



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

**STANOVENÍ Q/H CHARAKTERISTIKY PŘELIVŮ
STAVIDLOVÉ KOMORY ČOV BRNO-MODŘICE
V PODMÍNKÁCH NEDOKONALÉHO PROUDĚNÍ**

DETERMINATION OF Q/H CHARACTERISTICS OF SPILLWAYS OF THE SLUICE CHAMBER
OF THE BRNO-MODŘICE WWTP IN CONDITIONS OF INFLUENCED FLOW

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Markéta Škrancová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL ŽOUŽELA, Ph.D.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	NPC-SIV Stavební inženýrství – vodní hospodářství a vodní stavby
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Specializace	bez specializace
Pracoviště	Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Markéta Škrancová
Název	Stanovení Q/h charakteristiky přelivů stavidlové komory ČOV Brno-Modřice v podmínkách nedokonalého proudění
Vedoucí práce	Ing. Michal Žoužela, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2021
Datum odevzdání	14. 1. 2022

V Brně dne 31. 3. 2021

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

- [1] Stanovení Q/H charakteristiky měrného objektu na přítoku do ČOV Modřice v podmínkách ovlivnění proudění úrovní hladiny dolní vody. Výzkumná zpráva, LVV – FAST – VUT v Brně, 2010
- [2] Žoužela, M.: Stanovení Q/H charakteristiky měrného žlabu Ž-PVK-1. Výzkumná zpráva, LVV – FAST – VUT v Brně, 2017
- [3] Žoužela, M.: Posouzení stávajícího a návrh nového systému měření průtoku a proteklého množství odlehčených odpadních vod do řeky Svratky v prostoru stavidlové komory na přítoku do ČOV Brno-Modřice. Výzkumná zpráva, LVV – FAST – VUT v Brně, 2019
- [4] Žoužela, M.: Stanovení Q/h charakteristiky přelivů stavidlové komory a návrh vzdouvacího prahu v prostoru výustního objektu odlehčovací stoky na ČOV Brno-Modřice (fyzikální modelový výzkum). Výzkumná zpráva, LVV – FAST – VUT v Brně, 2019

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Jedním ze způsobů stanovení průtoku odlehčovaných odpadních vod na jednotné stokové síti je využití přepadového jevu na hraně odlehčovací komory. V rámci diplomové práce bude na hydraulickém modelu odlehčovací komory posouzeno, zda je možné použít uvedeného postupu i v případě, kdy je přepadový jev ovlivněný od úrovně hladiny dolní vody v řece Svratce.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

Ing. Michal Žoužela, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Práce se zabývá měřením, zpracováním a analýzou Q/h charakteristiky stavidlové komory čistírny odpadních vod na fyzikálním hydraulickém modelu v podmínkách ovlivnění přepadového jevu hladinou dolní vody. Na základě dosažených výsledků je v prostoru stavidlové komory navržen měřicí systém pro měření průtoku a průtočného množství odlehčovaných vod do řeky Svratky. Měření na modelu byla provedena v prostorách Laboratoře vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně autorem této práce. Výsledkem diplomové práce je vývojový diagram popisující postup výpočtu stanovení okamžitého průtoku, na jehož základě byl realizován nový software vyhodnocovací jednotky měřicího systému.

KLÍČOVÁ SLOVA

Q/h charakteristika, měření v profilech s volnou hladinou, ostrohranný měrný přeliv, nedokonalé proudění, fyzikální hydraulický model, měřicí systém

ABSTRACT

The work deal with the measurement, processing and analysis of Q/h characteristics of the sluice chamber in the wastewater treatment plant on a physical hydraulic model in the conditions of influencing the overflow phenomenon by the groundwater level. Based on the achieved results, a measuring system has been projected in the area of the sluice chamber to measure the flow and flow rate of lightened water into the Svratka river. The measurements on the model were performed in the premises of the Laboratory of water Management Research of the Institute of Water Structures of the Faculty of Civil Engineering of Brno University of Technology by the author of this work. The results of the diploma thesis is a flow chart describing the calculation procedure used to determine the immediate flow, on the basis of which a new software of the evaluation unit of the measuring system was realized.

KEYWORDS

Q/h characteristic, streamflow measurement, sharp-edged measuring weir, submerged flow, physical hydraulic model, measuring system

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Markéta Škrancová *Stanovení Q/h charakteristiky přelivů stavidlové komory ČOV Brno-Modřice v podmínkách nedokonalého proudění*. Brno, 2021. 78 s., 8 s. příl.

Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Michal Žoužela, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Stanovení Q/h charakteristiky přelivů stavidlové komory ČOV Brno-Modřice v podmínkách nedokonalého proudění* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 18. 12. 2021

Bc. Markéta Škrancová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Stanovení Q/h charakteristiky přelivů stavidlové komory ČOV Brno-Modřice v podmínkách nedokonalého proudění* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 18. 12. 2021

Bc. Markéta Škrancová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

V úvodu této diplomové práce bych ráda poděkovala svému vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Žouželovi, Ph.D. za vstřícnost a trpělivost během našich konzultací, za odborné vedení, cenné rady a důležité připomínky, které mi významně napomohly ke zpracování diplomové práce.

OBSAH

1. ÚVOD	10
2. POPIS STÁVAJÍCÍHO STAVU SK ČOV.....	12
2.1. Stavebně-konstrukční řešení	12
2.2. Průtokové poměry SK ČOV.....	14
2.3. Výstupy z bakalářské práce.....	14
3. MĚŘENÍ PROTEKLÉHO MNOŽSTVÍ VODY V PROFILECH S VOLNOU HLADINOU	20
3.1. Měření proteklého množství vody využívající metodu Q/h charakteristiky	20
3.2. Měření proteklého množství vody využívající kontinuitní metodu	20
4. MĚŘENÍ PROTEKLÉHO MNOŽSTVÍ ZA VYUŽITÍ OSTROHRANNÝCH MĚRNÝCH PŘELIVŮ	22
4.1. Měření průtoku s využitím ostrohranných měrných přelivů bez ovlivnění hladinou dolní vody.....	23
4.2. Měření průtoku s využitím ostrohranných měrných přelivů s ovlivněním hladinou dolní vody.....	26
5. PROCESNÍ INSTRUMENTACE UŽÍVANÁ V OBLASTI MĚŘENÍ PRŮTOKU V PROFILECH S VOLNOU HLADINOU	28
5.1. Měření úrovně hladiny	28
5.1.1. Kontaktní snímače	28
5.1.2. Bezkontaktní snímače.....	29
5.2. Vyhodnocovací jednotky	30
6. MOTIVACE A CÍL PRÁCE.....	32
7. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	33
7.1. Fyzikální model, hydraulický okruh, měřicí technika a modelová podobnost	33
7.1.1. Fyzikální model objektu SK ČOV.....	33
7.1.2. Hydraulický okruh	40
7.1.3. Měřicí technika	41
7.1.4. Modelová podobnost.....	43
7.2. Postup měření.....	44
7.3. Zvolený přístup stanovení průtoku v podmínkách nedokonalého proudění	46
7.4. Zpracování naměřených hodnot.....	47
7.5. Výsledky experimentálních prací na modelu.....	49
7.5.1. Experimentální stanovení závislosti součinitele zatopení K_s na poměru h_{ds}/h_s	49

7.5.2.	Experimentální stanovení závislosti součinitele zatopení K_t na poměru h_{av}/h_t	51
7.5.3.	Experimentální stanovení kompletní Q/h charakteristiky v podmínkách nedokonalého proudění	54
7.6.	Porovnání dosažených výsledků s přístupy jiných autorů	64
8.	REALIZACE VÝSLEDKŮ IN-SITU	66
9.	ZÁVĚR.....	71
10.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	72
11.	SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	74
12.	SEZNAM PŘÍLOH	78

1. ÚVOD

Tato diplomová práce vznikla v návaznosti na práci bakalářskou [1], která pro Brněnské vodárny a kanalizace, a.s. (BVK) řešila návrh trvale instalovaného systému měření průtoku a proteklého množství odlehčovaných vod ze stavidlové komory čistírny odpadních vod (SK ČOV) nacházející se na přítoku do čistírny odpadních vod (ČOV) Brno-Modřice.

Na základě požadavků BVK byl v rámci bakalářské práce [1] navržen zcela nový měřicí systém pro stanovení průtoku a proteklého množství odlehčovaných vod ze SK ČOV. Nový měřicí systém využívá Q/h charakteristiky přelivných hran v prostoru SK ČOV stanovené experimentálními pracemi uskutečněnými za dokonalého přepadu, tedy bez ovlivnění přepadového jevu úrovní hladiny dolní vody od řeky Svratky, kam je odlehčovaná odpadní voda vypouštěna.

Je zřejmé, že nový měřicí systém je schopen správného stanovení průtoku a proteklého množství odlehčovaných vod pouze v situaci, kdy nedochází k ovlivnění přepadového jevu úrovní hladiny dolní vody. V případě, kdy by došlo k protiproudání vzduší a zatopení přelivných hran, tj. nedokonalému přepadu, bude nový systém měření vykazovat hodnotu průtoku odpovídající příslušné protiproudě před předmětnými hranami SK ČOV měřené přepadové výšce.

Diplomová práce se tak na základě uvedených skutečností zabývá výhradně měřením na fyzikálním hydraulickém modelu SK ČOV v Laboratoři vodohospodářského výzkumu (LVV) Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně v podmínkách ovlivnění přepadového jevu úrovní hladiny dolní vody, tedy za nedokonalého přepadu. Tímto měřením dojde k rozšíření výzkumných prací provedených v rámci bakalářské práce [1] o stanovení náhradní funkce Q/h charakteristiky, díky které bude zaručeno správné stanovení průtoku a proteklého množství i v případě zatopení přelivných hran v prostoru SK ČOV.

Práce se následně zabývá zpracováním všech naměřených hodnot a jejich výslednou analýzou. Závěrem se předložená diplomová práce věnuje sestavení vývojového diagramu, který byl důležitým podkladem pro vytvoření softwaru vyhodnocovací jednotky, porovnáním dosažených výsledků s přístupy jiných autorů a prezentací realizace dosažených výsledků in situ.

Práce je rozčleněna celkem na 9 kapitol. V první části práce jsou popsány dosažené výstupy v rámci bakalářské práce [1], na které dále navazuje část teoretická popisující problematiku měření v profilech s volnou hladinou za využití ostrohranných přelivů. Druhou částí práce je část praktická, která obsahuje popis provedených experimentálních měření, zpracování naměřených hodnot, jejich analýzu, porovnání dosažených výsledků s přístupy jiných autorů a realizaci dosažených výsledků in situ.

Závěr práce tvoří přílohová část obsahující vývojový diagram vytvořený v rámci bakalářské práce a „upravený“ vývojový diagram sestavený na základě předložené diplomové práce.

2. POPIS STÁVAJÍCÍHO STAVU SK ČOV

2.1. Stavebně-konstrukční řešení

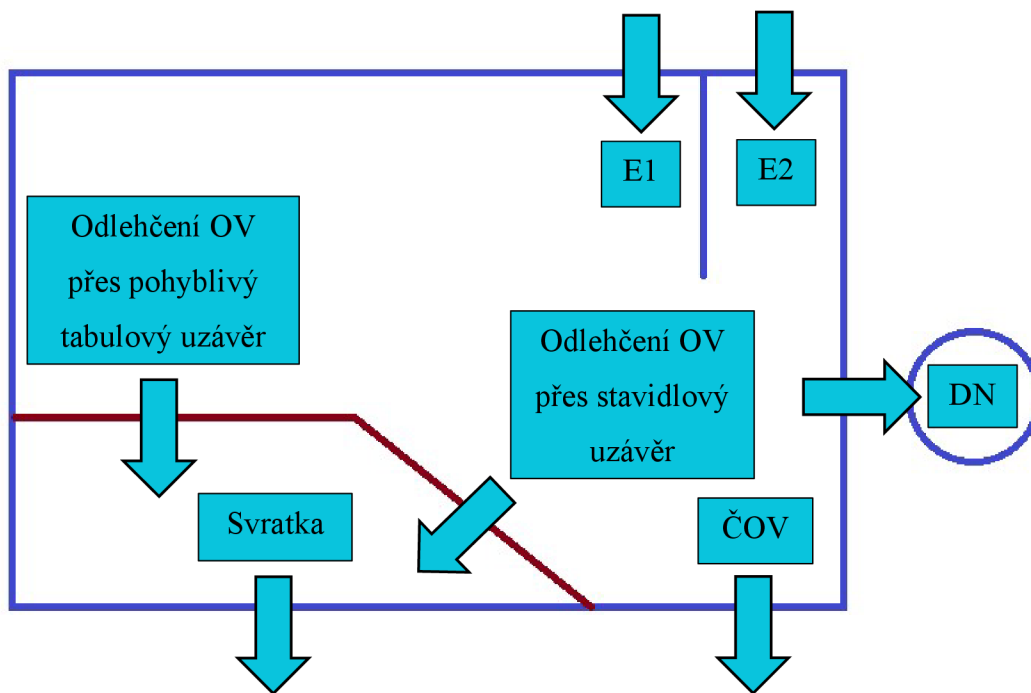
V následující kapitole je ve smyslu [1] a [2] popsán stávající stav stavebně-konstrukčního řešení stavidlové komory čistírny odpadních vod (SK ČOV). Situace v prostoru SK ČOV je také dále vystižena na obr.1 a obr.2.

Do prostoru šachtice přitékají odpadní vody ze stokové sítě dvěma sběrači E1 a E2, tyto sběrače mohou být následně za pomoci čtyř stavidel vedeny různými směry – do dešťové nádrže (DN), do technologické linky čistírny odpadních vod (ČOV) nebo dále přes pohyblivý tabulový uzávěr a stavidlový uzávěr do recipientu (řeky Svratky).

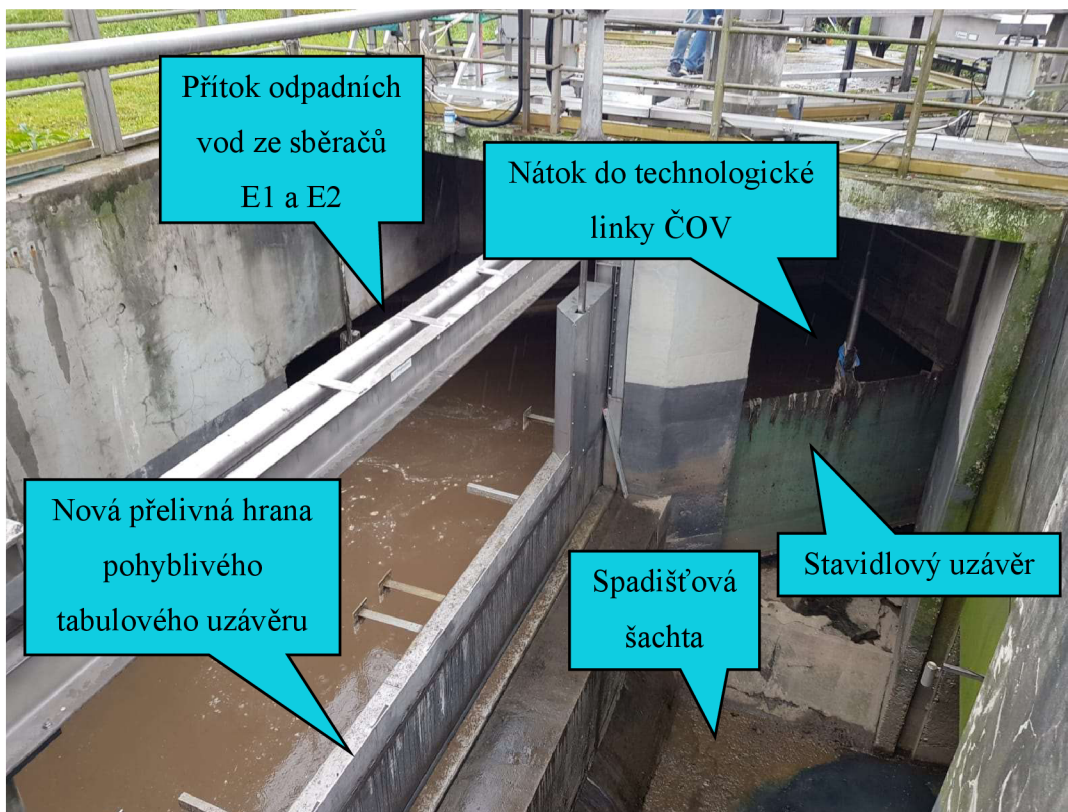
Poproudě vlevo od sběračů E1 a E2 se nachází zdvižné stavidlo regulující nátok do dešťové nádrže. Následně na linii sběračů navazuje nátok do technologické linky ČOV, jenž je hrazen stavidlovým uzávěrem sloužícím jako uzavírací a regulační orgán technologické linky ČOV. Na konci komory poproudě vpravo od sběračů E1 a E2 se nachází vypouštěcí (zdvižný) stavidlový uzávěr, který slouží k případnému mimořádnému vyprázdnění celého systému. Ten je ovšem za běžných i mimoprovozních stavů zavřený, a tak průtoky, které nejsou vedeny do DN ani do technologické linky ČOV, přepadají přes jeho horní hranu směrem do recipientu.

Na začátku komory poproudě vpravo od sběračů E1 a E2 je realizován nátok k přelévání pohyblivému tabulovému uzávěru, na kterém je instalována nová přelivná hrana [1]. Tento uzávěr zde slouží k regulaci průtoku odlehčovaných vod přepadem přes jeho horní hranu a opírá se o betonovou stěnu spadiště.

Přepad odlehčovaných vod přes oba zmíněné uzávěry je veden do spadiště, které je dále napojeno na odlehčovací stoku ústící do recipientu (řeky Svratky).



Obr. 1) Schéma situace v prostoru SK ČOV



Obr. 2) Pohled do prostoru SK ČOV

2.2. Průtokové poměry SK ČOV

Provoz SK ČOV je ovládán z centrálního dispečinku ČOV tak, aby v rámci technologické linky ČOV bylo čištěno maximální množství odpadních vod přitékajících ze sběračů E1 a E2. Do technologické linky ČOV jsou poproudě za SK ČOV ještě zaústěny sběrače A a F, ze kterých mohou přitékat průtoky v součtu od $0,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $1,05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. S ohledem na tuto skutečnost tak lze předpokládat hodnoty průtoků, které jsou vedeny na technologickou linku ČOV v rozmezí od $2,95 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $3,75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Tyto hodnoty vycházejí z celkové kapacity technologické linky ČOV, která odpovídá cca $4,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Za zvýšených průtoků je volena kombinace nátoků do technologické linky ČOV a DN.

