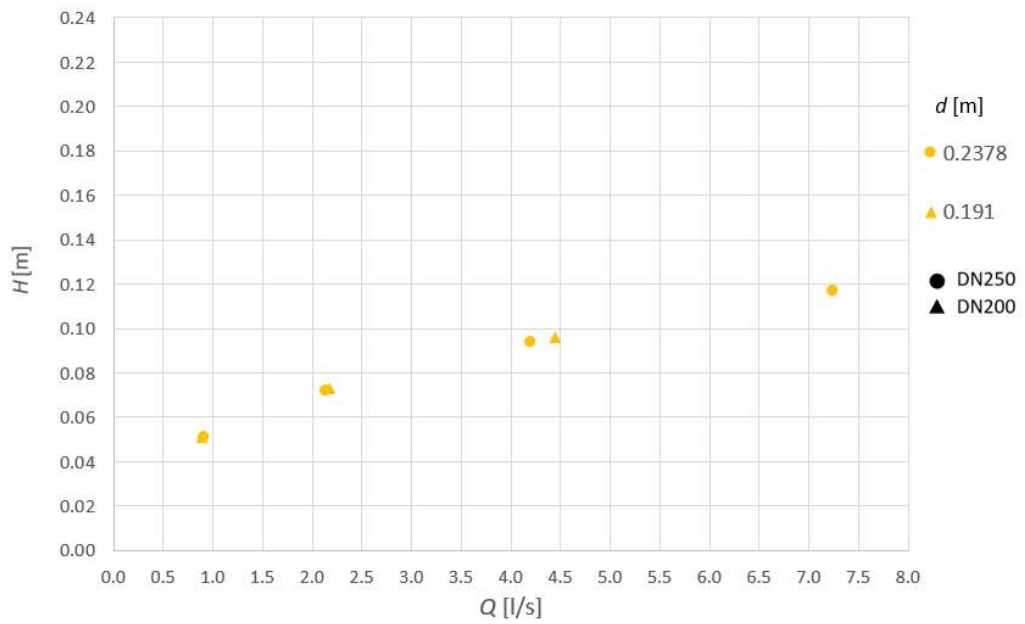
Graf 11 Závislost energetické přepadové výšky na průtoku pro úhel výřezu $\alpha = 20,230^\circ$



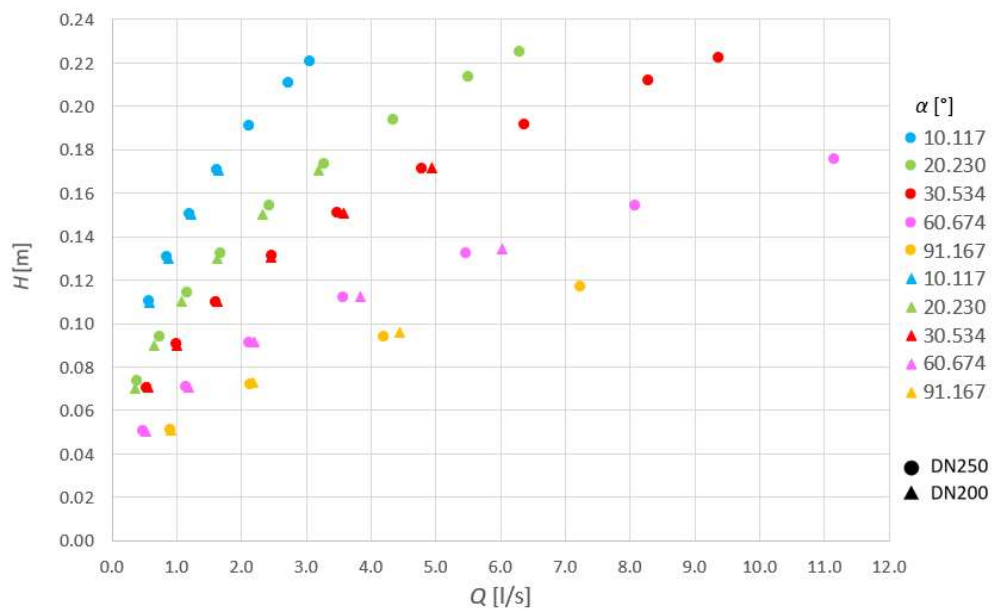
Graf 12 Závislost energetické přepadové výšky na průtoku pro úhel výřezu
 $\alpha = 30,534^\circ$



Graf 13 Závislost energetické přepadové výšky na průtoku pro úhel výřezu
 $\alpha = 60,674^\circ$



Graf 14 Závislost energetické přepadové výšky na průtoku pro úhel výřezu $\alpha = 91,167^\circ$



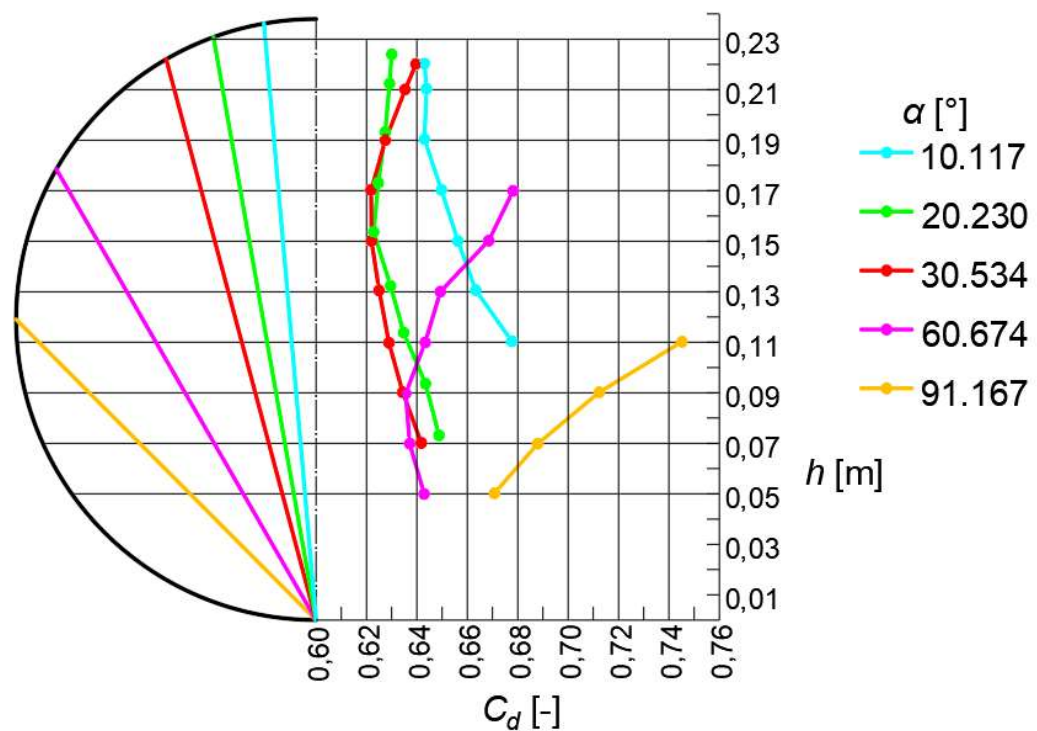
Graf 15 Závislost energetické přepadové výšky na průtoku pro všechny úhly přelivu