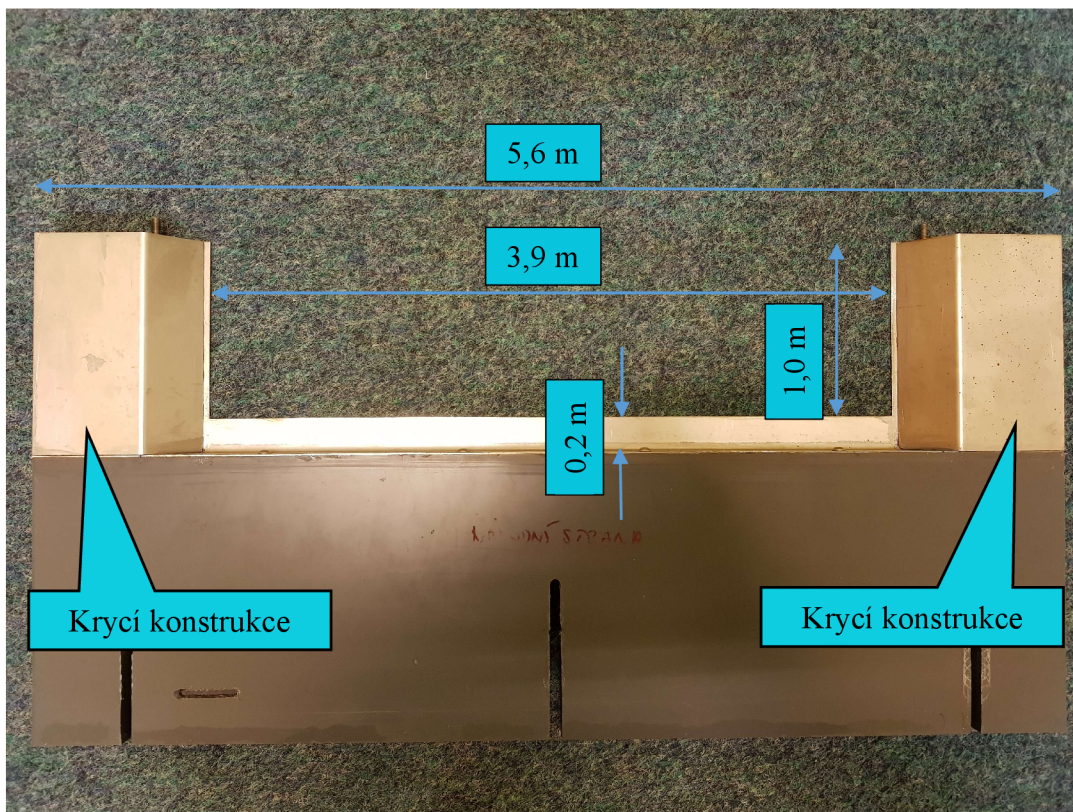
V případě, kdy nastane úplné naplnění DN (10.000 m^3) a přítok ze sběračů E1 a E2 je stále vyšší než výše uvedené limitní hodnoty kapacity technologické linky ČOV, dojde k přepadu odpadní vody přes stavidlový a pohyblivý tabulový uzávěr.

2.3. Výstupy z bakalářské práce

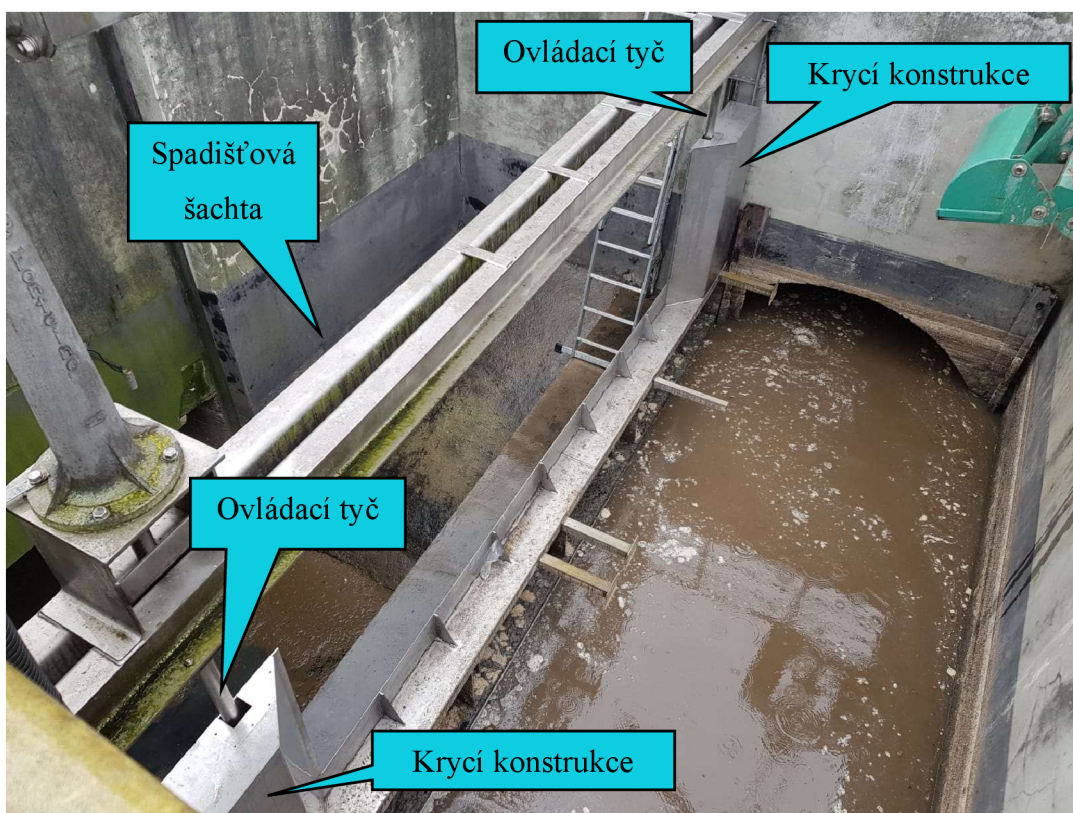
V rámci bakalářské práce [1] byla provedena rozsáhlá experimentální měření na fyzikálním hydraulickém modelu (v měřítku 1:10) SK ČOV - Modřice v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Následně proběhlo zpracování všech naměřených hodnot a jejich výsledná analýza.

Provedené experimentální práce na tomto modelu vedly ke stanovení průtoku a proteklého množství odlehčovaných vod ze SK ČOV do řeky Svratky, za využití Q/h charakteristiky přelivných hran v prostoru stavidlové komory ČOV.

Z provedených experimentálních zkoušek bylo prokázáno, že pro stanovení průtoku a proteklého množství odlehčovaných odpadních vod ze SK ČOV do řeky Svratky je možné využít dvou stávajících přelivných hran (obr. 2), které zde představují pevné stavidlo a pohyblivý tabulový uzávěr. V rámci experimentálních prací byly také navrženy a doporučeny úpravy přelivné hrany pohyblivého tabulového uzávěru v prostoru SK ČOV tak, aby bylo možné využít jednoznačné Q/h charakteristiky pro stanovení konkrétního přepadového množství odlehčovaných odpadních vod do řeky Svratky. [1]



Obr. 3) Popravní pohled na úpravu přelivné hrany na modelu po přepočtu na dílo [3]



Obr. 4) Pohled do prostoru SK ČOV na nově instalovanou přelivnou hranu

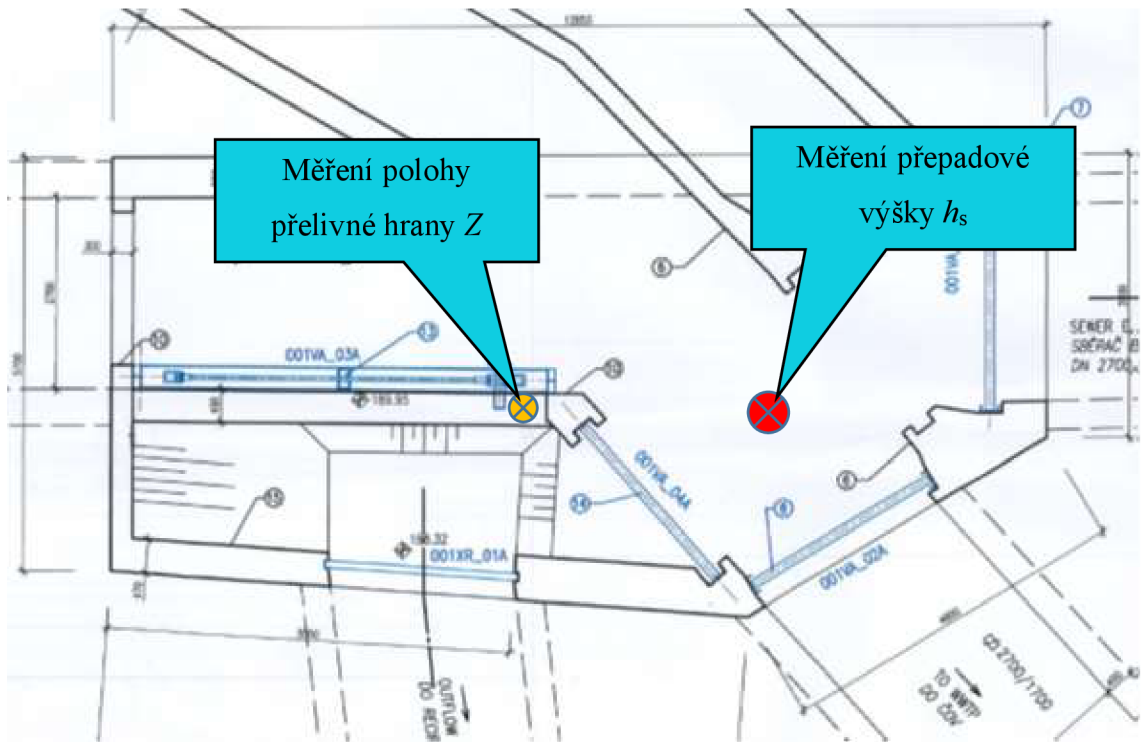
V rámci těchto úprav byla mezi ovládací tyče tabulového uzávěru instalována nová přelivná hrana (obr. 3 a obr. 4) s konstrukční výškou 0,20 m nad stávající horní hranou tabulového uzávěru. Následně, aby nedocházelo k zachytávání pevného odpadu na ovládacích tyčích, byla na obou stranách mezi tyčemi a betonovými stěnami zvýšena úroveň přelivné hrany. Ovládací tyče byly poté zakryty i z jejich návodní strany. Současně tak došlo k zajištění jednoznačného bočního zavzdušnění spodního líce přepadajícího paprsku. [1]

Na základě dosažených výsledků z provedených experimentálních prací, tak bylo možné navrhnout nový měřicí systém průtoku a proteklého množství odlehčovaných vod ze SK ČOV - Modřice do řeky Svratky (recipientu). [1]

Součástí nově navrženého systému je i příslušná měřicí technika. Ta se skládá ze dvou hladinoměrných radarových snímačů (obr. 5), které jsou napojeny do vyhodnocovací jednotky. Hlavní snímač, který slouží k měření přepadové výšky h_s umístěný v prostoru SK ČOV protiproudě před přelivy je vztažen k výškové úrovni odpovídající horní přelivné hraně přelévaného stavidla. Druhý snímač sleduje polohu pohyblivé přelivné hrany tabulového uzávěru. Jeho referenční výšková úroveň odpovídá taktéž hraně přelévaného stavidla s tím, že nabývá jak kladných hodnot, tak i hodnot záporných. V případě, že se úroveň nově zřízené přelivné hrany tabulového uzávěru nachází níže než úroveň hrany stavidla, pak snímač vykazuje zápornou hodnotu Z a naopak. Hodnota přepadové výšky realizující se na přelivné hraně tabulového uzávěru je dána vztahem:

$$h_t = h_s - Z. \quad (2.3.1)$$

S ohledem na možnosti pohybovacího mechanismu je rozsah svislého pohybu tabulového uzávěru uvažován v intervalu $Z \in (-0,20; 0,25)$ m.



Obr. 5) Místa měření svislých odlehlostí [3]

Nový systém měření je založen na přesném stanovení závislosti průtoku na měřené úrovni hladiny h protiproudě před přeléváním stavidlem a nově vytvořenou přelivnou hranou na přeléváním tabulovém uzávěru. Jedná se o Q/h charakteristiku přelivu, v našem případě o charakteristiku kombinovaného přepadu přes přelivy dva.

V rámci naší prováděné analýzy průběžně získávaných výsledků bylo voleno několik strategií, jak nejjednodušeji stanovit celkovou Q/h charakteristiku objektu, a to zejména s ohledem na programovatelnost výsledného matematického řešení náhradní funkce do vyhodnocovací jednotky měřicího systému. Největším problémem byla neustále se měnící celková Q/h charakteristika v závislosti na měnící se poloze tabulového uzávěru, resp. hodnotě parametru Z . Měřeními jsme tak získali nekonečné množství Q/h charakteristik v závislosti na změně výškové odlehlosti mezi přelivnými hranami obou přelivů. Za výslednou strategii byl v rámci bakalářské práce [1] vybrán postup vycházející z korekce prostého součtu dvou průtoků odpovídající příslušné přepadové výšce ve smyslu vztahu:

$$Q_{Svr_n} = \beta Q_{sum}^{\gamma} = \beta (Q_s + Q_t)^{\gamma}, \quad (2.3.2)$$

kde Q_{svr_n} je průtok odlehčovaný do řeky Svratky, Q_s je průtok přepadající přes pevný stavidlový uzávěr a Q_t je průtok přepadající přes pohyblivý tabulový uzávěr. Průtoky Q_s a Q_t je možné stanovit ze vztahů:

$$Q_s = A h_s^B = 4,4120 h_s^{1,4565}, \quad (2.3.3)$$

$$Q_t = C h_t^D = 5,5838 h_t^{1,4698}. \quad (2.3.4)$$

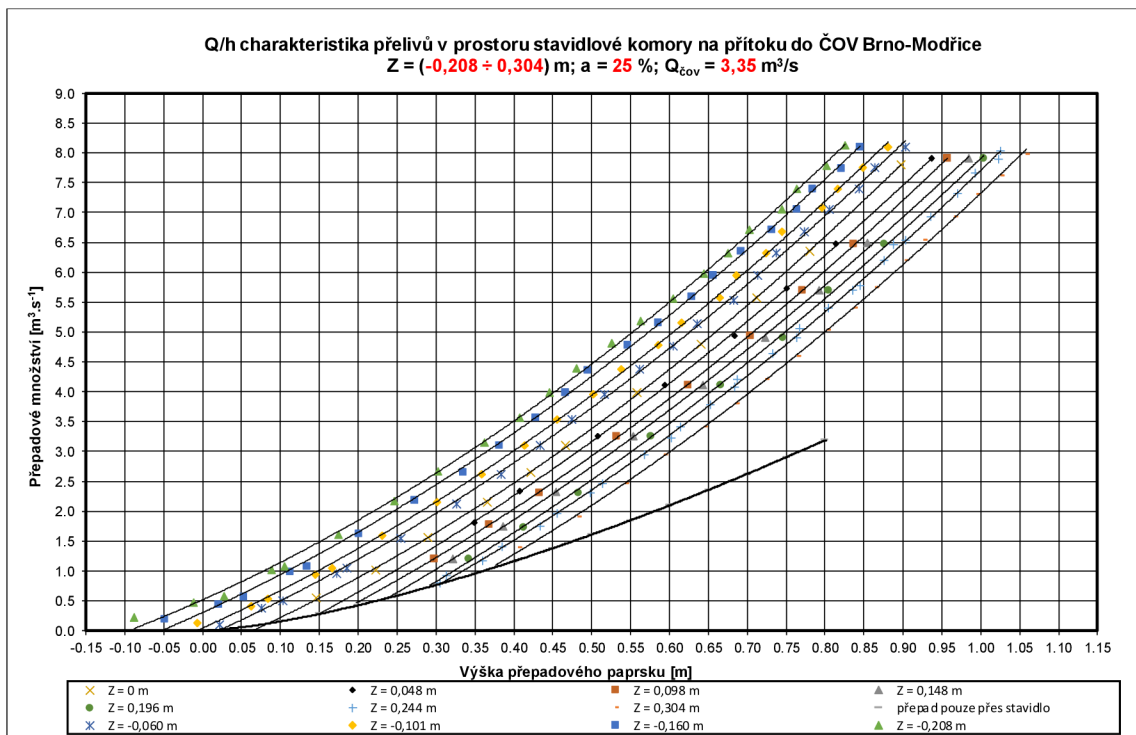
Stanovením funkčních závislostí Q_s/h_s a Q_t/h_t a následným porovnáním součtů příslušných stanovených průtoků s charakteristikami stanovenými v rámci experimentálních prací pro různé hodnoty parametru Z jsme získali příslušné součinitele β a γ , které lze stanovit vztahy:

$$\beta = 0,0412 Z + 0,9856, \quad (2.3.5)$$

$$\gamma = 0,0535 Z + 0,9640. \quad (2.3.6)$$

Pro získání parametrů β a γ , kterými lze korigovat prostý součet průtoků ve smyslu vztahu (2.3.2), bylo provedeno měření celkem pro 11 úrovní hrany tabulového uzávěru Z . Ta byla volena v intervalu $Z \in (-0,208; 0,304)$ m. Na grafu 1 je uvedeno všech 11 průtokových charakteristik zaměřených na modelu, za pomoci, kterých byly dále součinitele β a γ určeny.

Výsledné stanovení průtoků pro libovolnou úroveň přelivné hrany pohyblivého tabulového uzávěru bylo uspořádáno do vývojového diagramu (příloha P1).



Graf 1) Q/h charakteristiky přelivů SK ČOV stanovených v rozsahu Z e (-0,208; 0,304) m

Pro zachování měřicí schopnosti nově navrženého měřicího systému v celém variačním rozsahu předpokládaných průtoků musí být zajištěno, aby úroveň hladiny vody za přelivy neměla vliv na jejich průtokovou kapacitu. Tedy aby nedocházelo k ovlivnění vzniku kritické hloubky v prostoru nad přelivnými hranami. V případě, že by se úroveň hladiny vody ve Svratce dostala až do takové úrovně, kdy by došlo k protiproudění vzduší a zatopení přelivných hran, začne se voda z recipientu dostávat do stokové sítě. Jedná se o zcela mimořádnou situaci, v tomto případě však nový instalovaný měřicí systém bude vykazovat hodnotu průtoky odpovídající příslušné přepadové výšce.

Z toho vyplývá, že všechna měření v rámci bakalářské práce [1] byla prováděna pouze za dokonalého přepadu, tedy bez ovlivnění přepadového jevu úrovní hladiny dolní vody od řeky Svratky.

A právě z tohoto důvodu se předložená diplomová práce věnuje měření v podmínkách, kdy dochází k zatopení přelivných hran v prostoru SK ČOV, tedy k výskytu nedokonalého přepadu. Tím dojde k rozšíření výzkumných prací o stanovení náhradní funkce Q/h charakteristiky, za jejíž pomoci bude zaručeno správné stanovení průtoky i během zatopení přelivných hran hladinou dolní vody.

3. MĚŘENÍ PROTEKLÉHO MNOŽSTVÍ VODY V PROFILECH S VOLNOU HLADINOU

V následující kapitole jsou ve smyslu [4] a [5] popsány nejpoužívanější způsoby, kterými lze určit průtok a proteklé množství v profilech s volnou hladinou za pomoci trvale instalovaných měřicích systémů. Jedná se celkem o dva nejpoužívanější odlišné přístupy.

3.1. Měření proteklého množství vody využívající metodu Q/h charakteristiky

Využití metody Q/h charakteristiky vychází z přesného určení závislosti průtočného množství na výšce přepadového paprsku h měřeného v předepsaném protiproudím profilu měrného prvku. Přesné určení závislosti je provedeno buď za pomoci kalibrace anebo dle vztahu příslušné normy či literatury. Mezi nejčastěji používaná měřidla využívající Q/h charakteristiku patří zejména ostrohranné měrné přelivy a měrné žlaby typu Venturi či Parshall. Z konstrukčního hlediska se jedná o velmi variabilní stavební konstrukce vzdouvacího charakteru. [4] [5]

Problematika přelivů je podrobněji popsána níže v rámci kapitoly 4.

3.2. Měření proteklého množství vody využívající kontinuální metodu

Ve smyslu [4] a [5] kontinuální metoda patří z důvodu její zdánlivé jednoduchosti mezi oblíbené metody měření proteklého množství. Někdy je také nazývána metodou plocha \times rychlost. Principem této metody je měření dvou nezávislých veličin, kterými jsou rychlost u a hloubka proudu H . Z tohoto důvodu je v porovnání s metodou Q/h charakteristiky provozně méně spolehlivá. Ze známých rozměrů měrného profilu je stanovena průtočná plocha průřezu S . Následným přenásobením průtočné plochy rychlostí v , které lze dosáhnout kalibrací z rychlosti vykazované rychlostním snímačem u , je možné určit hledaný průtok Q ve smyslu vztahu [4]:

$$Q = k u S = v S, \quad (3.2.1)$$

kde k je kalibrační součinitel.

Kontinuální metodu lze využít především v měrných profilech, kde by byla výstavba vzdouvacích prvků příliš investičně nákladná, zejména z důvodu její velikosti, nebo

technicky komplikovaná. Vhodné je i využití v profilech s relativně znečištěnou vodou a do ovlivněných proudových poměrů, kdy například dochází v měrném profilu umístěném v blízkosti vyústění do vodního toku (recipientu) k ovlivnění proudění zpětným vzduším od hladiny realizující se za zvýšených stavů ve vodním toku. [4]

Nevýhodou kontinuitní metody je především náchylnost na větší deformace rychlostního pole, které jsou ve většině případů způsobeny krátkými uklidňovacími délkami před měrným profilem. Menší deformace rychlostního pole je možné kompenzovat pomocí kalibračního součinitele k , který je nutné určit v místě instalace. V případě, že by kalibrace nebyla provedena nebo by docházelo k výskytu větší deformace rychlostního pole může odchylka od „správného“ průtoku dosahovat až desítek procent. [4]

4. MĚŘENÍ PROTEKLÉHO MNOŽSTVÍ ZA VYUŽITÍ OSTROHRANNÝCH MĚRNÝCH PŘELIVŮ

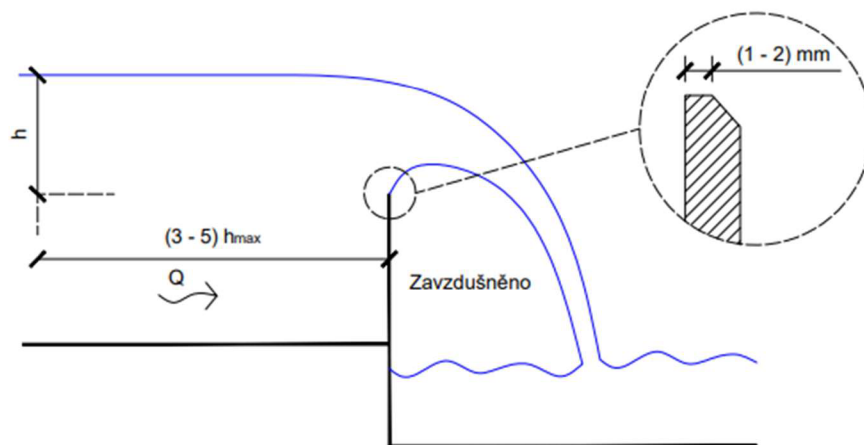
V návaznosti na kapitulu 3.1., zmiňující měrné přelivy a žlaby, jsou v následující kapitole dle [4] a [6] popsány metody měření průtoku za využití ostrohranných měrných přelivů v podmínkách bez ovlivnění hladinou dolní vody a následně s ovlivněním hladinou dolní vody. Pozornost je zde věnována výhradně problematice přelivů proto, že veškerá měření v rámci diplomové práce byla prováděna právě na nich.

Obecně jsou vzdouvací konstrukce typu přeliv hojně využívány pro měření průtoku a proteklého množství zejména z důvodu svojí jednoduchosti a nízké zranitelnosti celého měřicího systému. Dle obr. 6 se tento měřicí systém skládá z vlastního přelivu, tj. měrného prvku a také ze systému měření výšky přepadového paprsku h v jednoznačně definovaném měrném profilu metodami uvedenými v [4] a dále v kapitole 5.1. Měřená výška přepadového paprsku h v [m] je dále přepočtena na průtok Q v [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] ve smyslu obecné rovnice:

$$Q = A (h + C)^B + D, \quad (4.1)$$

kde A , B , C a D jsou koeficienty závislé na proudových a geometrických podmínkách a také na použitém typu měrného přelivu. Tyto koeficienty lze určit dle příslušné normy, literatury či za pomoci kalibrace v měrné trati laboratoře nebo přímo v místě instalace měřicího systému. Některé hodnoty těchto koeficientů jsou specifikovány dále.

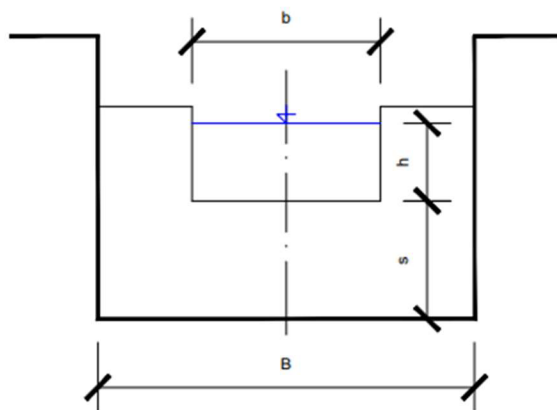
Mezi nejvíce používané ze všech možných typů přelivů patří přelivy ostrohranné (v normách nazývané jako tenkostěnné) s různými typy výřezů. Ostrohranné měrné přelivy jednoznačně definují místo, kde dochází k odtržení přepadového paprsku, čehož je možné si povšimnout na detailu obr. 6. Aby nedocházelo k výskytu dynamických pulzací, způsobených rozdílným tlakem nad a pod přepadajícím paprskem, je zde nutné zajistit zavzdušnění spodního líce přepadového paprsku.



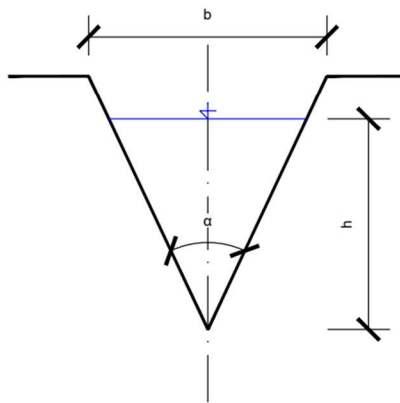
Obr. 6) Schéma ostrohranného přelivu

4.1. Měření průtoku s využitím ostrohranných měrných přelivů bez ovlivnění hladinou dolní vody

Mezi nejznámější ostrohranné měrné přelivy využívané pro měření průtoku patří především přelivy s pravoúhlým (obdélníkovým) výřezem či (trojúhelníkovým) výřezem ve tvaru V. Oba zmíněné ostrohranné přelivy jsou znázorněny na obr. 7 a obr. 8.



Obr. 7) Ostrohranný měrný přeliv s pravoúhlým výřezem s bočním zúžením



Obr. 8) *Ostrohranný měrný přeliv s výřezem ve tvaru V*

V této podkapitole jsou dle [6], [7], [8] a [9] uvedeny základní vztahy potřebné pro stanovení průtoku za využití výše zmíněných ostrohranných přelivů v podmínkách, kdy nedochází k ovlivnění přepadového množství hladinou dolní vody. Základem stanovení průtoku je zajištění dokonalého přepadu, který nastává v takovém případě, kdy se hladina dolní vody nenachází nad úrovní přelivné hrany.

Pro stanovení průtoku přes přeliv, s odkazem na vztah (4.1), s pravoúhlým výřezem lze využít rovnice ve tvaru:

$$Q = A h^B = m b \sqrt{2g} h^{\frac{3}{2}}, \quad (4.1.1)$$

kde m je součinitel přepadu zahrnující vliv přítokové rychlosti, b šířka přelivu, g gravitační tíhové zrychlení a h přepadová výška.

Hodnotu součinitele přepadu m je možné stanovit dle vztahů různých autorů [8]. Jedním z nich je například vztah dle Bazina, jenž má tvar:

$$m = \left(0,405 + \frac{0,003}{h}\right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{h + s_1}\right)^2\right], \quad (4.1.2)$$

kde h je přepadová výška a s_1 je svislá odlehlost přelivné hrany od dolního dna.

S platností pro:

- 0,1 m < h < 1,24 m,
- 0,2 m < b < 2,00 m,
- 0,2 m < s_1 < 2,00 m.

Pro výpočet průtoku přes přeliv s výřezem ve tvaru V lze využít vztahu:

$$Q = \frac{8}{15} \mu \sqrt{2g} \tan \frac{\alpha}{2} h^{\frac{5}{2}}, \quad (4.1.3)$$

kde μ je součinitel přepadu závislý na velikosti vrcholového úhlu výřezu α , g je gravitační tíhové zrychlení a h přepadová výška.

Vztah je také často uváděn ve tvaru:

$$Q = m_t \sqrt{2g} \tan \frac{\alpha}{2} h^{\frac{5}{2}}, \quad (4.1.4)$$

kde m_t je součinitel přelivu s výřezem ve tvaru V, který lze stanovit například ze vztahu dle Cona:

$$m_t = \frac{0,303}{h^{0,02}}, \quad (4.1.5)$$

kde h je přepadová výška.

Jedním ze speciálních typů přelivů s výřezem ve tvaru V je přeliv Thomsonův. Thomson prozkoumal přeliv s vrcholovým úhlem $\alpha = 90^\circ$, tudíž $\tan \frac{\alpha}{2} = 1,0$ a následně určil konstantní součinitel $m_t = 0,316$. Z toho následně vyplývá vztah pro stanovení průtoku ve tvaru:

$$Q = 1,4 h^{\frac{5}{2}}, \quad (4.1.6)$$

kde h je přepadová výška.

Dle [6] s platností pro:

- $B \geq 8 h$
- $s_1 \geq 3 h$

kde B je šířka obdélníkového žlabu před přelivem a s_1 svislá odlehlost přelivné hrany od dna protiproudě před přelivem.

4.2. Měření průtoku s využitím ostrohranných měrných přelivů s ovlivněním hladinou dolní vody

V této podkapitole jsou ve smyslu [6], [7], [8], [10] a [11] uvedeny přístupy dle různých autorů pro stanovení průtoku při ovlivnění přepadového jevu úrovní hladiny dolní vody. Tedy v takovém případě, kdy se hladina dolní vody nachází nad úrovní přelivné hrany.

V rámci této diplomové práce jsou všechna měření prováděna za pomoci přelivu s pravoúhlým výřezem. Z tohoto důvodu jsou veškeré následně uvedené vztahy zaměřeny výhradně na tento typ.

U všech níže zmíněných vztahů jednotlivých autorů bylo pro jejich přehlednost provedeno sjednocení značení veličin.

Pro stanovení průtoku s využitím měrných přelivů v podmínkách, kdy dochází k ovlivnění přepadu hladinou dolní vody, je nutné měřit zároveň hladinu horní vody h a hladinu dolní vody h_z .

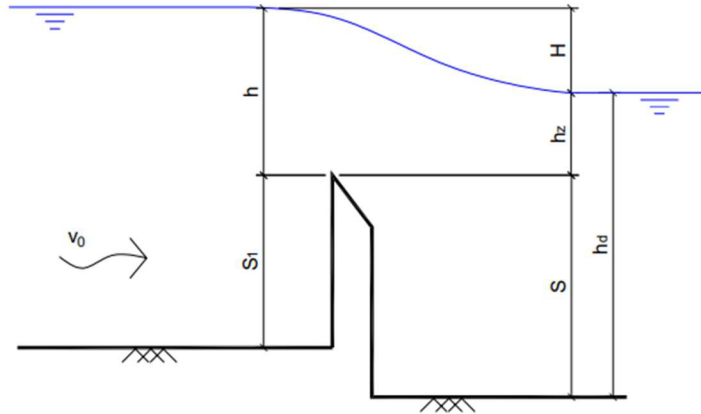
Dle Bazina je možné takový průtok stanovit za pomoci využití výše uvedeného vztahu (4.1.1), jenž je redukován součinitelem zatopení K_z . Ten je dán vztahem:

$$K_z = 1,05 \left(1 + 0,2 \frac{h_z}{s} \sqrt[3]{\frac{H}{h}} \right), \quad (4.2.1)$$

kde h_z je úroveň hladiny dolní vody, s je svislá odlehlost přelivné hrany od dolního dna, H je svislá odlehlost mezi hladinou horní a dolní vody a h je přepadová výška.

Výsledný vztah má poté tvar:

$$Q = K_z m b \sqrt{2g} h^{\frac{3}{2}}. \quad (4.2.2)$$



Obr. 9) Nedokonalý přepad přes ostrou hranu

Ville Monte [10], využívá poměru mezi hladinou dolní vody h_z a hladinou horní vody h . Tento poměr budeme dále označovat jako β a má tvar:

$$\beta = \frac{h_z}{h}. \quad (4.2.3)$$

Po dosazení do Ville Monte vztahu (1947) pro výpočet průtoku, dostáváme tvar:

$$Q = (1 - \beta^n)^{0,385} Q_m = K Q_m = \left(1 - \left(\frac{h_z}{h}\right)^n\right)^{0,385} Q_m, \quad (4.2.4)$$

kde Q_m je průtok bez ovlivnění hladinou dolní vody odpovídající přepadové výšce h , K je součinitel zatopení a n je pro přelivy s pravoúhlým výřezem dle [11] rovno 1,5.

Dále je také možné využít vztahu Abou-Seidy a Quraishi (1976):

$$Q = \frac{2}{3} C_d b \sqrt{2g} h^{3/2} [(1 - \beta)^{1/2} (1 + 0,5 \beta)], \quad (4.2.5)$$

kde C_d je průtokový koeficient, b šířka přelivu a h hladina horní vody.

Borghei a další autoři (2003) stanovili pro výpočet ovlivněného průtoku vztah ve tvaru:

$$Q = \left[\left(\left(0,008 \frac{L}{B} + 0,985 \right) + \left(0,161 \frac{L}{B} - 0,479 \right) \right) \left(\frac{h_z}{h} \right)^3 \right]^2 Q_m, \quad (4.2.6)$$

kde L je délka přelivné hrany, B je šířka obdélníkového žlabu před přelivem, h_z hladina dolní vody, h přepadová výška a Q_m průtok bez ovlivnění hladinou dolní vody.

Při zjednodušení, kdy $\frac{L}{B} = 1$, dostaneme vztah ve tvaru:

$$Q = [0,993 - 0,318 \beta^3]^2 Q_m, \quad (4.2.7)$$

kde β je definováno výše vztahem (4.2.3).

5. PROCESNÍ INSTRUMENTACE UŽÍVANÁ V OBLASTI MĚŘENÍ PRŮTOKU V PROFILECH S VOLNOU HLADINOU

V této kapitole jsou ve smyslu [4] a [5] popsány základní snímače využívané v rámci kontinuálního měření parametrů proudu při aplikaci metod zmíněných v kapitole 3 včetně vyhodnocovacích jednotek, které jsou s těmito snímači propojeny.

5.1. Měření úrovně hladiny

Měření úrovně hladiny vody (výšky přepadového paprsku) je možné provádět jak snímači kontaktními, tak i snímači bezkontaktními.

5.1.1. Kontaktní snímače

Tento typ snímačů je instalován do prostoru pozorovaného proudu. Mezi nejvíce využívané patří například membránové piezometrické snímače, které lze využít do mírně znečištěných odpadních vod. Hlavní výhodou těchto snímačů, oproti snímačům bezkontaktním, je jejich necitlivost na výskyt pěny na hladině. Snímače je vhodné umisťovat do míst, kde nedochází k ovlivnění proudových poměrů, k sedimentaci částic a také k jejich vynoření v rámci variačního rozpětí hloubek měřicího systému. Tento typ snímačů je také možné integrovat do kombinovaného snímače určeného pro současné měření hloubky a rychlosti proudu.



Obr. 10) Piezometrický snímač [12]

V případě bystrinného proudění může také docházet k selhávání snímače, poněvadž dochází k ovlivnění vykazovaných hodnot vlivem dynamického účinku proudu. Pro kontaktní měření hloubek lze taktéž využívat ultrazvukového principu, kdy je snímač umístěn na dně v místě měrného profilu anebo (v případě výskytu dnového sedimentu) je

osazen na plovoucím pontonu. V takové situaci je měřena vzdálenost směrem od hladiny vody k sedimentu nikoliv ke dnu.

5.1.2. Bezkontaktní snímače

Hlavní výhodou bezkontaktního měření je snadná instalace a neovlivnění proudových poměrů vlivem instalace samotného snímače. Nevýhodou těchto snímačů je jejich neschopnost vyrovnat se s výskytem pěny na hladině, kdy může docházet ke zkreslení vykazovaných měřených hodnot. Mezi nejběžněji používaný systém bezkontaktního měření úrovně hladiny je systém založený na ultrazvukovém nebo radarovém principu.



Obr. 11) Radarový snímač od firmy NIVUS [13]



Obr. 12) Ultrazvukový snímač firmy Nivus instalovaný před měrným žlabem typu Venturi [13]

Měření rychlosti proudu je v případě využití kontinuální metody prováděno především za pomoci kontaktních metod. Těmito metodami je možné určit „bodové“ rychlosti určené

z jistého měrného objemu v okolí snímače nebo rychlosti svislicové či rychlosti v horizontálních rovinách měrného průřezu. Tento typ snímačů pracuje na ultrazvukovém či indukčním principu. Snímače se vyrábí v podobě, kdy jsou určeny pouze pro měření rychlosti, současně je za pomoci ultrazvukových snímačů či za pomoci snímačů zmíněných v kapitole 5.1. měřena i hloubka.



Obr. 13) Ultrazvukový rychlostní senzor s integrovaným ultrazvukovým měřením hloubky proudu [12]

5.2. Vyhodnocovací jednotky

Vyhodnocovací jednotky jsou propojené s výše uvedenými snímači a ve většině případů slouží pro zpracování (příjmu, vyhodnocení atd.) výstupního signálu a dále k jeho zpracování či vizualizaci. V závislosti na použité metodě se na displeji jednotky objevují hodnoty o měřené hloubce proudu (výšce přepadového paprsku), měřené rychlosti proudu, ploše průtočného průřezu a také hodnota stanoveného průtoku. Hodnota proteklého objemu je stanovena časovou integrací z okamžitých hodnot průtoku. U více moderních vyhodnocovacích jednotek jsou zobrazovány provozní hodiny a také je u nich zajištěna archivace jak proteklého objemu, tak i průtoku zpravidla v průměrných hodnotách za (5 – 60) minut.

Při využití vyhodnocovací jednotky u metody Q/h charakteristiky je hlavním cílem stanovit ze správně změřené hodnoty přepadové výšky, resp. hloubky proudu odpovídající průtok. V tomto případě je ve vyhodnocovací jednotce uložena funkční závislost ve smyslu vztahu (4.1).

U využití kontinuitních metod jsou vyhodnocovací jednotky vybaveny protokolem pro zadávání tvaru průtočného průřezu ve funkční závislosti na hloubce proudu. Jednotky by také měly být vybaveny možností zadání kalibrační konstanty ve smyslu vztahu (3.2.1).



Obr. 14) Vyhodnocovací jednotka od firmy Nivus užívaná u metody Q/h charakteristiky [13]

6. MOTIVACE A CÍL PRÁCE

Cílem této diplomové práce bylo rozšíření experimentálních prací provedených v rámci bakalářské práce [1] o stanovení příslušné náhradní funkce Q/h charakteristiky, pomocí které by bylo zajištěno správné měření průtoku i v případě zatopení přelivných hran od úrovně hladiny dolní vody v prostoru SK ČOV.

Většina přístupů pro stanovení průtoku při ovlivnění přepadového jevu úrovní hladiny dolní vody, tj. za nedokonalého přepadu, využívá, jak bylo prezentováno v podkapitole 4.2., součinitel zatopení založený na poměru úrovně hladiny dolní a horní vody. Tímto součinitelem zatopení je dále násobena hodnota průtoku neovlivněného průtoku odpovídající příslušné přepadové výšce, čímž je dosaženo výsledné hodnoty ovlivněného průtoku.

V rámci předložené diplomové práce byl zvolen přístup využívající vztah (4.2.4) pro výpočet ovlivněného průtoku na ostrohranném měrném přelivu. Jedná se o vztah založený na neovlivněném průtoku stanoveném pro přeliv s pravoúhlým výřezem a poměru úrovně hladiny dolní a horní vody.

Již v rámci bakalářské práce [1] byl pro výpočet průtoku v podmínkách dokonalého přepadu stanoven vztah (2.3.2), který vychází z korekce prostého součtu dvou průtoků odpovídajících příslušné přepadové výšce, a který byl v rámci předložené diplomové práce dále využíván a rozvíjen za účelem stanovení průtoku v podmínkách nedokonalého proudění tak, jak bude podrobněji popsáno v podkapitole 7.2.

Předložená diplomová práce je rozčleněna celkem do dvou hlavních částí, na část teoretickou, jež je popsána výše a na část praktickou uvedenou v následujících kapitolách.

7. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální měření Q/h charakteristiky přelivů SK ČOV Brno – Modřice v podmínkách nedokonalého proudění bylo provedeno v prostorách LVV Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně na zmenšeném hydraulickém fyzikálním modelu odlehčovací komory v délkovém měřítku 1 : 10.

7.1. Fyzikální model, hydraulický okruh, měřicí technika a modelová podobnost

Obsahem této podkapitoly je ve smyslu [1] a [2] popis fyzikálního modelu včetně připojeného hydraulického okruhu. Dále pak popis příslušné měřicí techniky a na závěr je v krátkosti popsána problematika související modelové podobnosti.

Vzhledem k tomu, že veškeré zmíněné parametry modelu byly popsány již v rámci bakalářské práce [1] došlo k částečnému zestručnění následujících podkapitol.

7.1.1. Fyzikální model objektu SK ČOV

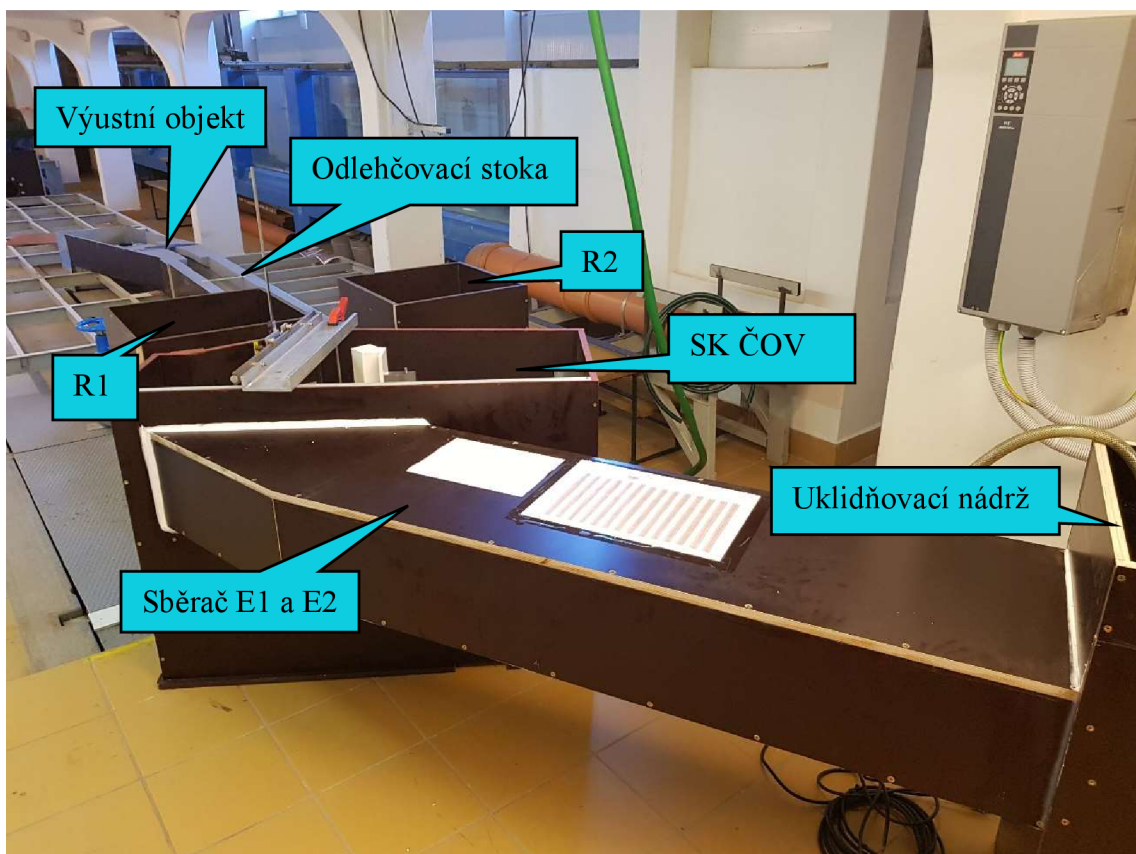
Fyzikální model objektu SK ČOV patrný z obrázku 15 byl vybudován v délkovém měřítku 1 : 10 ($M = 10$). Velikost měřítka vznikla z rozborů požadavků na rozsah experimentálních prací, mezních podmínek mechanické podobnosti pozorovaných jevů a v úzké vazbě na prostorové a kapacitní možnosti laboratorního okruhu. Veškeré tvary a rozměry modelu odpovídají skutečným parametrům zmenšeným v měřítku délek 1 : 10. Pro přepočítání výsledných hodnot z modelu na skutečné dílo bylo využito Froudovo kritérium modelové podobnosti (podkapitola 7.1.4.).

Jako materiál byla pro všechny konstrukční části modelu použita vodovzdorná překližka. Pro zajištění přesných tvarů přelévacích konstrukcí a obtékaných pilířů bylo využito materiálu tvrzeného PVC. Pro tvarově složitější prvky byl využit extrudovaný polystyrén XPS. Na některé části modelu byl v rámci úprav použit nerezový či pozinkovaný plech. Spojování jednotlivých prvků modelu bylo prováděno lepením nebo šroubovými spoji. Těsnění modelu bylo zajištěno využitím silikonových a polyuretanových tmelů.

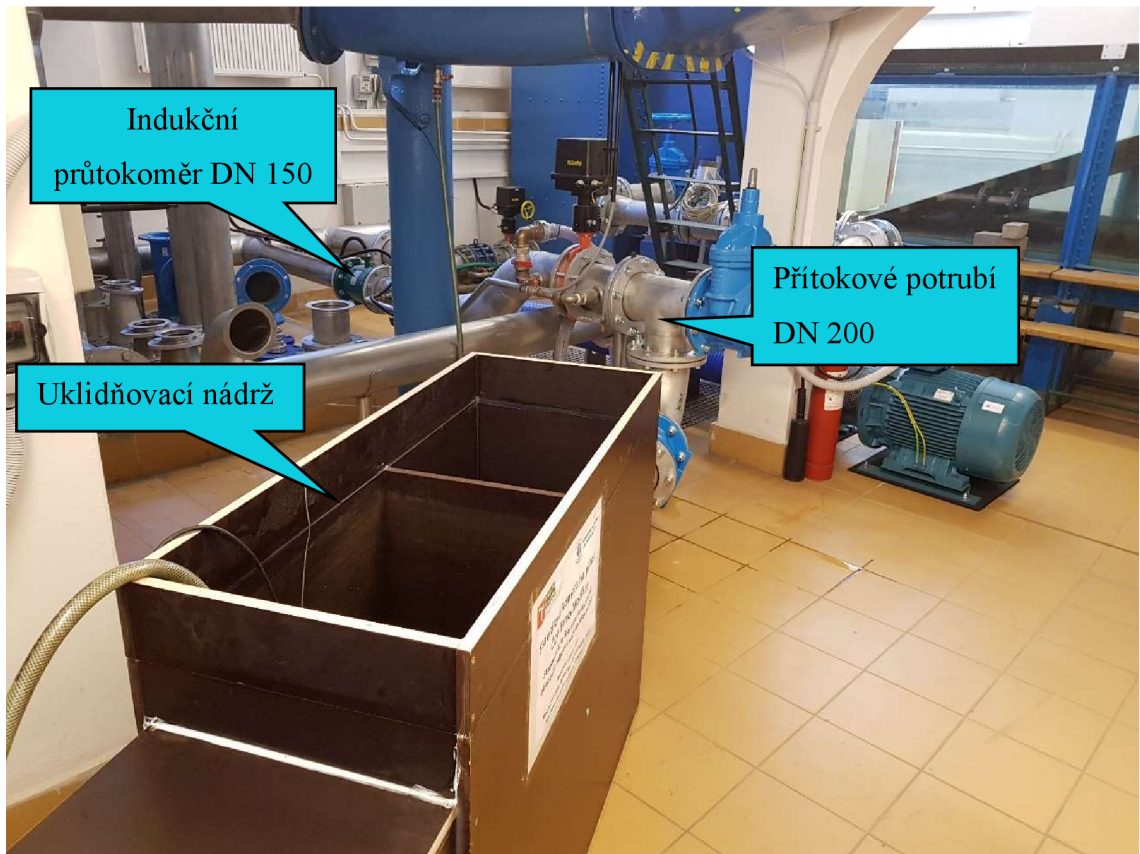
Model byl umístěn v prostoru jednoho z hydraulických okruhů laboratoře a byl navržen následujícím způsobem.

Na uklidňovací přítokovou nádrž, která byla napojena k hydraulickému okruhu za pomoci potrubí DN 200 vybaveného průtokoměrem (obr. 16), navazovaly sběrače E1 a E2, které přiváděly vodu do prostoru SK ČOV. Z prostoru SK ČOV byly realizovány dva výtoky, první z nich simuloval nátok do technologické linky ČOV (R1) a druhý navazoval na spadišťovou šachtu za předmětnými přelivy (R2). Oba tyto nátoky byly dále zaústěny do spojných a regulačních nádrží R1 a R2. Odtok z regulační nádrže R1 byl realizován pomocí potrubí DN 150, jež bylo vybaveno regulačním uzávěrem a průtokoměrem. Za ním byla voda zaústěna zpět do akumulární nádrže vody laboratoře. Za regulační nádrží R2 dále následoval dlouhý úsek odlehčovací stoky a výustní objekt, za nímž voda opět volně padala do akumulární nádrže vody laboratoře.

Instalace a uspořádání modelu v laboratoři jsou patrné z obr. 15.

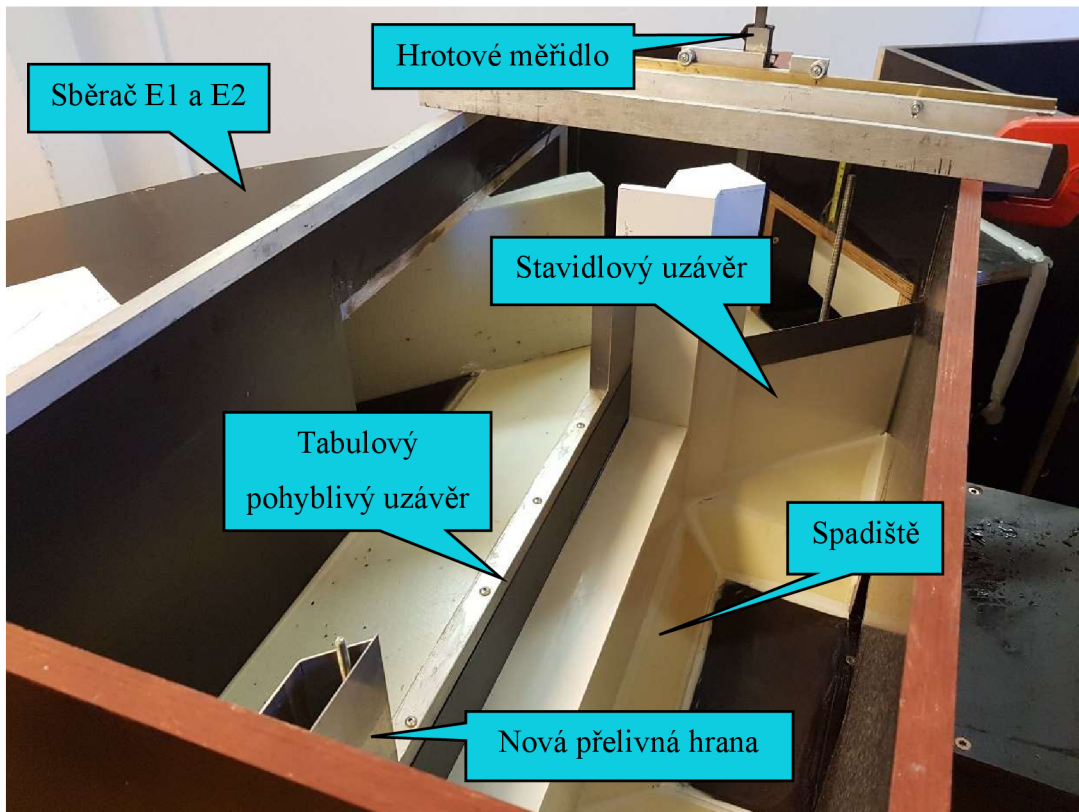


Obr. 15) Celkový pohled na hydraulický model

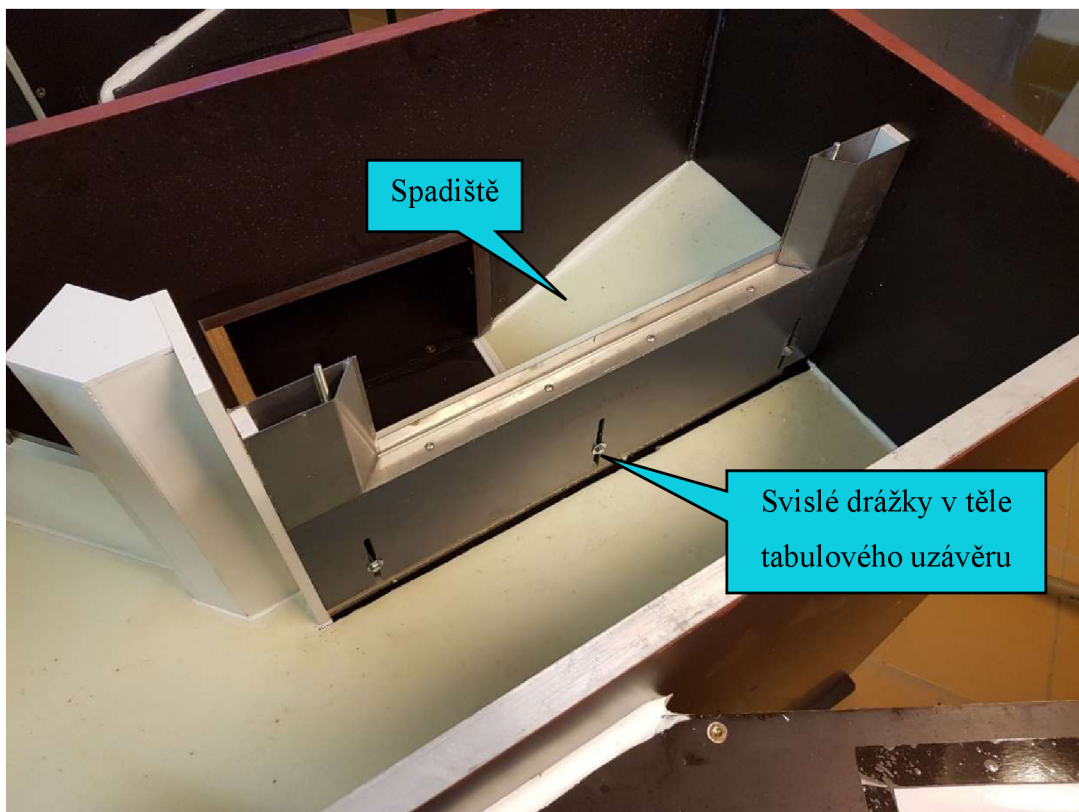


Obr. 16) Pohled na uklidňovací nádrž

Z obr. 17 je patrné prostorové uspořádání SK ČOV včetně pevného stavidlového uzávěru a nové přelivné hrany umístěné na pohyblivém tabulovém uzávěru. V těle tabulového uzávěru byly vytvořeny celkem tři svislé drážky pro zajištění jeho pohybu, popř. jeho upevnění v přesné poloze (obr. 18).



Obr. 17) Pohled do prostoru SK ČOV

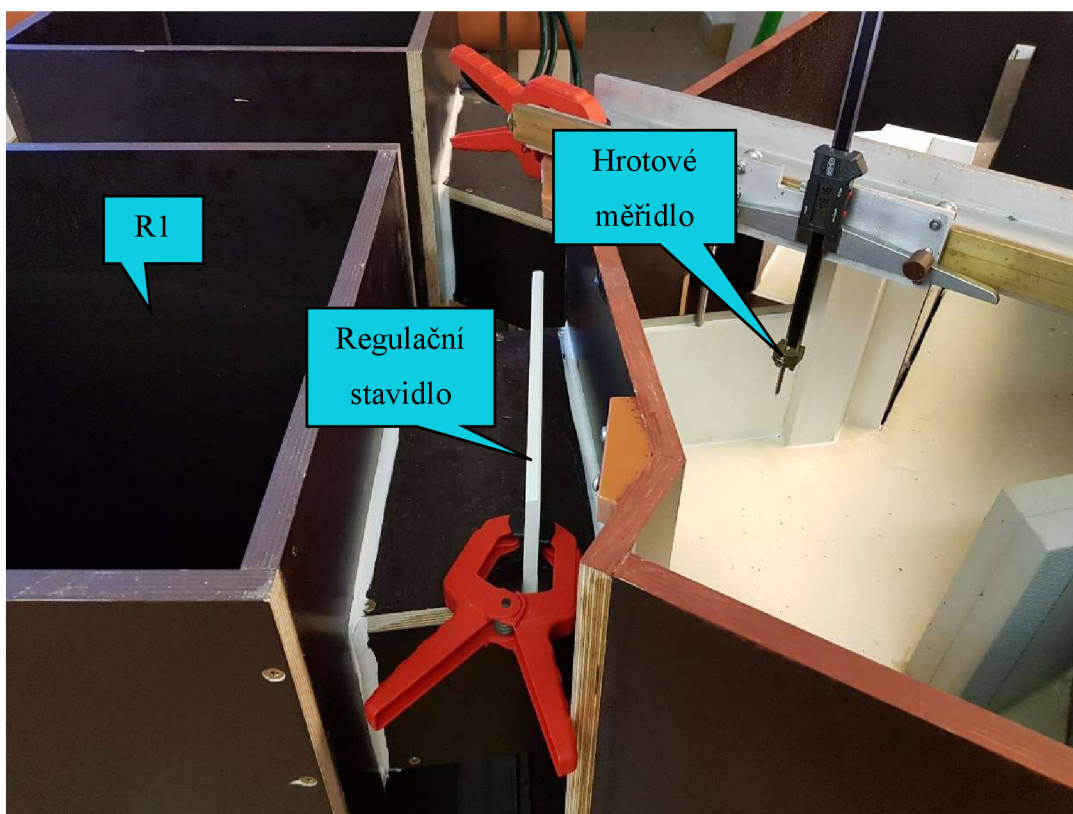


Obr. 18) Pohled na tabulový pohyblivý uzávěr

Na obr. 19 je patrné propojení SK ČOV s regulační nádrží R1 uzavřeným kanálem pravoúhlého profilu. Součástí propojení bylo i stavidlo, které zde sloužilo k regulaci průtoku vody do technologické linky ČOV (R1). Zmíněné stavidlo bylo regulováno ručním posunem s možností jeho zafixování v jakékoliv poloze. Regulace hladiny v nádrži R1 byla prováděna regulačním šoupětem umístěným na odpadním potrubí DN 150. To bylo ve smyslu obr. 21 instalováno na odtoku z nádrže R1 a sloužilo k odvádění vody do akumulární nádrže hydraulického okruhu. Současně bylo toto odpadní potrubí vybaveno průtokoměrem o dimenzi DN 100.