Z grafů souhrnně vyplývá, že pro stejnou přepadovou výšku i energetickou přepadovou výšku je průtok pro DN200 vždy větší než průtok pro DN250.

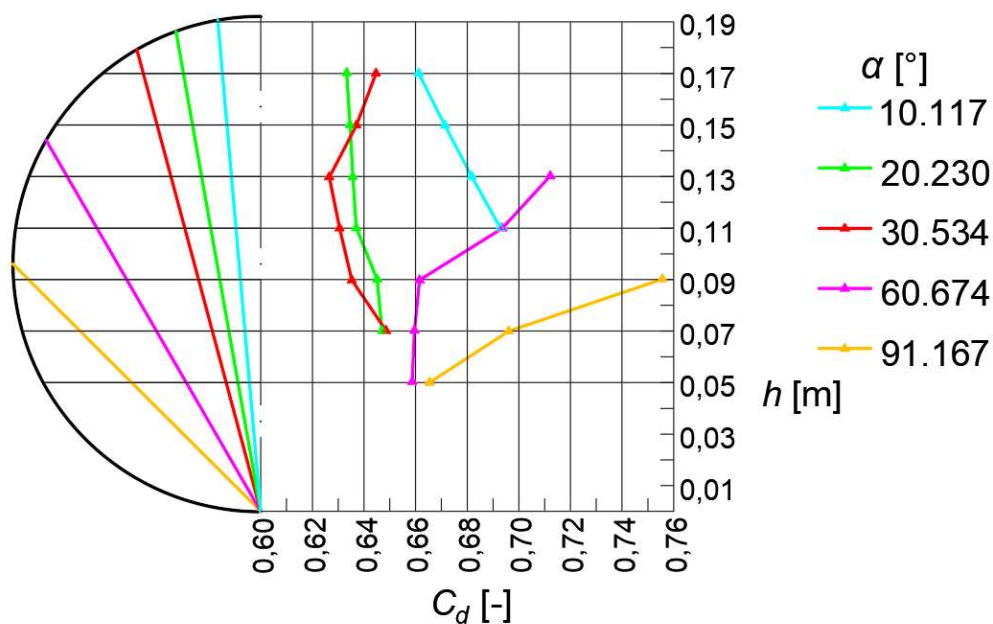
6 VÝSLEDKY

6.1 Součinitel průtoku pro přepadovou výšku C_d

Vypočtené hodnoty součinitele průtoku pro přepadovou výšku C_d byly zaznamenány do grafů v závislosti na různých veličinách, které se odvíjely od parametrů potrubí, přelivu a úrovně hladiny (Obrázek 6). Nejdříve bylo zhotoveno grafické znázornění závislosti součinitele průtoku pro přepadovou výšku C_d na přepadové výšce h pro potrubí DN250 (Graf 16) a DN200 (Graf 17).