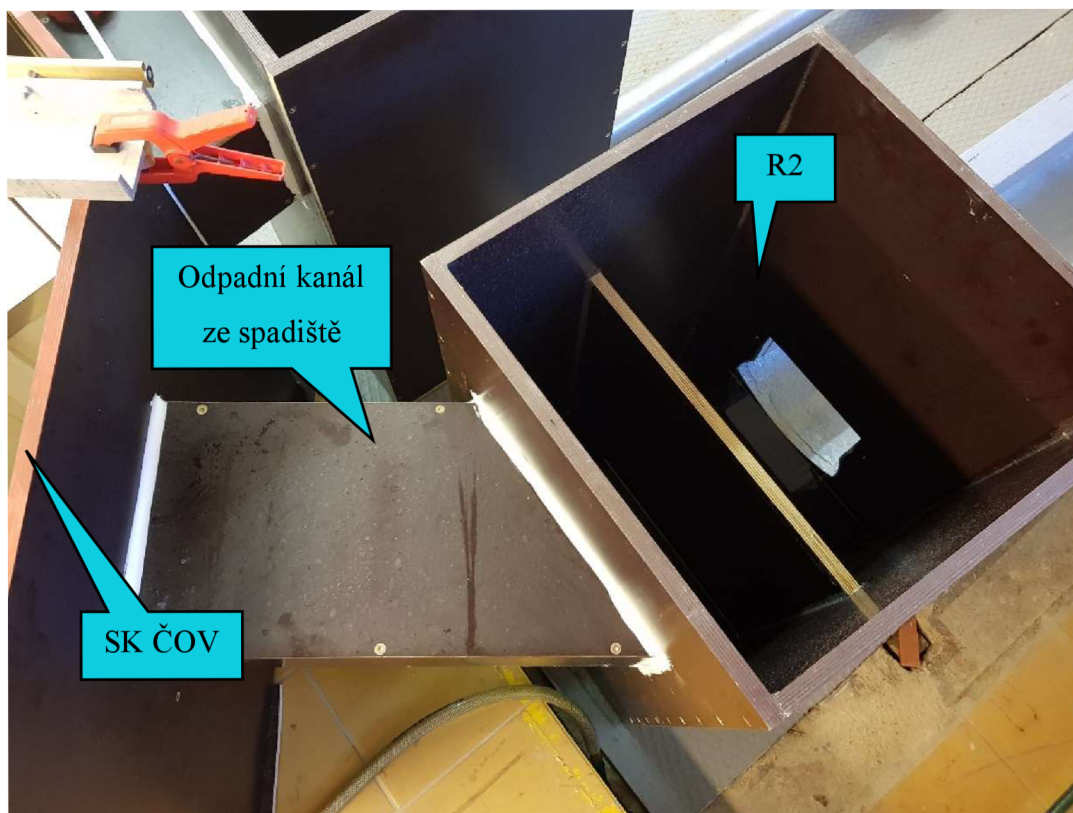
Celkový průtok vody přitékající do modelu $Q_{př}$ byl měřen jedním průtokoměrem a na odtoku z regulační nádrže R1 byl instalován druhý průtokoměr, kterým byla měřena hodnota průtoku $Q_{čov}$ směřující do technologické linky ČOV. Následně pak bylo možné z rozdílu hodnot těchto průtoků stanovit průtok odlehčovaných vod do řeky Svratky, dle vztahu:

$$Q_{svr} = Q_{př} - Q_{čov} \quad (7.1.1.1)$$

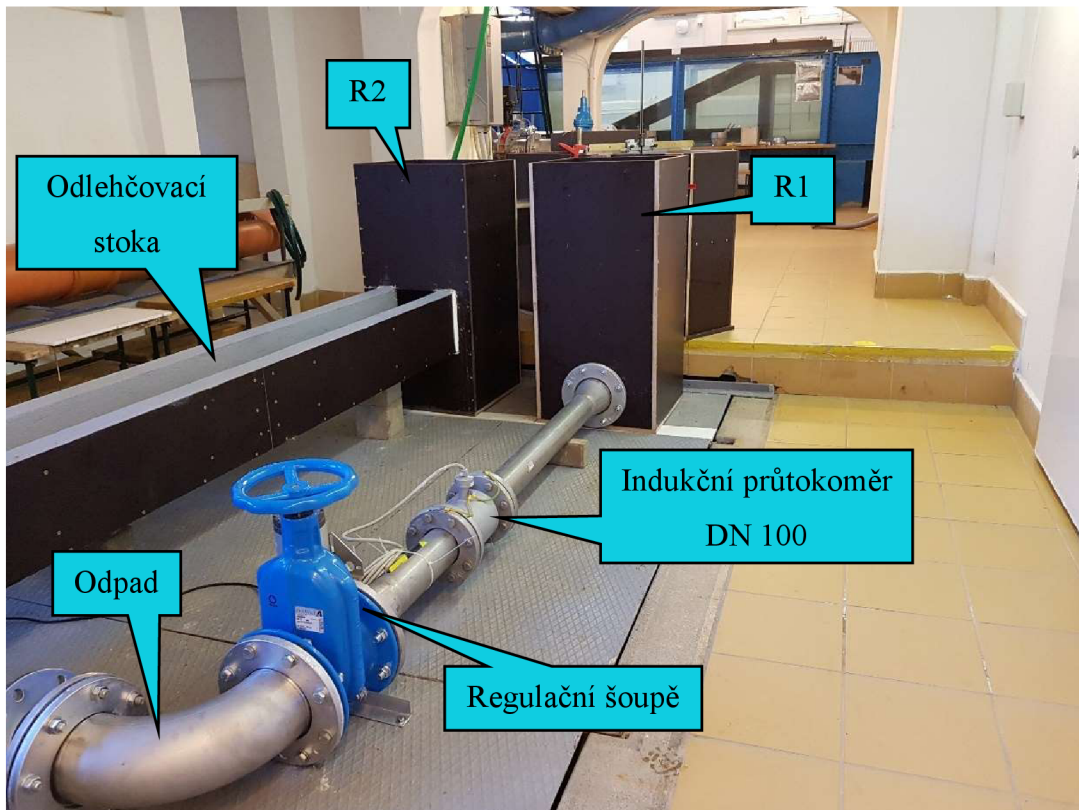


Obr. 19) Propojení SK ČOV s regulační nádrží R1

Odtok ze SK ČOV do spojné nádrže R2 je patrný z obr. 20. Dále na nádrž R2 přímo navazoval úsek odlehčovací tlamové stoky, jejich vzájemné propojení je možné vidět na obr. 20 a obr. 21.

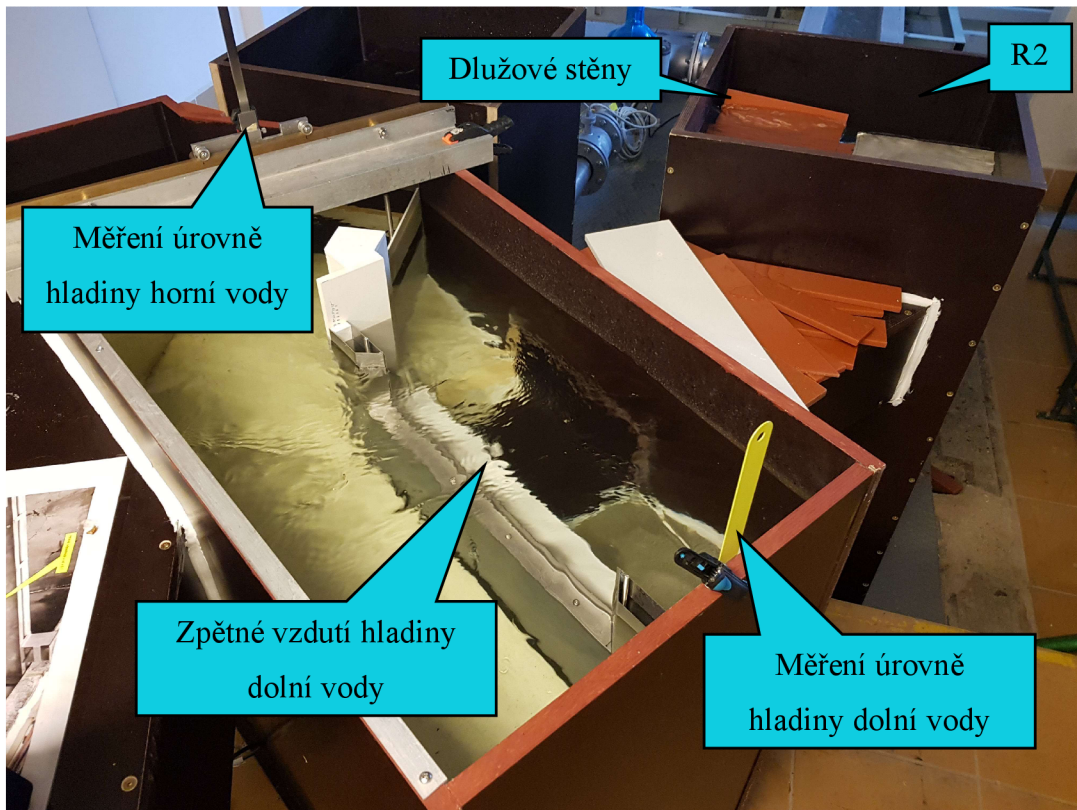


Obr. 20) Propojení SK ČOV s regulační nádrží R2



Obr. 21) Pohled na nádrže R1 a R2 a odtoků z nich

V regulační nádrži R2 byla v rámci experimentálních prací prováděna simulace nedokonalého proudění s využitím dlužových stěn (obr. 22), kdy umístěním těchto stěn došlo k částečnému zabránění odtoku vody z nádrže, a tak k postupnému zpětnému vzdouvání úrovně hladiny dolní vody. Vzdouváním úrovně hladiny dolní vody tak bylo docíleno požadovaného ovlivnění. Měření následně probíhalo způsobem, kdy byl ponechán konstantní průtok s měnící se úrovní hladiny dolní vody. Pro každý konstantní průtok tak byla měřena hodnota úrovně hladiny dolní vody h_d a úroveň hladiny horní vody h .



Obr. 22) Popravní pohled na dlužové stěny sloužící k regulaci odtoku vody z nádrže R2 (simulace nedokonalého proudění)

7.1.2. Hydraulický okruh

Hydraulický okruh, na který byl model napojen, se nachází v areálu fakulty v budově B. Tento okruh je založen na cirkulačním principu. Voda byla k modelu dopravována z podzemní zásobní akumulární nádrže za pomoci dvou ponorných čerpadel odstředivého typu s kapacitou $2 \times 75 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Maximální hodnota zkoušeného průtoku na modelu činila $38 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, na skutečném díle tato hodnota odpovídá $12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Čerpadla byla ovládána měničem frekvence takovým způsobem, aby bylo možné pokrýt celý rozsah požadovaných měřených průtoků.

Elektro – technologická část čerpací stanice (ČS) předmětného hydraulického okruhu je řešena tak, že veškeré elektro prvky jsou umístěny ve skříňovém rozvaděči, ve kterém se dále nachází dva měniče frekvence a řídicí systém. Celý model byl k přírubě ČS hydraulického okruhu napojen za využití tvarovek a nerezového potrubí (obr. 16).

7.1.3. Měřicí technika

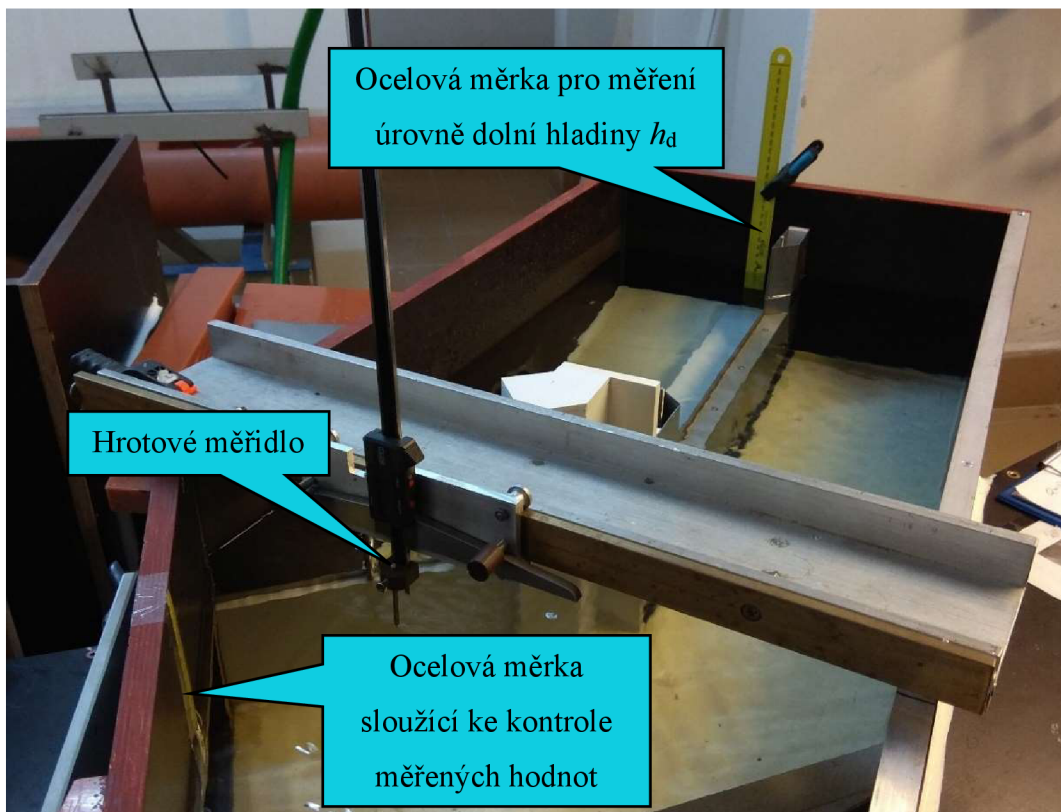
Během experimentálních prací na modelu probíhalo měření řady veličin důležitých k popisu sledovaných jevů. Z obr. 23, 24 a 25 jsou patrné pomůcky a měřidla, které byly k tomuto měření použity. Pro měření průtoku vody přitékající do modelu (uklidňovací nádrže) byl použit magneticko-indukční průtokoměr DN 150. Shodný typ průtokoměru o DN 100 byl použit i na odtoku z regulační nádrže R1. Přesnost odečtu hodnot ze zobrazovacího zařízení průtokoměru byla v setinách $l \cdot s^{-1}$.

Měření úrovně horní hladiny v prostoru SK ČOV (poproudě před předmětnými přelivy) bylo prováděno za pomoci digitálního hrotového měřidla. Hodnoty přepadových výšek byly průběžně kontrolovány za pomoci ocelové měřky umístěné v blízkosti hrotového měřidla.

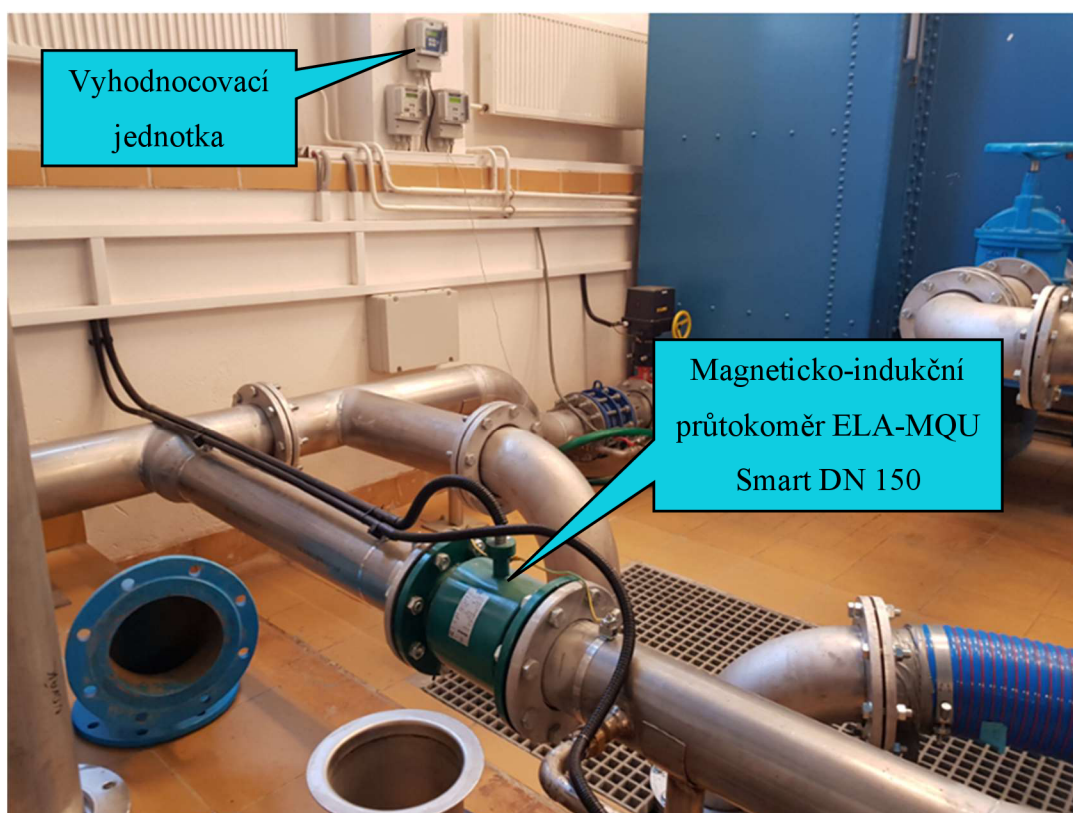
Měření úrovně dolní hladiny (poproudě za předmětnými přelivy v prostoru spadiště) bylo prováděno pomocí ocelové měřky (obr. 23). Půdorysné místo měření bylo určeno na základě pozorování charakteru proudění v prostoru spadiště tak, aby v jeho místě bylo zajištěno dostatečné zklidnění hladinových poměrů.

Měření výškové odlehlosti mezi hranou stavidlového uzávěru a tabulového uzávěru bylo prováděno použitím analogového posuvného měřidla. Kontrola rovinnosti přelivných hran byla prováděna využitím vodních vah různých délek.

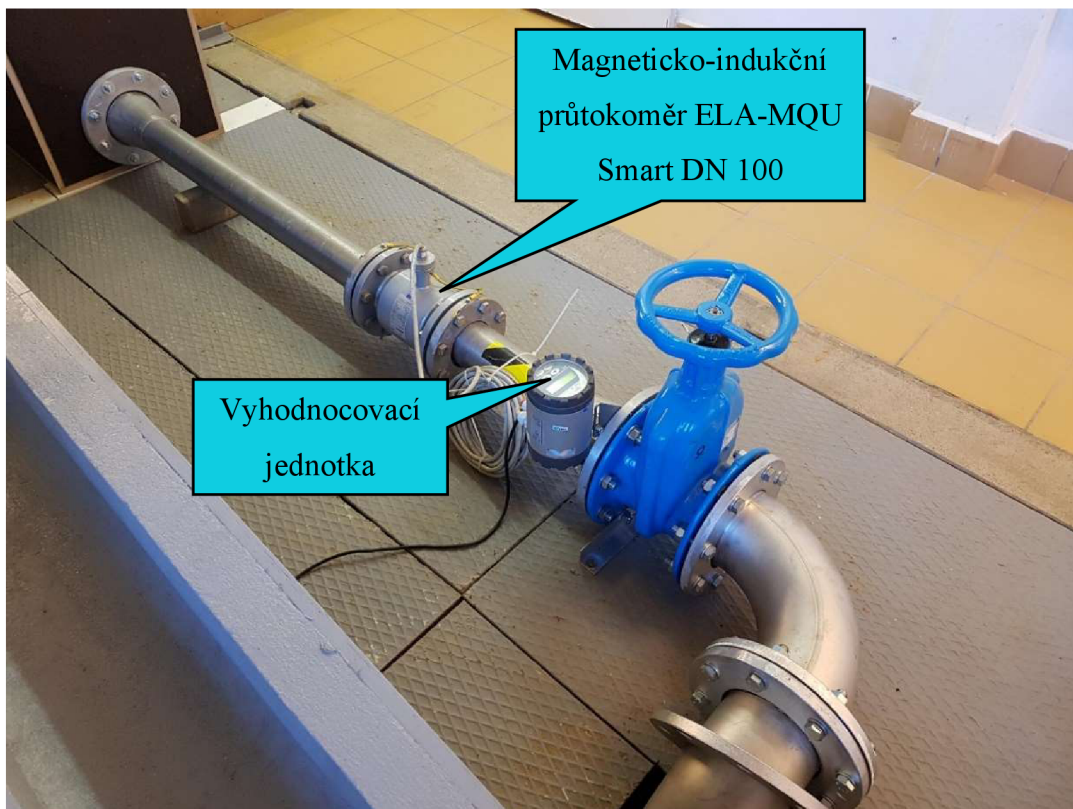
Naměřené hodnoty byly průběžně zaznamenávány a vyhodnocovány za pomoci PC.



Obr. 23) Měření úrovně horní a dolní hladiny v prostoru SK ČOV



Obr. 24) Pohled na měření průtoku přitékajícího do uklidňovací nádrže



Obr. 25) Pohled na měření průtoku odtékajícího z nádrže R1

7.1.4. Modelová podobnost

Pro přepočítání pozorovaných jevů z modelu na dílo bylo využito Froudovo kritérium dle vztahu ve tvaru:

$$Fr = \frac{v^2}{g l}, \quad (7.1.4.1)$$

kde v je průřezová rychlost proudu, g gravitační tíhové zrychlení a l charakteristický délkový rozměr.

Froudovo kritérium je možné použít pouze v případě, že proudění na objektu nebo modelu je ovlivňováno převážně silami tíže.

Dále musí platit, že hodnota Froudova kritéria musí být pro sledovaný jev na modelu i díle totožná. Pro přepočítání veličin tak platí:

$$l_s = l_m M, \quad (7.1.4.2)$$

$$v_s = v_m M^{0,5}, \quad (7.1.4.3)$$

$$Q_s = Q_m M^{2,5}, \quad (7.1.4.4)$$

kde indexy s označují veličiny vztažené na dílo (skutečnost) a indexy m označují veličiny vztažené na model. Pro délkové měřítko $M = 10$ lze uvedené vztahy vyjádřit rovnicemi následujícího tvaru:

$$l_s = l_m 10, \quad (7.1.4.5)$$

$$v_s = v_m \sqrt{10} = v_m 3,16, \quad (7.1.4.6)$$

$$Q_s = Q_m 10^{2,5} = Q_m 316,23. \quad (7.1.4.7)$$

Detailnější popis problematiky modelové podobnosti je uveden v rámci bakalářské práce [1].

7.2. Postup měření

V rámci předložené diplomové práce byla provedena veškerá experimentální měření v podmínkách nedokonalého proudění.

Všechna měření je dle jejich posloupnosti možné rozčlenit následovně:

1. Experimentální stanovení závislosti součinitele zatopení K_s na poměru h_{ds}/h_s v situaci, kdy voda přepadá pouze přes pevné stavidlo.
2. Experimentální stanovení závislosti součinitele zatopení K_t na poměru h_{dt}/h_t pro čtyři polohy tabulového uzávěru $\pm Z$ v situaci, kdy voda přepadá pouze přes pohyblivý tabulový uzávěr.
3. Experimentální stanovení kompletní Q/h charakteristiky v podmínkách nedokonalého proudění.

Pro stanovení všech výše zmíněných závislostí bylo vedle příslušných hodnot průtoků provedeno vždy měření úrovně hladiny horní vody h_s , resp. h_t , a úroveň hladiny dolní vody h_d .

Za vzažnou výškovou úroveň, tj. nula vodočtu ($\pm 0,000$), zde byla pro všechna měření zvolena kóta přelivné hrany pevného stavidla.

Přepadová výška h_s , byla měřena za pomoci hrotového měřidla vždy celkem třikrát a následně zaznamenávána do tabulky s přesností na dvě desetinná místa. Aritmetickým průměrem těchto tří hodnot pak byla získána výsledná hodnota h_s .

Výška h_t realizující se na přelivné hraně tabulového uzávěru byla stanovena na základě vztahu (2.3.1) v závislosti na měnící se úrovni hrany tabulového uzávěru $\pm Z$.

Zároveň zde byla pokaždé pro konstantní průtok měřena za využití ocelové měřky s přesností na milimetry postupně se měnící úroveň hladiny dolní vody h_d . Odečet byl proveden opět celkem třikrát a zaznamenán do tabulky s přesností na celá čísla. Výslednou hodnotu jsme získali taktéž aritmetickým průměrem těchto hodnot.

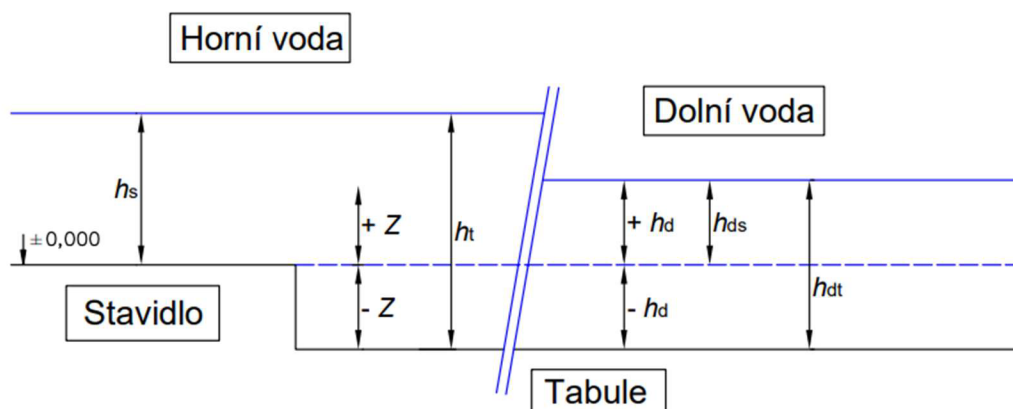
Pro stanovení úrovně hladiny dolní vody realizující se na přelivné hraně pevného stavidla h_{ds} platí:

$$h_{ds} = h_d . \quad (7.2.1)$$

Pro pohyblivý tabulový uzávěr je tato úroveň h_{dt} určena analogicky dle (2.3.1) ze vztahu:

$$h_{dt} = h_d - Z . \quad (7.2.2)$$

Všechny výše zmíněné měřené a následně vyhodnocené svislé odlehlosti jsou schematicky znázorněny na obr. 26.



Obr. 26) Schéma měřených a vyhodnocovaných odlehlostí v prostoru SK ČOV

Hodnoty průtoku vody přitékající do modelu a hodnoty průtoku natékající do technologické linky ČOV byly odečítány z vyhodnocovacích jednotek indukčních

průtokoměrů a dále zaznamenány do tabulky. Hodnoty průtoku vody přitékající do modelu byly odečítány s přesností na jedno desetinné místo a hodnoty průtoku na odtoku z technologické linky ČOV s přesností na dvě desetinná místa.

Celkem tak bylo naměřeno 8 pozic úrovně hladiny dolní vody, v rozsahu hodnot $h_{ds}/h_s \in (0,0 - 1,0)$, resp. $h_{dt}/h_t \in (0,0 - 1,0)$, pro 8 konstantních průtoků na přítoku do modelu.

7.3. Zvolený přístup stanovení průtoku v podmínkách nedokonalého proudění

Námi zvolený přístup využívá a rozvíjí již existující vztah (2.3.2) pro výpočet průtoku Q_{SVr_n} bez ovlivnění hladinou dolní vody stanovený v rámci bakalářské práce [1]. Hlavním cílem tohoto přístupu bylo nalézt takové součinitele zatopení K_s a K_t , kterými lze v případě nedokonalého proudění korigovat průtoky Q_s a Q_t ve vztahu (2.3.2) v závislosti na poměru hloubek h_{ds}/h_s a h_{dt}/h_t ve smyslu rovnice (4.2.4) a stanovit tak průtočné množství v podmínkách ovlivnění hladinou dolní vody, tedy při nedokonalém proudění.

V rámci předložené diplomové práce jsme analogicky podobně jako jiní autoři zavedli následující vztahy:

$$K_s = \left[1 - \left(\frac{h_{ds}}{h_s} \right)^\omega \right]^\varkappa, \quad (7.3.1)$$

$$K_t = \left[1 - \left(\frac{h_{dt}}{h_t} \right)^\lambda \right]^\chi, \quad (7.3.2)$$

kde ω , \varkappa , λ a χ jsou parametry, které byly během zpracování naměřených hodnot optimalizovány metodou nejmenších čtverců (podkapitola 7.4.). Mocnitel n ze vztahu (4.2.4) byl zde nahrazen parametry ω a λ a mocnitel 0,385 z téhož vztahu byl nahrazen obecnými parametry \varkappa a χ .

Měřením a následným zpracováním všech hodnot jsme tak získali potřebné závislosti poměru K_s na h_{ds}/h_s a K_t na h_{dt}/h_t .

Výpočet průtoku v podmínkách nedokonalého proudění vycházející ze vztahu (2.3.2) je následně možné zapsat vztahem:

$$Q_{\text{Svr}_0} = \beta (K_s Q_s + K_t Q_t)^\gamma = \beta (Q_{s0} + Q_{t0})^\gamma, \quad (7.3.3)$$

kde Q_s a Q_t jsou průtoky stanovené za podmínek dokonalého proudění [1] v závislosti na přepadových výškách h_s a h_t , Q_{s0} a Q_{t0} jsou hodnoty korigovaných průtoků a β a γ jsou součinitele stanovené v rámci bakalářské práce [1].

7.4. Zpracování naměřených hodnot

Hodnotami naměřenými na modelu se rozumí hodnoty průtoků $Q_{\text{labpř}}$ a $Q_{\text{labčov}}$, které byly odečítány z vyhodnocovacích jednotek indukčních průtokoměrů a následně zaznamenávány do tabulky v programu Microsoft Excel, ve kterém byly dále matematicky zpracovány. Za pomoci těchto průtoků pak bylo možné stanovit průtok Q_{labSvr} ve smyslu vztahu (7.1.1.1).

Současně byly měřeny i úrovně horní hladiny h_s , resp. h_t a hodnoty úrovně dolní hladiny h_d měřené pro daný průtokový stav. I tyto hodnoty byly zaznamenávány do tabulky v programu Microsoft Excel, kde byly dále matematicky a graficky zpracovány.

Aritmetickým průměrem naměřených hodnot úrovně hladiny horní vody h_s a úrovně hladiny dolní vody h_d pro daný konstantní průtok byla získána jejich výsledná hodnota:

$$h_s = \frac{\sum_{i=1}^n h_{si}}{n}, \quad (7.4.1)$$

resp.

$$h_d = \frac{\sum_{i=1}^n h_{di}}{n}, \quad (7.4.2)$$

kde počet měření $n = 3$.

Za pomoci těchto hodnot bylo dále možné stanovit poměr mezi hladinou dolní vody h_{ds} (7.2.1), resp. h_{dt} (7.2.2) a hladinami horní vody h_s , resp. h_t (2.3.1), tedy:

$$\frac{h_{ds}}{h_s}, \quad (7.4.3)$$

resp.

$$\frac{h_{dt}}{h_t}, \quad (7.4.4)$$

Veškeré získané hodnoty bylo následně nutné přepočítat z modelu na skutečné dílo na základě zákonů modelové podobnosti (podkapitola 7.1.4.) dle vztahu pro délky l_s (7.1.4.5) a pro průtoky Q_s (7.1.4.7).

Pomocí takto přepočtených naměřených přepadových výšek byl stanoven okamžitý průtok Q_{Svr_n} v podmínkách dokonalého proudění dle vztahů uvedených v [1]. Hodnota neovlivněného průtoky Q_{Svr_n} byla následně použita pro stanovení součinitele zatopení K ve smyslu vztahu:

$$K = \frac{Q_{Svr}}{Q_{Svr_n}}, \quad (7.4.5)$$

kde Q_{Svr} je průtok odlehčovaných vod stanovený ze vztahu (7.1.1.1).

Dále mohly být stanoveny součinitele K_s a K_t dle vztahů (7.3.1) a (7.3.2) u kterých byla provedena optimalizace jejich parametrů ω , \varkappa , λ a χ . Za parametry ω a \varkappa byla zprvu ponechána hodnota 1,5 a za parametry λ a χ hodnota 0,385 (4.2.4). Optimalizace těchto parametrů byla provedena na základě proložení naměřených bodů metodou nejmenších čtverců s obecnou regresní rovnicí ve tvaru:

$$R_{ki}^2 = \sum_{i=1}^n (K_i - K_{regi})^2, \quad (7.4.6)$$

kde $K_{reg} = K_s$ v situaci, kdy voda přepadá pouze přes pevné stavidlo, $K_{reg} = K_t$ v situaci, kdy voda přepadá pouze přes pohyblivý tabulový uzávěr a n je celkový počet měřených úrovní hladiny dolní vody, resp. hladiny horní vody.

Za využití optimalizovaných parametrů bylo dále možné ve smyslu vztahu (4.2.4) a (7.3.3) stanovit hodnotu ovlivněného průtoky Q_{Svr_o} .

Na základě předchozích experimentálních prací provedených v rámci bakalářské práce [1] byla pro všechna měření nastavena míra otevření regulačního stavidla na hodnotu 25 %, hodnota průtoky tekoucího do technologické linky ČOV byla vždy „škrcena“ na hodnotu $Q_{\check{C}OV} = 3,35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ po přepočtu na dílo, na modelu tento průtok odpovídal hodnotě $Q_{lab\check{C}OV} = 10,58 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$.

Výsledkem zpracování všech měřených hodnot je tabulka s naměřenými a přepočtenými hodnotami společně s grafickým znázorněním závislosti součinitele zatopení K_s na poměru hladin h_{ds}/h_s a součinitele zatopení K_t na poměru hladin h_{dt}/h_t .

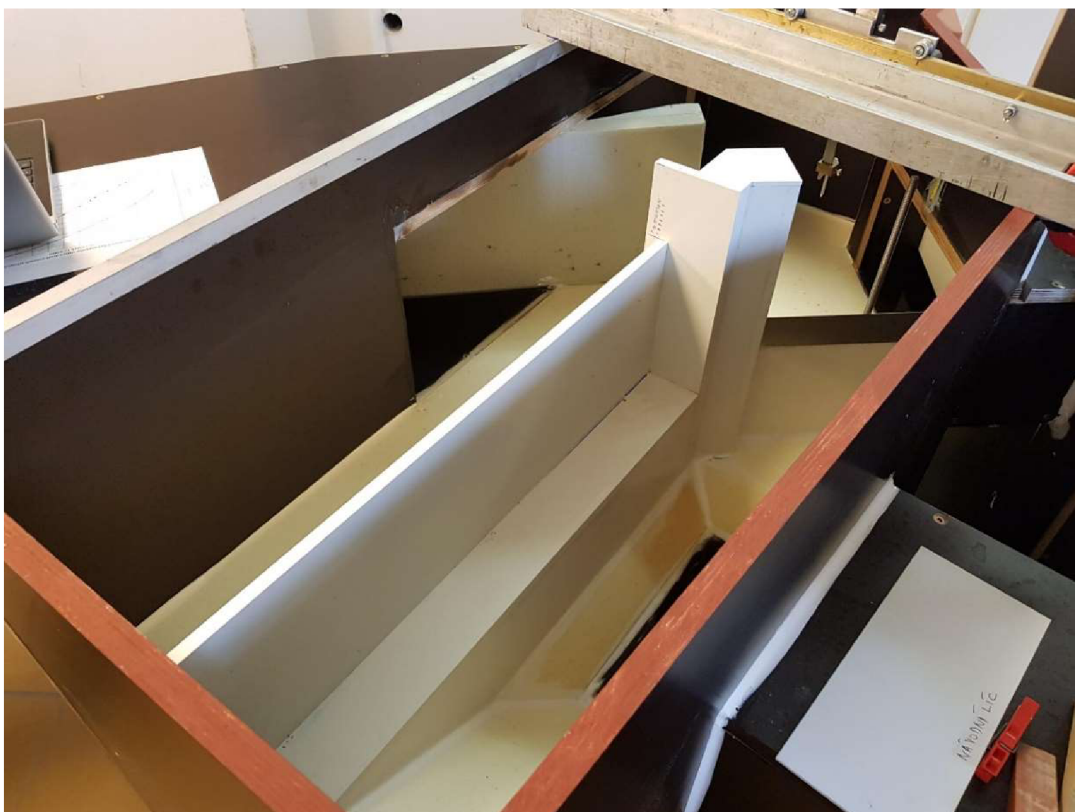
7.5. Výsledky experimentálních prací na modelu

V následujících podkapitolách budou jednotlivě popsány veškeré výsledky experimentálních prací provedených na fyzikálním hydraulickém modelu. Všechny níže uvedené hodnoty byly odvozeny pro základní jednotky SI [m], [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]. Dosažené výsledky jsou uváděny v rozměrech již přepočtených na skutečné dílo, pokud není uvedeno jinak.

7.5.1. Experimentální stanovení závislosti součinitele zatopení K_s na poměru h_{ds}/h_s

V první části experimentálních prací bylo hlavním úkolem stanovit závislost součinitele zatopení K_s (K_{reg}) na poměru hladin h_{ds}/h_s v situaci, kdy voda přepadá pouze přes pevné stavidlo. Pro získání této závislosti bylo nutné zajistit, aby během měření nedocházelo k přepadu vody přes pohyblivý tabulový uzávěr. K tomu byla využita deska umístěná do drážek tabulového uzávěru tak, jak je patrné z obr. 27.

Následně bylo možné provést měření přepadové výšky h_s a úrovně hladiny dolní vody h_{ds} během kterého odtékal do technologické linky ČOV již výše zmíněný průtok $Q_{\text{čov}} = 3,35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ s nastavenou mírou otevření stavidla na 25 %. Průtok vody přepadající přes pevné stavidlo se pohyboval mezi hodnotami od $1,62 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $3,36 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr. 27) Deska v místě tabulového uzávěru zajišťující přepad vody pouze přes pevné stavidlo



Obr. 28) Měření při přepadu vody pouze přes pevné stavidlo

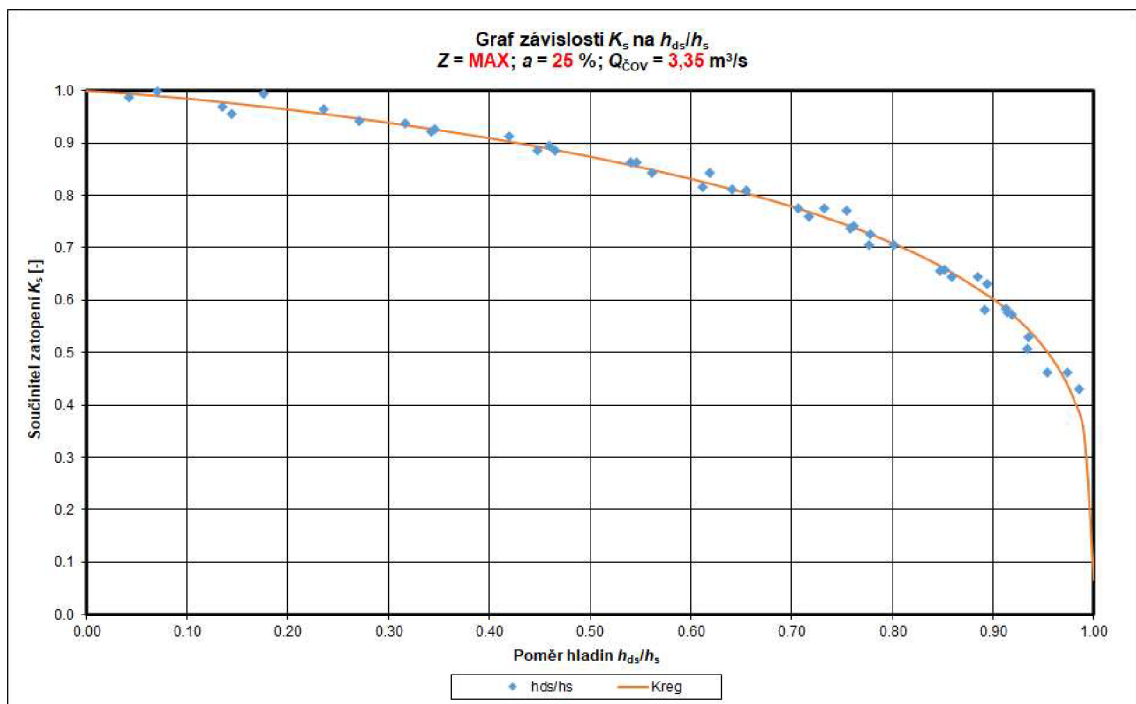
Po zpracování naměřených hodnot ve smyslu podkapitoly 7.4. byly získány hodnoty optimalizovaných parametrů ω a κ , za jejichž pomoci bylo dále možné stanovit hodnotu součinitele zatopení K_s dle vztahu:

$$K_s = \left[1 - \left(\frac{h_{ds}}{h_s} \right)^\omega \right]^\kappa = \left[1 - \left(\frac{h_{ds}}{h_s} \right)^{1,225} \right]^{0,240} \quad (7.5.1.1)$$

Tímto součinitelem byla následně přenásobena hodnota průtoku Q_s stanoveného za podmínek dokonalého proudění [1] v závislosti na měřené přepadové výšce h_s , čímž byla získána hodnota ovlivněného průtoku Q_{so} přepadajícího přes pevné stavidlo, tedy ve smyslu:

$$Q_{so} = K_s Q_s = K_s (4,4120 h_s^{1,4565}). \quad (7.5.1.2)$$

Vzápětí byly do grafu 2 vyneseny poměry měřených hladin h_{ds}/h_s v závislosti na součiniteli zatopení K (7.4.5) a proloženy příslušnou regresí K_s .