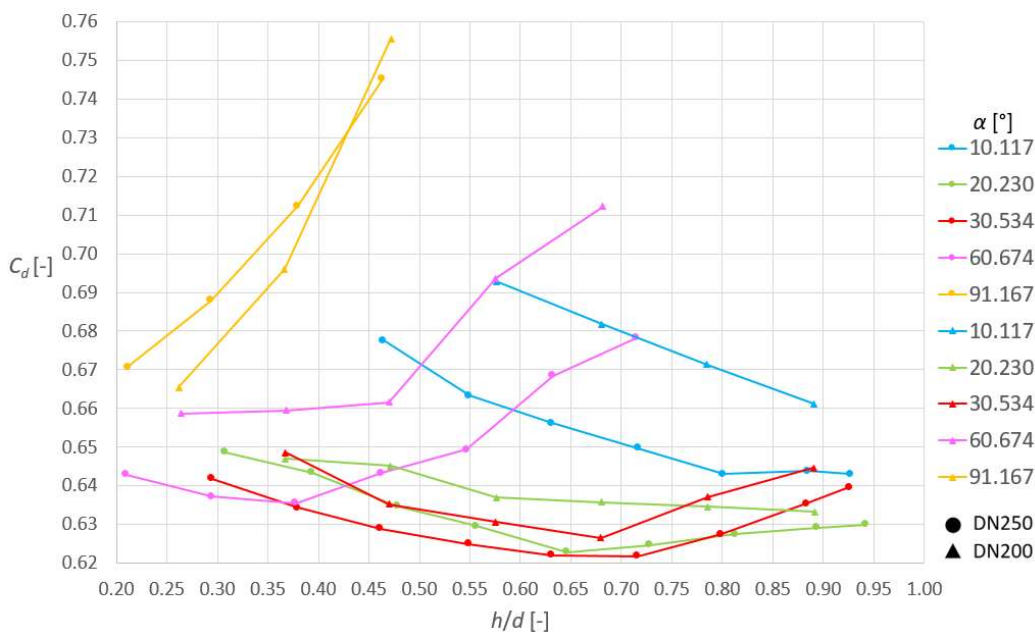


Graf 16 Závislost C_d na h pro DN250

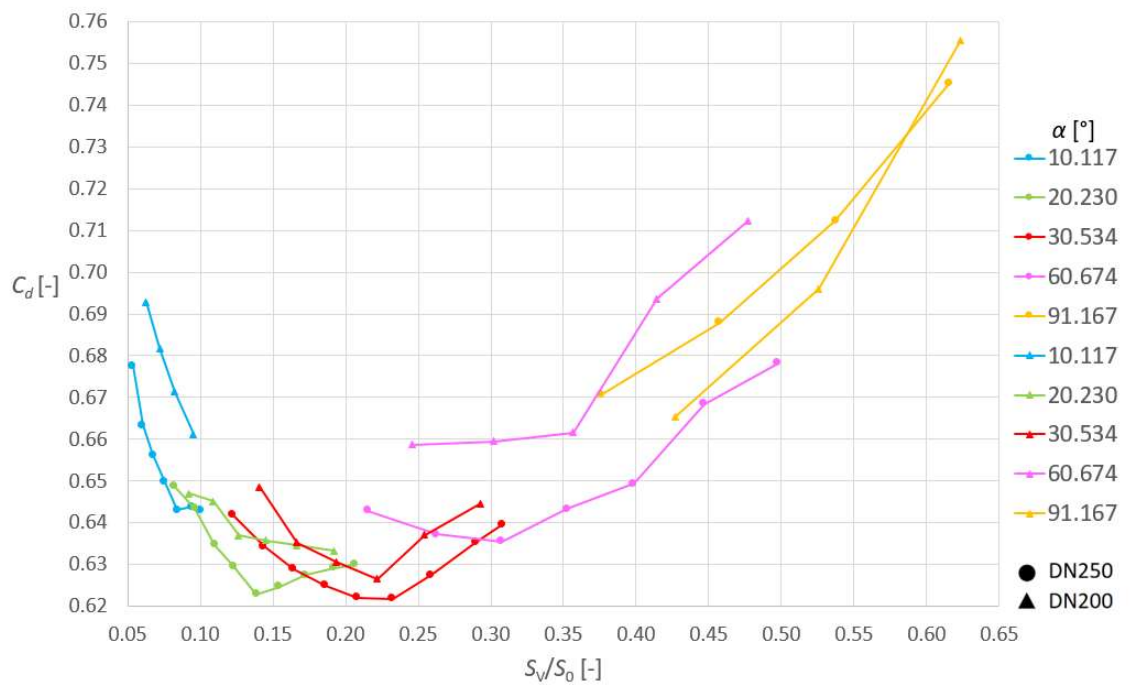


Graf 17 Závislost C_d na h pro DN200

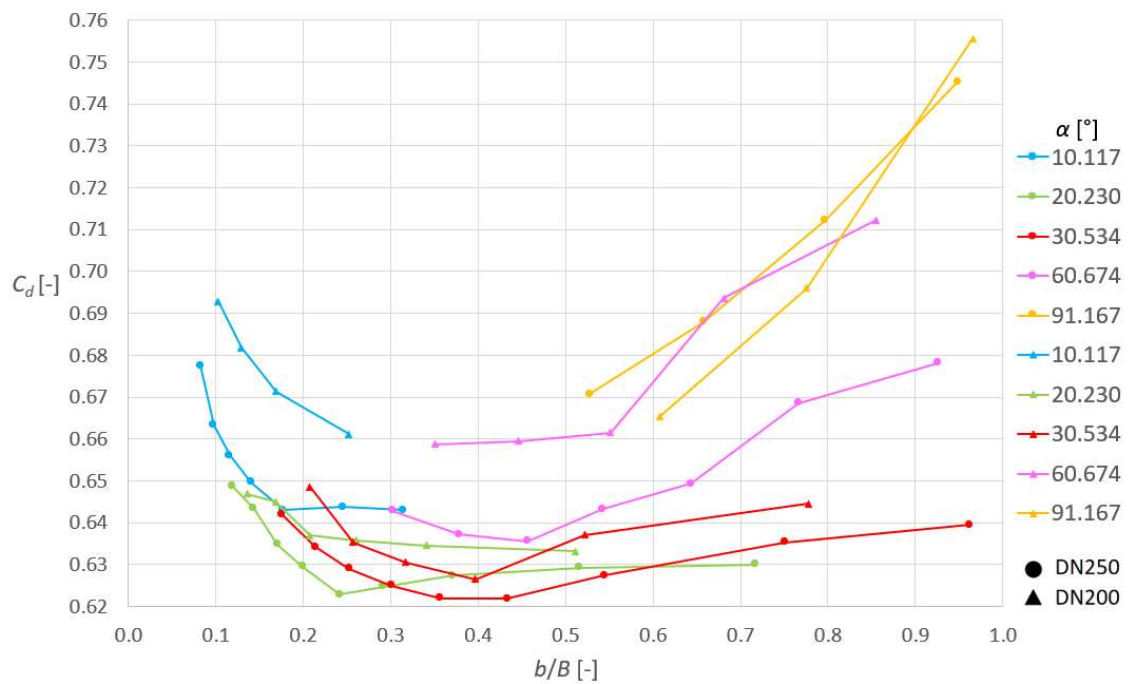
Následně byly vytvořeny grafy znázorňující závislost součinitele průtoku pro přepadovou výšku C_d na poměru přepadové výšky a vnitřního průměru potrubí h/d (Graf 18), poměru průtočné plochy výřezu a průtočné plochy potrubí S_v/S_0 (Graf 19), poměru šířky výřezu v úrovni hladiny a šířky hladiny vody v potrubí b/B (Graf 20) a poměru šířky výřezu v hladině a vnitřnímu průměru potrubí b/d (Graf 21).



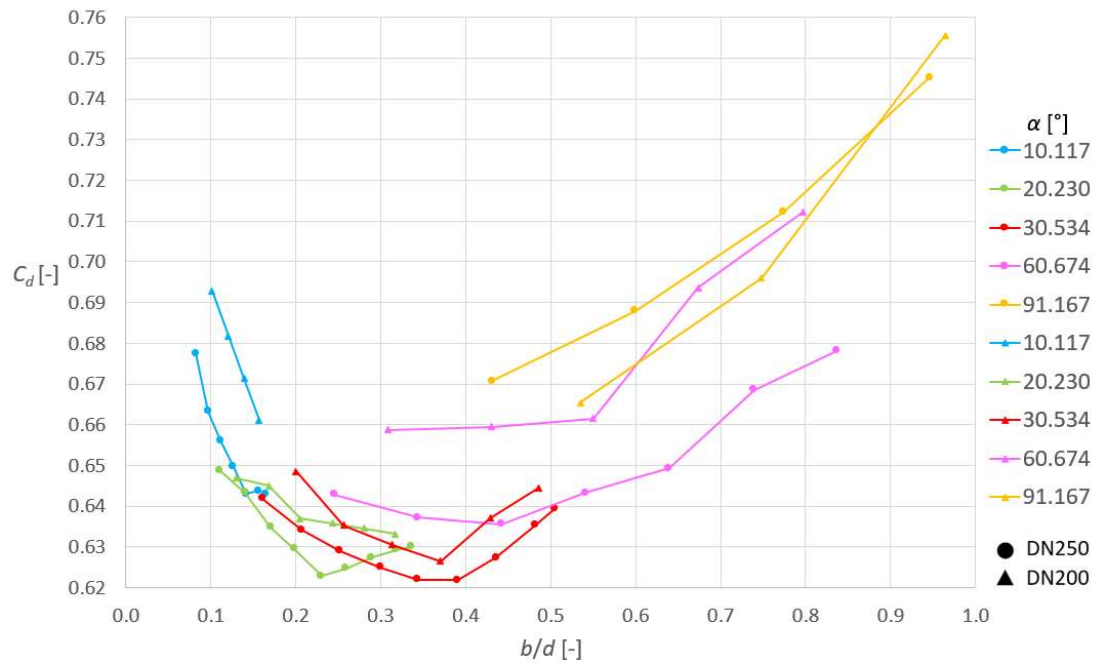
Graf 18 Závislost C_d na h/d



Graf 19 Závislost C_d na S_v/S_0



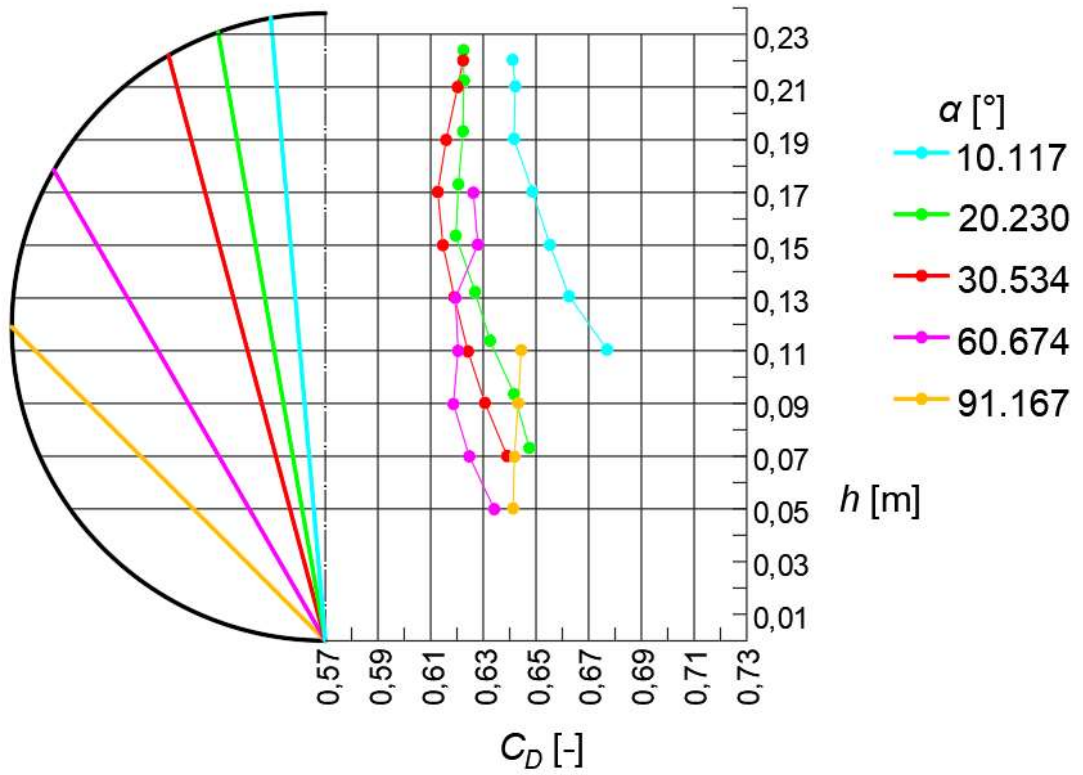
Graf 20 Závislost C_d na b/B



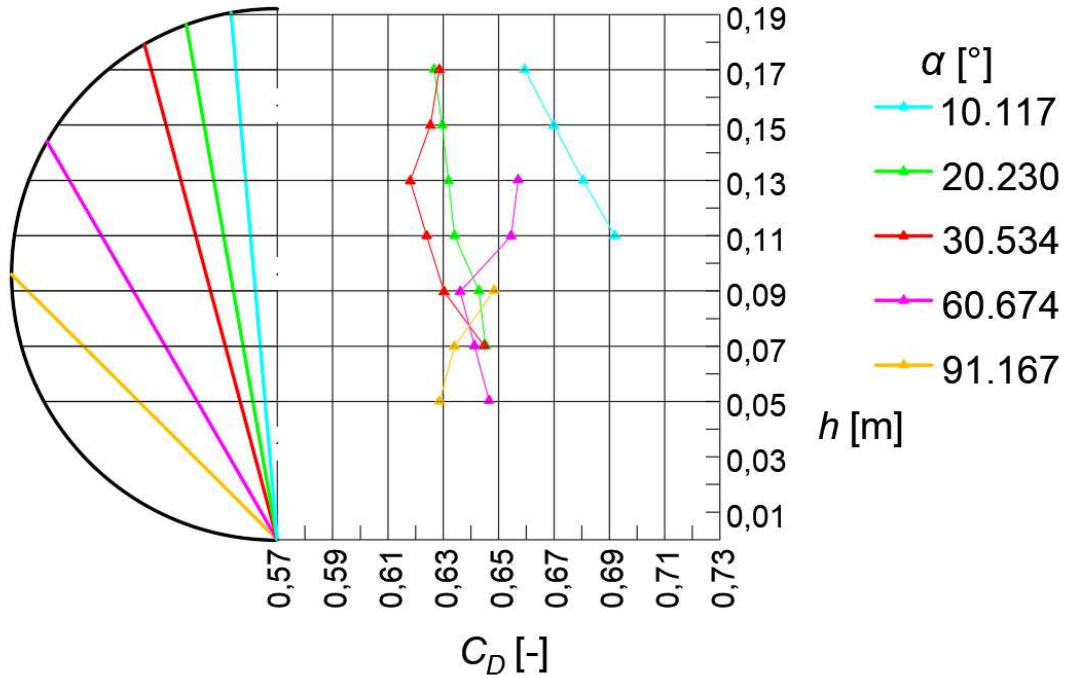
Graf 21 Závislost C_d na b/d

6.2 Součinitel průtoku pro energetickou přepadovou výšku C_D

Podobným způsobem jako v předchozím případě byly vytvořeny grafy v případě součinitele průtoku pro energetickou přepadovou výšku C_D . Prvně byla vytvořena grafická závislost součinitele průtoku pro energetickou přepadovou výšku C_D na přepadové výšce h pro potrubí DN250 (Graf 22) a DN200 (Graf 23).