Graf 2) Závislost K_s na h_{ds}/h_s v situaci, kdy voda přepadá pouze přes pevné stavidlo

7.5.2. Experimentální stanovení závislosti součinitele zatopení K_t na poměru h_{dt}/h_t

Analogicky k předchozímu postupu u přelévání stavidla bylo nutné, pro stanovení závislosti K_t (K_{reg}) na poměru hladin h_{dt}/h_t , provést měření v situaci, kdy voda přepadá

pouze přes pohyblivý tabulový uzávěr. Zajištění přepadu vody bylo řešeno obdobně jako u předešlého měření instalací plastové stěny umístěné nad hranu pevného stavidla (obr. 29).

Pro stanovení závislosti bylo provedeno měření přepadové výšky h_t a určení úrovně hladiny dolní vody h_{dt} celkem pro čtyři různé výškové úrovně přelivné hrany pohyblivého tabulového uzávěru, tedy pro čtyři různé hodnoty parametru Z . Konkrétně jimi byly hodnoty $Z = -0,208$ m, $Z = -0,068$ m, $Z = 0,085$ m a $Z = 0,233$ m. Z toho vyplývá, že prováděná měření byla výrazně rozsáhlejší.



Obr. 29) Měření při přepadu vody pouze přes pohyblivý tabulový uzávěr

Naměřením a zpracováním všech hodnot (podkapitola 7.4.) jsme získali hodnoty optimalizovaných parametrů, v tomto případě se jedná o parametry λ a χ , díky kterým byla dále stanovena hodnota součinitele zatopení K_t :

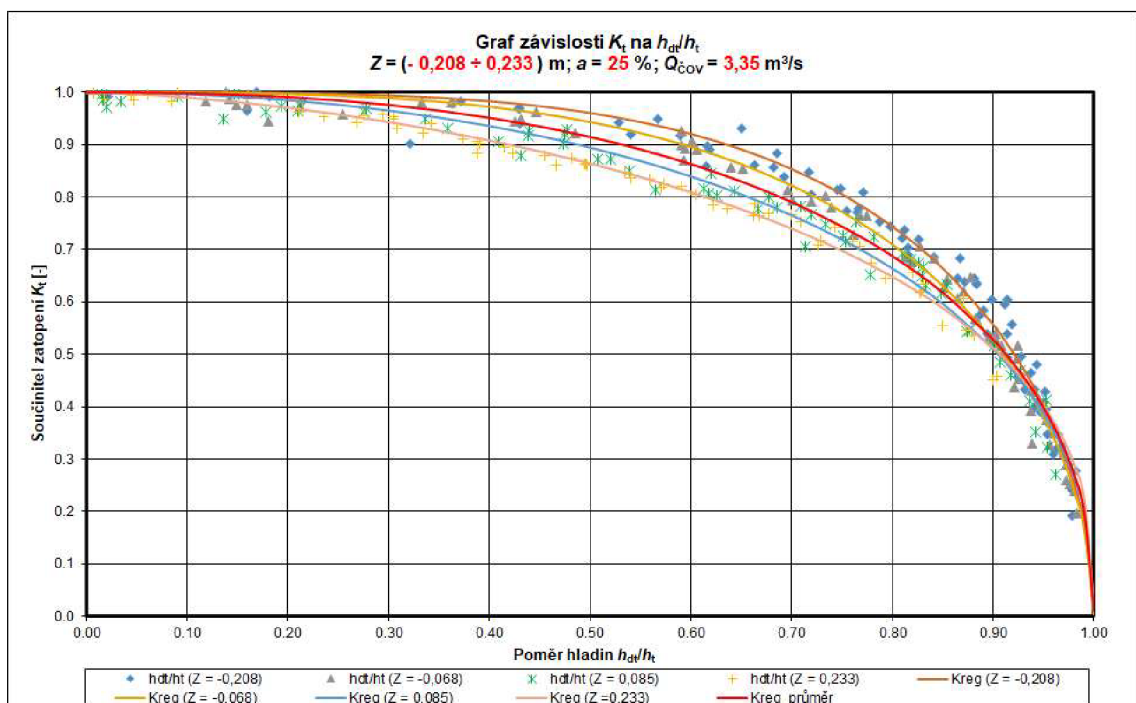
$$K_t = \left[1 - \left(\frac{h_{dt}}{h_t} \right)^\lambda \right]^\chi = \left[1 - \left(\frac{h_{dt}}{h_t} \right)^{2,424} \right]^{0,429} . \quad (7.5.2.1)$$

Hodnota ovlivněného průtoku Q_{to} přepadajícího přes tabulový uzávěr pak mohla být vypočtena dle vztahu:

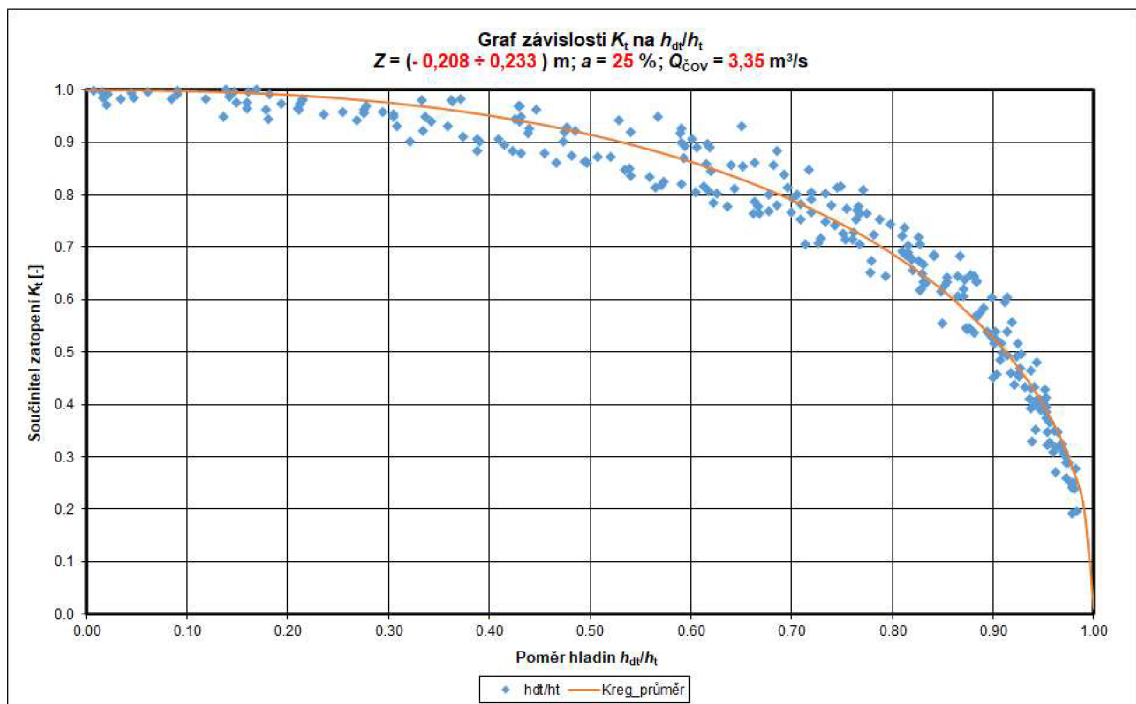
$$Q_{to} = K_t Q_t = K_t (5,5838 h_t^{1,4698}), \quad (7.5.2.2)$$

kde Q_t je průtok stanovený za podmínek dokonalého proudění [1] v závislosti na měřené přepadové výšce h_t .

Hodnoty poměrů hladin h_{dt}/h_t byly taktéž vyneseny do grafu 3 v závislosti na součiniteli zatopení K (7.4.5) pro čtyři různé výše zmíněné měřené úrovně přelivné hrany tabulového uzávěru a následně pro zjednodušení proloženy „průměrnou“ regresí K_t vyznačenou jak v grafu 3 tak samostatně i v grafu 4. Na grafu 3 tak každá z křivek odpovídá určité úrovni pohyblivé tabule Z .



Graf 3) Závislosti K_t na h_{dt}/h_t stanovené v rozsahu hodnot $Z \in (-0,208; 0,233) \text{ m}$



Graf 4) Souhrnná závislost K_t na h_d/h_t v situaci, kdy voda přepadá pouze přes pohyblivý tabulový uzávěr

7.5.3. Experimentální stanovení kompletní Q/h charakteristiky v podmínkách nedokonalého proudění

V této části prací bylo nutné pro posouzení odvozeného vztahu (7.3.3) provést měření celkového ovlivněného průtoku odlehčovaných vod do řeky Svratky za situace, kdy dochází k přepadu vody přes oba předmětné přelivy s měnící se úrovní přelivné hrany tabulového uzávěru Z . Úroveň přelivné hrany tabulového uzávěru tak byla pro měření nastavena na tři hodnoty parametru $Z = -0,208 \text{ m}$, $Z = 0,000 \text{ m}$, $Z = 0,233 \text{ m}$.

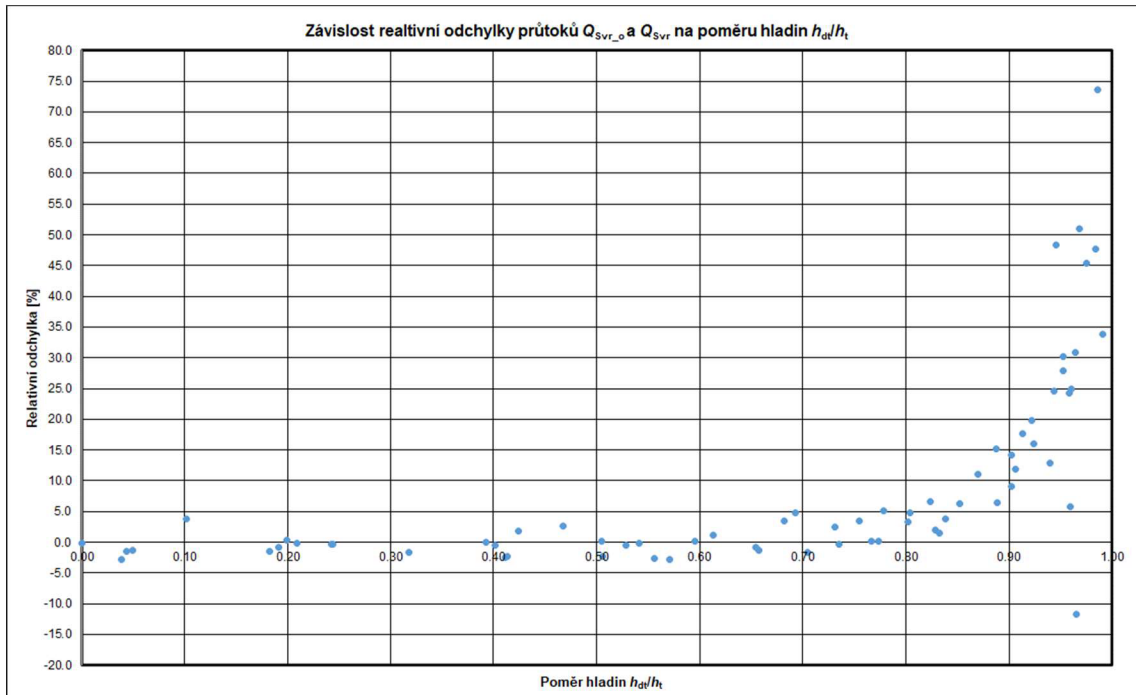
Po zpracování všech naměřených hodnot byla stanovena hodnota neovlivněného průtoku Q_{Svr_n} dle vztahu (2.3.2) a hodnota ovlivněného průtoku Q_{Svr_o} dle nalezeného vztahu (7.3.3).

Následným porovnáním ovlivněného průtoku Q_{Svr_o} a průtoku Q_{Svr} (7.1.1.1) bylo zjištěno, že pozitivních výsledků (nízkých relativních odchylek mezi předmětnými průtoky) je dosaženo u všech hodnot poměrů hladin $h_{ds}/h_s < 0,9$, respektive $h_d/h_t < 0,9$. Tento výsledek je výrazně potěšující a potvrzuje správnost zvolené strategie stanovení průtoku. Bohužel u hodnot poměrů hladin $h_{ds}/h_s > 0,9$, respektive $h_d/h_t > 0,9$, tj. při vysokém stupni zatopení přelivných hran, pak dochází k výraznému nárůstu těchto odchylek průtoků až o 50 % (graf 5). Z tohoto důvodu bylo nutné v této části experimentálních zkoušek stanovit

takový součinitel zatopení K_{spol} , kterým lze při hodnotách poměrů hladin nad 0,9 korigovat součet průtoků Q_s a Q_t na hodnoty stanovené měřením ve smyslu vztahu:

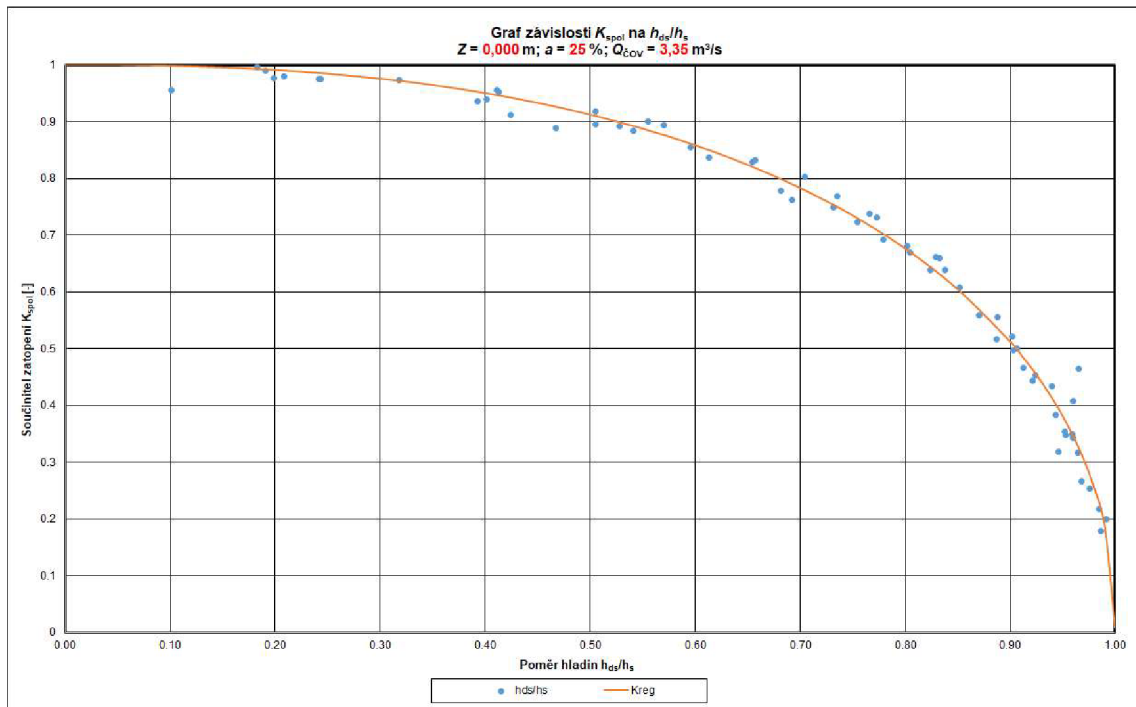
$$Q_{\text{Svr}_o} = \beta [K_{\text{spol}} (Q_s + Q_t)]^\gamma, \quad (7.5.3.1)$$

kde β a γ jsou součinitele stanovené v rámci bakalářské práce [1] dle vztahů (2.3.5) a (2.3.6).



Graf 5) Závislost relativní odchylky průtoků Q_{Svr_o} a Q_{Svr} na poměru hladin h_d/h_t při $Z = 0,000$ m

Stanovení součinitele zatopení K_{spol} zde bylo provedeno obdobným způsobem jako stanovení součinitelů K_s (7.5.1.1) a K_t (7.5.2.1) dle postupu popsaného v podkapitole 7.4. V tomto případě byl do regresní rovnice (7.4.2) za K_{reg} dosazen součinitel zatopení K_{spol} , tedy $K_{\text{reg}} = K_{\text{spol}}$.



Graf 6) Závislost K_{spol} na h_{ds}/h_s s přepadem vody přes obě přelivné hrany při $Z = 0,000 \text{ m}$

Po zpracování měřených hodnot (podkapitola 7.4.), kdy byly obě přelivné hrany na stejné úrovni (tedy $Z = 0,000 \text{ m}$), byly získány hodnoty optimalizovaných parametrů pro určení hodnoty K_{spol} . I v tomto případě je rozlišován součinitel zatopení K_{spol_t} vztažený k přelivné hraně tabulového uzávěru a součinitel zatopení K_{spol_s} vztažený k přelivné hraně pevného stavidla. Hodnota K_{spol_t} je pak využívána v případě, kdy k přepadu vody dojde dříve u přelivné hrany tabulového uzávěru než k přepadu vody přes přelivnou hranu pevného stavidla, tedy v takové situaci, kdy hodnota parametru $Z < 0,000 \text{ m}$. V opačném případě, kdy hodnota parametru $Z > 0,000 \text{ m}$, je využívána hodnota K_{spol_s} .

Platí tedy:

$$K_{spol_t} = \left[1 - \left(\frac{h_{dt}}{h_t} \right)^\phi \right]^\rho = \left[1 - \left(\frac{h_{dt}}{h_t} \right)^{2,442} \right]^{0,451}, \quad (7.5.3.4)$$

$$K_{spol_s} = \left[1 - \left(\frac{h_{ds}}{h_s} \right)^\phi \right]^\rho = \left[1 - \left(\frac{h_{ds}}{h_s} \right)^{2,442} \right]^{0,451}, \quad (7.5.3.5)$$

kde ϕ a ρ jsou optimalizované parametry.