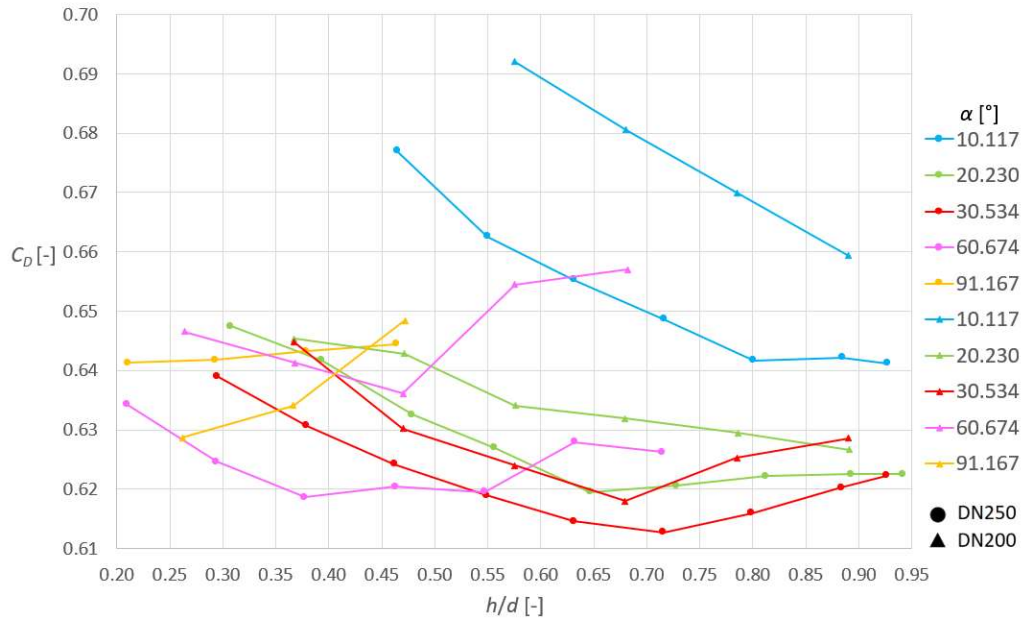


Graf 22 Závislost C_D na h pro DN250

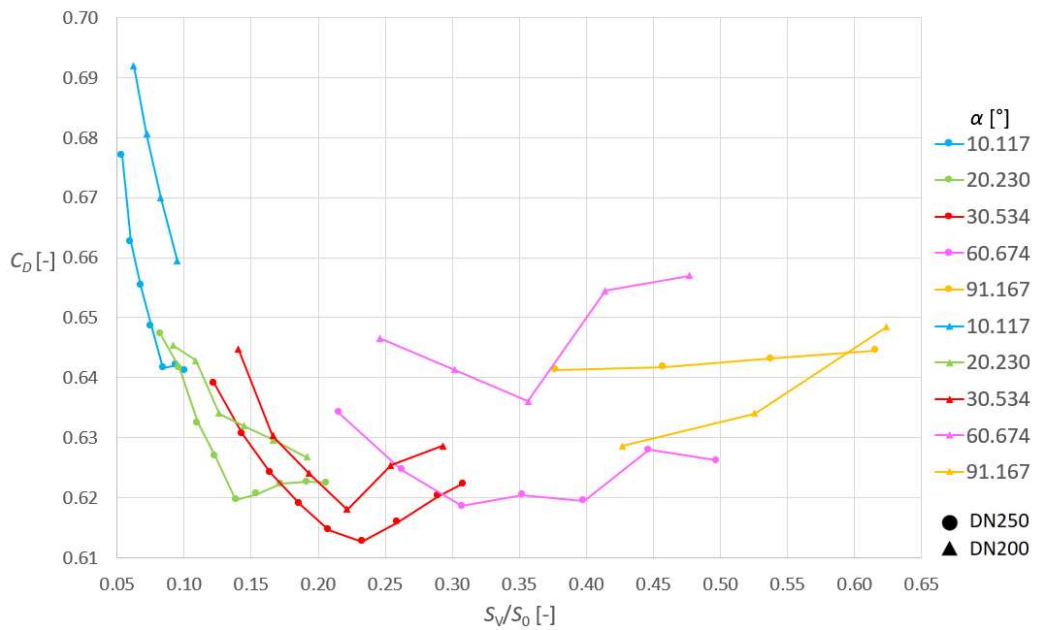


Graf 23 Závislost C_D na h pro DN200

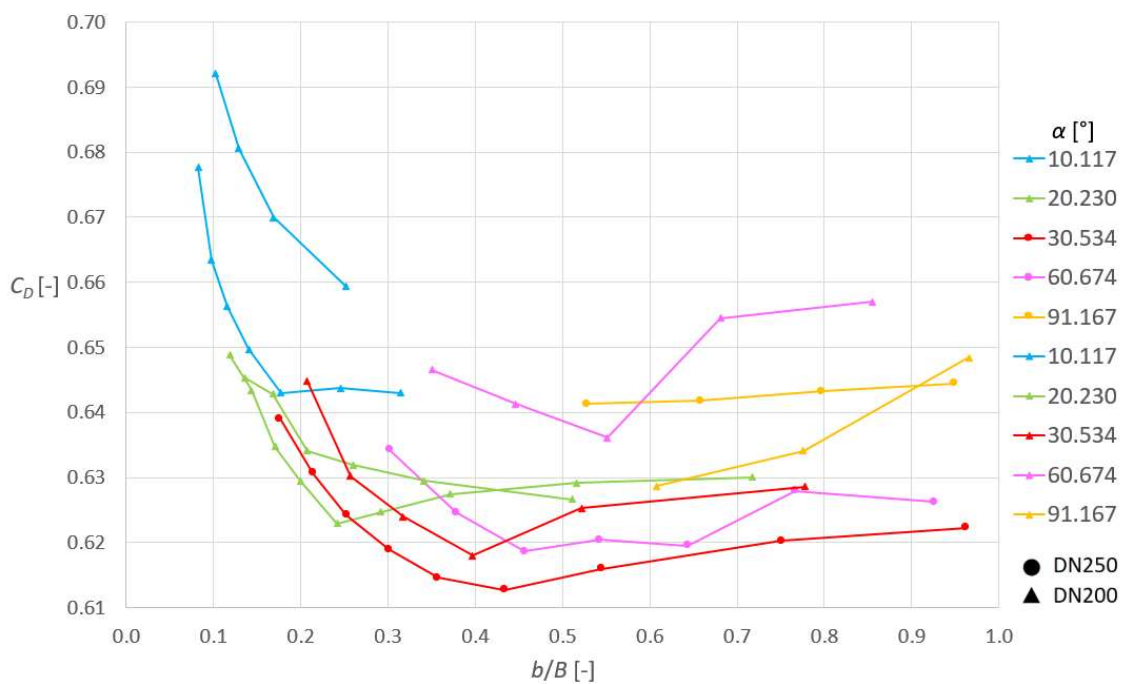
Dále byly vytvořeny grafy zobrazující závislost součinitele průtoku pro energetickou přepadovou výšku C_D na poměru přepadové výšky a vnitřního průměru potrubí h/d (Graf 24), poměru průtočné plochy výřezu a průtočné plochy potrubí S_v/S_0 (Graf 25), poměru šířky výřezu v úrovni hladiny a šířky hladiny vody v potrubí b/B (Graf 26) a poměru šířky výřezu v hladině a vnitřnímu průměru potrubí b/d (Graf 27).



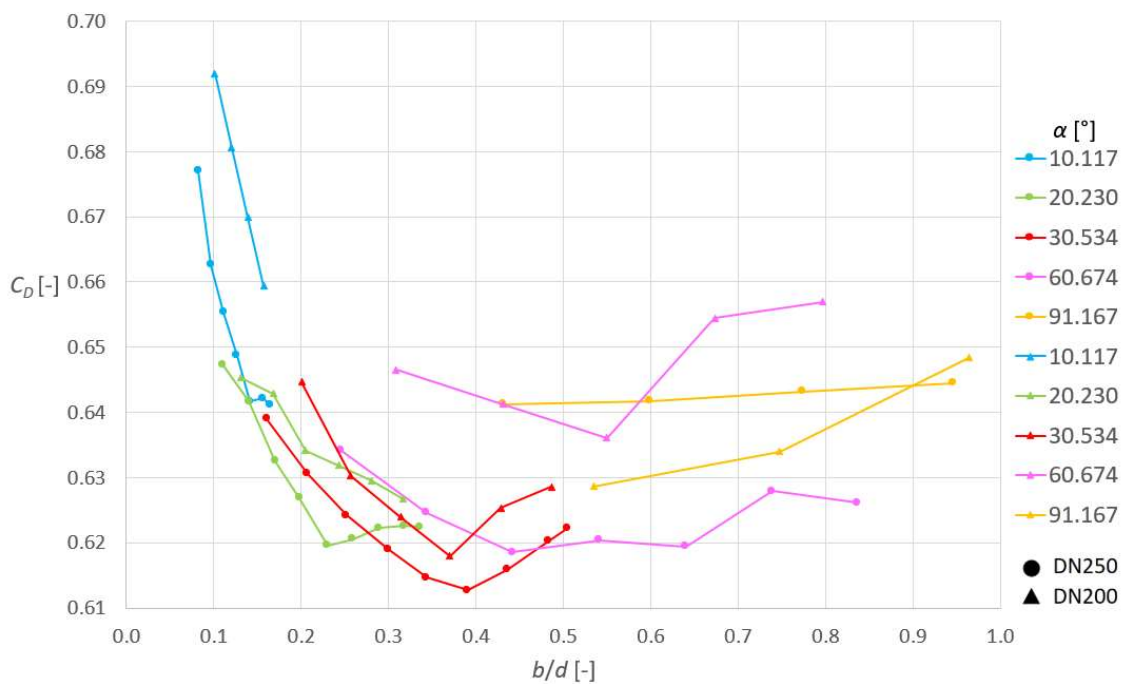
Graf 24 Závislost C_D na h/d



Graf 25 Závislost C_D na S_v/S_0



Graf 26 Závislost C_D na b/B



Graf 27 Závislost C_D na b/d

6.3 Doporučení pro výpočty

Součinitel průtoku je závislý na charakteristikách přelivu, přepadové výšce a přítokovém korytě. Nejčastěji je označován jako funkce přepadové výšky h a úhlu výřezu přelivu α . Při běžných výpočtech je určován v rozmezí od 0,56 do 0,60 [1].

Z přiložených grafů je zřejmé, že vlivem přítoku vody potrubím kruhového průřezu se vypočtené hodnoty součinitele průtoku liší od těch doporučených, jsou větší. V závislosti na úhlu výřezu přelivu α , vnitřnímu průměru potrubí d a přepadové výšce h se vypočtené hodnoty součinitele průtoku pro přepadovou výšku C_d pohybují v rozmezí od 0,622 do 0,756 a v případě součinitele průtoku pro energetickou přepadovou výšku C_D v rozmezí od 0,588 do 0,692.

V případě praktického využití zjištěných hodnot obou součinitelů průtoku je nutné požadovanou hodnotu vyčíst z grafu. K tomu je potřeba znát vnitřní průměr potrubí d , přepadovou výšku h a úhel výřezu použitého přelivu α .

Pro menší průtoky způsobené malou přepadovou výškou a malým úhlem výřezu přelivu mají oba součinitele velmi podobné hodnoty. V případě větších přepadových výšek a úhlů výřezů přelivů protéká voda potrubím větší rychlostí, která vyvozuje větší energetickou přepadovou výšku H . V důsledku toho, je rozdíl mezi součiniteli větší.

V případě stejných úhlů trojúhelníkových výřezů tenkostěnných přelivů, jako byly použité při měření, se pro stanovení průtoku jeví jako nejjednodušší (z vykreslených grafů) použít závislost součinitele průtoku pro přepadovou výšku C_d na přepadové výšce h (Graf 16) a (Graf 17). Dále lze z praktického hlediska jednoduše využít graf závislosti C_d na h/d (Graf 18). Použití C_d namísto C_D je vhodnější z důvodu jednoduššího výpočtu.

V případě použití jiných úhlů výřezu se pro stanovení průtoku pro malé úhly výřezu jeví nejlépe použití grafu závislosti C_d na b/B (Graf 20). Pro všechny úhly výřezu je to pak použití grafu závislosti C_d na S_v/S_0 (Graf 19). Pro zobecnění je nejperspektivnější závislost C_d na S_v/S_0 (Graf 19). Hlavním důvodem je nejmenší rozptyl hodnot součinitele průtoku od trendu hodnot v závislosti na vztažném poměru.

7 ZÁVĚR A ZHODNOCENÍ

V bakalářské práci byl zkoumán vliv potrubí kruhového průřezu na součinitel průtoku tenkostěnného přelivu s trojúhelníkovým výřezem. Jednalo se o přeliv s bočním zúžením. Výzkum byl proveden ve žlabu v Laboratoři vodohospodářského výzkumu. K měření průtoku byly použity dva elektromagnetické indukční průtokoměry. Úroveň hladiny se měřila pomocí digitálního hrotového měřidla. K ovládání průtoku byla použita ovládací jednotka čerpadla. Pro výzkum byly použity dvě PVC potrubí DN250 a DN200. Pro obě potrubí bylo provedeno celkem 60 měření. Data byla analyzována a vyhodnocena.

Pro znázornění rozsahu měření byla naměřená data vynesena do grafů. Byly vypočteny hodnoty součinitele průtoku pro přepadovou výšku C_d a součinitele průtoku pro energetickou přepadovou výšku C_D . Následně byly tyto hodnoty zpracovány do grafů zobrazujících závislost na různých parametrech přelivu a potrubí. Z vypracovaných grafů byly vybrány a doporučeny grafy a postupy výpočtu pro použití stejných úhlů výřezu i jiných úhlů výřezu v praxi a pro zobecnění. Zobecnění nebylo provedeno z důvodu použití pouze dvou průměrů potrubí. Hodnoty nelze extrapolovat. Cíl práce, stanovení součinitele průtoku na tenkostěnném přelivu s trojúhelníkovým výřezem umístěného na konci potrubí kruhového průřezu, byl pro dva průměry potrubí splněn.

8 SEZNAMY

8.1 Seznam použité literatury

- [1] JANDORA, J a ŠULC, J. *Hydraulika: Modul 01. Studijní opora*. Brno: VUT v Brně, 2006.
- [2] ČSN ISO 1438, *Hydrometrie: Měření průtoku vody v otevřených korytech pomocí tenkostěnných přelivů*. 3. 2023.
- [3] GABRIEL, P. *Vliv šířky přítokového koryta na přepad přes tenkostěnný přeliv s trojúhelníkovým výřezem*. Online, Bakalářská práce, vedoucí Zbyněk Zachoval. Brno: VUT v Brno, 2023. Dostupné z: <https://dspace.vut.cz/bitstreams/cb49985e-ce61-440b-b204-517774ebc3b0/download>. [cit. 2024-05-09].
- [4] POSPÍŠILÍK, Š. *Analýza rozsahu prozkoumanosti přepadu přes tenkostěnné přelivy s trojúhelníkovým výřezem*. Online, Recenzovaný dokument. Brno: VUT v Brně, 2022. Dostupné z: <https://dspace.vut.cz/items/a5577e2c-1c65-4ca0-a2e5-0355cea256e7>. [cit. 2024-05-12].
- [5] POSPÍŠILÍK, Š a ZACHOVAL, Z. *Discharge coefficient, effective head and limit head in the Kindsvater-Shen formula for small discharges measured by thin-plate weirs with a triangular notch*. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2023, roč. 71, č. 1, s. 35-48. ISSN: 1338-4333.
- [6] ŠLEZINGR, M. *Ostrohranný trojúhelníkový přeliv*. Brno: Mendelova univerzita v Brně. Dostupné také z: <http://www.utok.cz/sites/default/files/data/USERS/u24/Trojuhelnikovy.pdf>.
- [7] THOMSON, J. *On Experiments on the Gauging of Water by Triangular Notches*. In: *Thirty-first Meeting of the British Association for the Advancement of Science*. London: John Murray, Albemarle street, 1861, s. 151-158.
- [8] BARR, J. *Experiments Upon The Flow of Water Over Triangular Notches*. *Engineering*. London, 1910, 89, 435-437, 470-473. ISSN 0013-7782.
- [9] SHEN, J. *Discharge Characteristics of Triangular-notch Thin-plate Weirs: Studies of Flow of Water Over Weirs and Dams*. Geological survey water-supply paper, 1617-B. Washington: United States Government Printing Office, 1981.

8.2 Seznam veličin

| Značka | Název veličiny | Jednotka |
|------------|--|------------------------------------|
| a | vzdálenost mezi dnem potrubí a vrcholem válce | [m] |
| b | šířka výřezu v úrovni hladiny | [m] |
| B | šířka hladiny vody v potrubí | [m] |
| C_d | součinitel průtoku pro přepadovou výšku | [-] |
| C_D | součinitel průtoku pro energetickou přepadovou výšku | [-] |
| d | vnitřní průměr potrubí | [m] |
| f | frekvence | [Hz] |
| g | tíhové zrychlení | [m·s ⁻²] |
| h | přepadová výška | [m] |
| h_{\max} | maximální přepadová výška | [m] |
| H | energetická přepadová výška | [m] |
| k | přítoková rychlostní výška | [m] |
| Q | průtok | [m ³ ·s ⁻¹] |
| Q_{\max} | maximální průtok | [m ³ ·s ⁻¹] |
| Q_{\min} | minimální průtok | [m ³ ·s ⁻¹] |
| r | vnitřní průměr potrubí | [m] |
| S_0 | průtočná plocha potrubí | [m ²] |
| S_V | průtočná plocha výřezu | [m ²] |
| t_1 | čas na začátku měření | [s] |
| t_2 | čas na konci měření | [s] |
| t_l | tloušťka stěny přelivu | [m] |
| T | teplota | [°C] |
| v_0 | přítoková rychlost | [m·s ⁻¹] |

| | | |
|------------|--|------------|
| V | objem | $[m^3]$ |
| V_1 | počáteční objem | $[m^3]$ |
| V_2 | koncový objem | $[m^3]$ |
| α | úhel trojúhelníkového výřezu tenkostěnného přelivu | $[^\circ]$ |
| α_0 | Coriolisovo číslo | $[-]$ |
| ϕ | středový úhel | $[^\circ]$ |
| ϕ_r | relativní vlhkost | $[-]$ |

8.3 Seznam zkratk

| | |
|-----|--|
| ČSN | Česká státní norma |
| DN | jmenovitý vnitřní průměr potrubí |
| ISO | Mezinárodní organizace pro normalizaci |
| PVC | polyvinylchlorid |

8.4 Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obrázek 1 Rozdělení přelivů: čelní, šikmý, obloukový, lomený a boční [1] | 11 |
| Obrázek 2 Detail přelivné hrany [2] | 12 |
| Obrázek 3 Typické rozložení rychlosti v korytě pravoúhlého průřezu [2] | 13 |
| Obrázek 4 Trojúhelníkový výřez | 15 |
| Obrázek 5 Tenkostěnný přeliv s trojúhelníkovým výřezem v korytě vodního toku [6] | 16 |
| Obrázek 6 Schéma použitých veličin | 19 |
| Obrázek 7 Měrný žlab..... | 20 |
| Obrázek 8 Ovládací panel | 21 |
| Obrázek 9 Uklidňovací úsek žlabu | 22 |
| Obrázek 10 Střední část žlabu s potrubím..... | 22 |
| Obrázek 11 Rám pro přeliv na výtoku ze žlabu | 23 |
| Obrázek 12 Přeliv upevněný v rámu | 24 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 13 Spoj mezi potrubím a přelivem..... | 24 |
| Obrázek 14 Elektromagnetický indukční průtokoměr DN50..... | 25 |
| Obrázek 15 Elektromagnetický indukční průtokoměr DN10..... | 26 |
| Obrázek 16 Digitální hrotové měřidlo..... | 26 |
| Obrázek 17 Délkové měřidlo..... | 27 |
| Obrázek 18 Použitá vodováha..... | 27 |
| Obrázek 19 Ukázka zaznamenání proteklého objemu a času..... | 29 |
| Obrázek 20 Pohled na digitální hrotové měřidlo při měření úrovně hladiny..... | 30 |

8.5 Seznam grafů

| | |
|---|----|
| Graf 1 Rozsah měření v závislosti průtoku na úhlu výřezu přelivu..... | 35 |
| Graf 2 Rozsah měření v závislosti přepadové výšky na úhlu výřezu..... | 35 |
| Graf 3 Rozsah měření v závislosti energetické přepadové výšky na úhlu výřezu | 36 |
| Graf 4 Závislost přepadové výšky na průtoku pro úhel výřezu $\alpha = 10,117^\circ$ | 37 |
| Graf 5 Závislost přepadové výšky na průtoku pro úhel výřezu $\alpha = 20,230^\circ$ | 37 |
| Graf 6 Závislost přepadové výšky na průtoku pro úhel výřezu $\alpha = 30,534^\circ$ | 38 |
| Graf 7 Závislost přepadové výšky na průtoku pro úhel výřezu $\alpha = 60,674^\circ$ | 38 |
| Graf 8 Závislost přepadové výšky na průtoku pro úhel výřezu $\alpha = 91,167^\circ$ | 39 |
| Graf 9 Závislost přepadové výšky na průtoku pro všechny úhly výřezů..... | 39 |
| Graf 10 Závislost energetické přepadové výšky na průtoku pro úhel přelivu $\alpha = 10,117^\circ$ | 40 |
| Graf 11 Závislost energetické přepadové výšky na průtoku pro úhel výřezu $\alpha = 20,230^\circ$ | 40 |
| Graf 12 Závislost energetické přepadové výšky na průtoku pro úhel výřezu.... | 41 |
| Graf 13 Závislost energetické přepadové výšky na průtoku pro úhel výřezu.... | 41 |

| | |
|--|----|
| Graf 14 Závislost energetické přepadové výšky na průtoku pro úhel výřezu $\alpha = 91,167^\circ$ | 42 |
| Graf 15 Závislost energetické přepadové výšky na průtoku pro všechny úhly přelivu | 42 |
| Graf 16 Závislost C_d na h pro DN250 | 43 |
| Graf 17 Závislost C_d na h pro DN200 | 44 |
| Graf 18 Závislost C_d na h/d | 44 |
| Graf 19 Závislost C_d na S_1/S_0 | 45 |
| Graf 20 Závislost C_d na b/B | 45 |
| Graf 21 Závislost C_d na b/d | 46 |
| Graf 22 Závislost C_D na h pro DN250 | 47 |
| Graf 23 Závislost C_D na h pro DN200 | 47 |
| Graf 24 Závislost C_D na h/d | 48 |
| Graf 25 Závislost C_D na S_1/S_0 | 48 |
| Graf 26 Závislost C_D na b/B | 49 |
| Graf 27 Závislost C_D na b/d | 49 |