Výslednou hodnotu průtoku Q_s a Q_t , u hodnot poměrů hladin $h_{ds}/h_s > 0,9$, respektive $h_{dt}/h_t > 0,9$, tak lze získat ze vztahů:

$$Q_s = K_{\text{spol}_t} (4,4120 h_s^{1,4565}), \quad (7.5.3.6)$$

$$Q_t = K_{\text{spol}_t} (5,5838 h_t^{1,4698}), \quad (7.5.3.7)$$

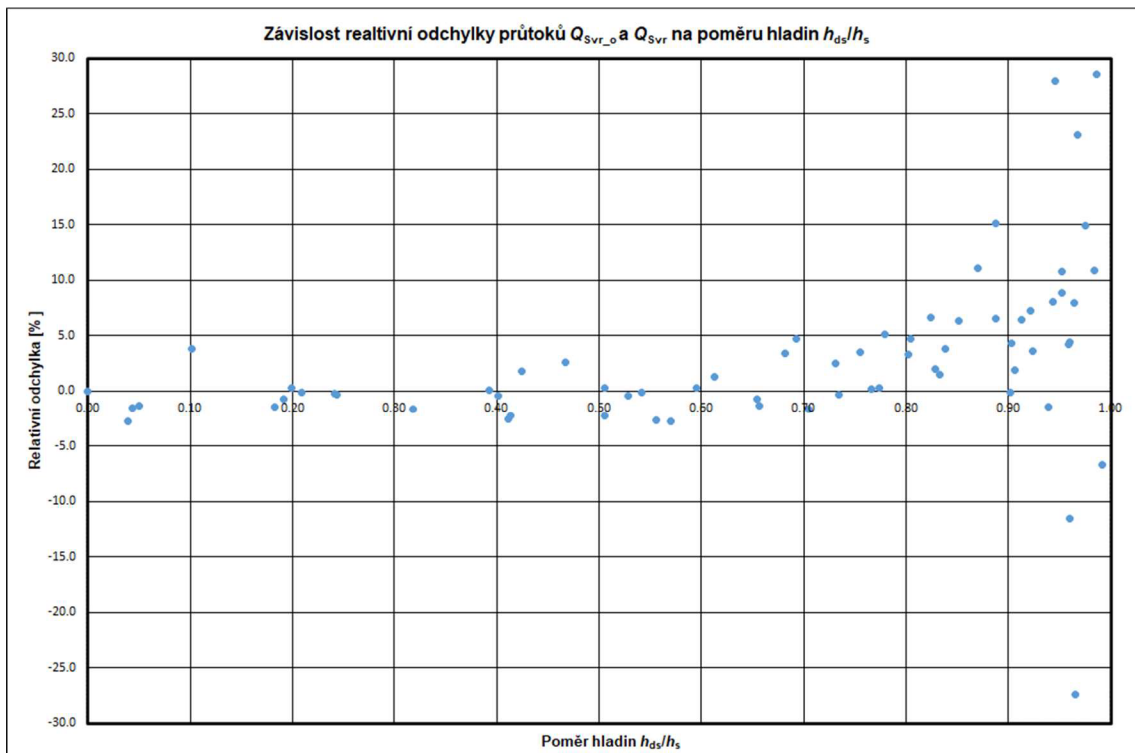
v případě, že $Z < 0,000$ m a v případě, kdy $Z > 0,000$ m potom dle vztahů:

$$Q_s = K_{\text{spol}_s} (4,4120 h_s^{1,4565}), \quad (7.5.3.8)$$

$$Q_t = K_{\text{spol}_s} (5,5838 h_t^{1,4698}). \quad (7.5.3.9)$$

Aplikací součinitele zatopení K_{spol} (K_{spol_s} , K_{spol_t}) tak bylo docíleno požadovaného dostatečného snížení relativních odchylek průtoků mezi Q_{Svr_o} a Q_{Svr} při hodnotách poměrů hladin $h_{ds}/h_s > 0,9$, respektive $h_{dt}/h_t > 0,9$ (graf 7).

Při porovnání grafu 7 s grafem 6 je možné v intervalu poměrů hladin $h_{ds}/h_s \in (0,90; 1,00)$ pozorovat výrazné zlepšení odchylek průtoků až o 10 %.



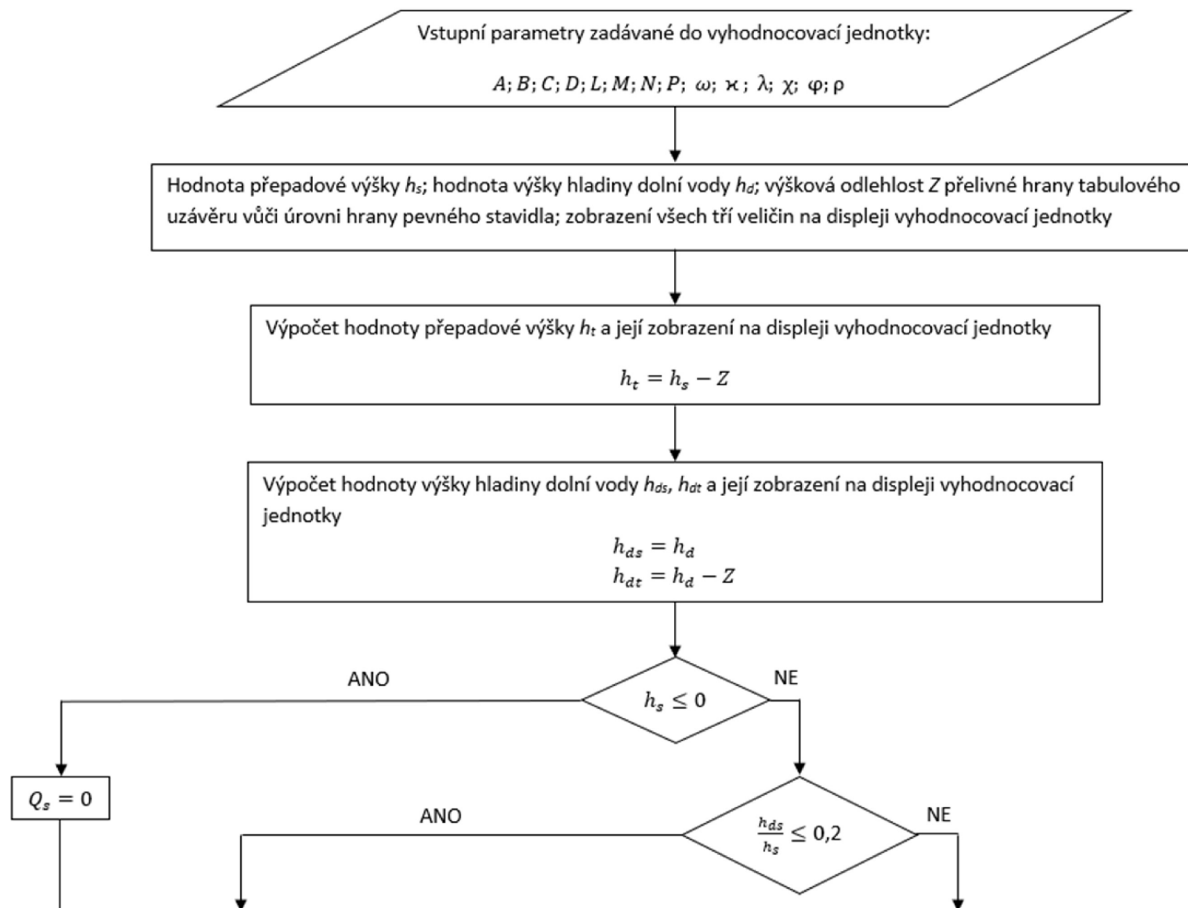
Graf 7) Závislost relativní odchylky průtoků Q_{Svr_o} a Q_{Svr} na poměru hladin h_{ds}/h_s při $Z = 0,000$ m po aplikaci K_{spol}

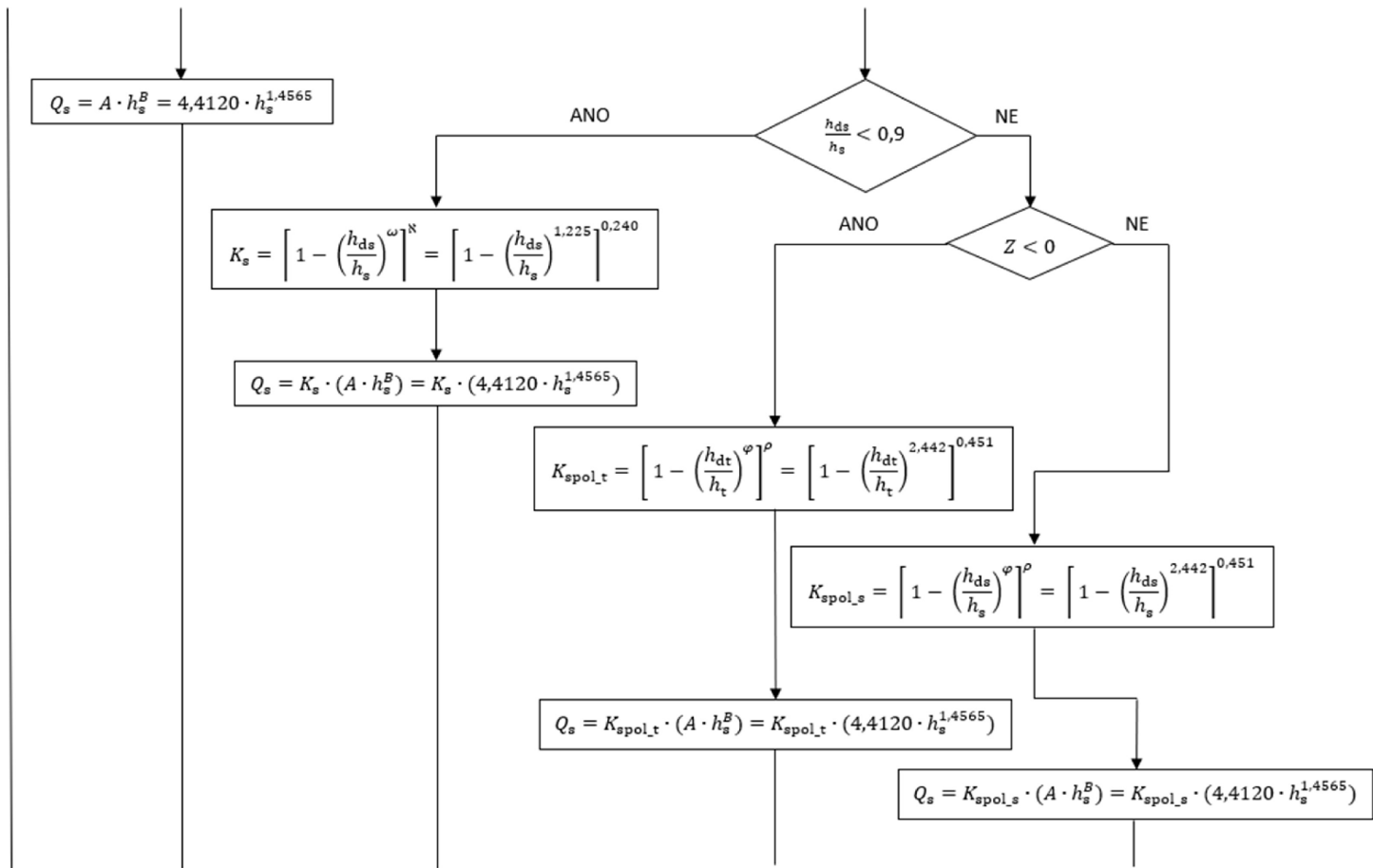
Zároveň je také možné si na grafu 3, 4 a 6 povšimnout, že hranici mezi dokonalým a nedokonalým prouděním tvoří hodnota poměrů hladin okolo $h_{ds}/h_s = 0,2$, respektive $h_{dt}/h_t = 0,2$. Lze tedy říci, že u hodnot poměrů hladin $h_{ds}/h_s \leq 0,2$, respektive $h_{dt}/h_t \leq 0,2$ nedochází k ovlivnění proudění od úrovně hladiny dolní vody a jedná se tak o proudění dokonalé. V opačném případě, kdy $h_{ds}/h_s \geq 0,2$, respektive $h_{dt}/h_t \geq 0,2$ se jedná o proudění nedokonalé ovlivněné od úrovně hladiny dolní vody.

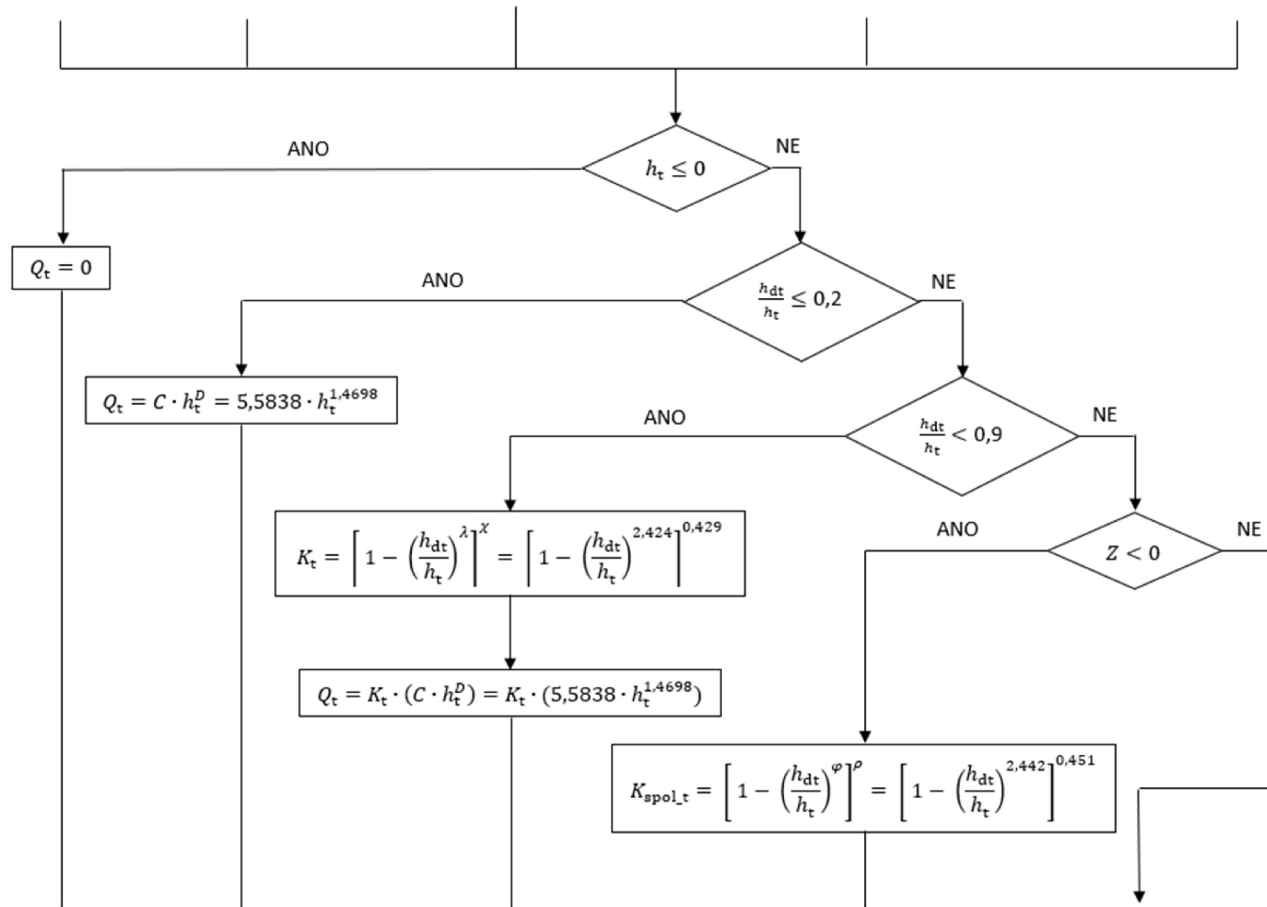
Přístupem ke stanovení výsledného celkového průtoku Q_{Svr} odlehčovaných vod do řeky Svatky byl zachován přístup dle [1] jako korekce prostého součtu průtoků přepadajících přes stavidlo Q_s a pohyblivou tabuli Q_t ve smyslu vztahu (2.3.2). Oba dílčí průtoky je tak možné v celém rozsahu proudových okrajových podmínek stanovit jedním ze čtyř následujících postupů:

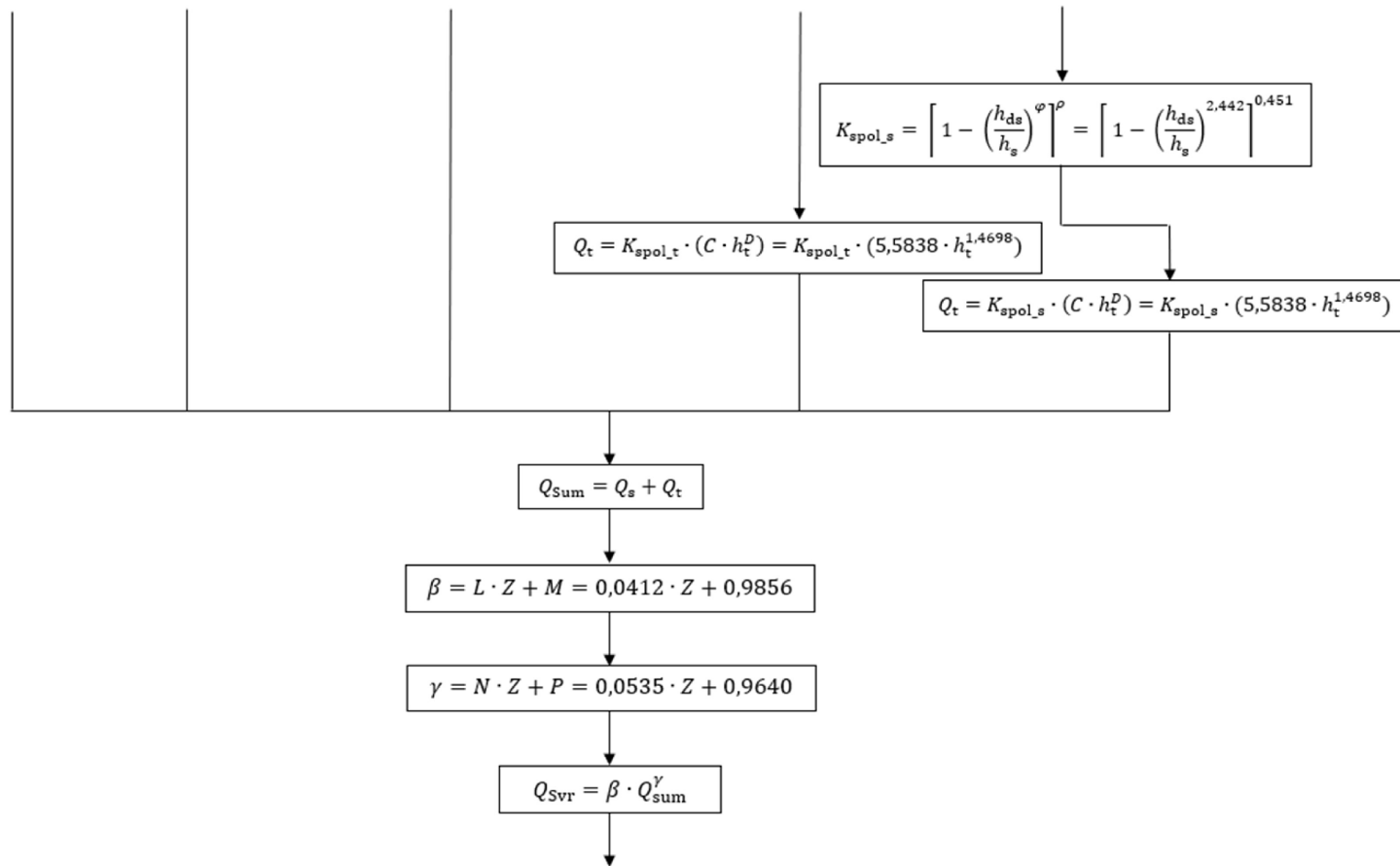
- Jestliže je přepadová výška h_s , resp. h_t , menší jak nula, pak je průtok přes přeliv nulový.
- Jestliže je přepadová výška h_s , resp. h_t , větší než nula a poměr hladin $h_{ds}/h_s \leq 0,2$, respektive $h_{dt}/h_t \leq 0,2$, pak je přepad přes přeliv neovlivněný a průtok tedy není nulový, ale je stanoven dle vztahů pro dokonalé proudění z [1]. Jedná se o vztahy (2.3.3) a (2.3.4), jež jsou vyznačeny v diagramu (obr. 30).
- Jestliže je přepadová výška h_s , resp. h_t , větší jak nula a $0,2 < h_{ds}/h_s \leq 0,9$, respektive $0,2 < h_{dt}/h_t \leq 0,9$, jedná se o přepad ovlivněný a průtok není nulový, a je stanoven ve smyslu vztahů (7.5.1.2) a (7.5.2.2) tak, jak je v diagramu (obr. 30) vyznačeno.
- Jestliže je přepadová výška h_s , resp. h_t , větší jak nula a poměr hladin $h_{ds}/h_s > 0,9$, respektive $h_{dt}/h_t > 0,9$, jedná o přepad ovlivněný a nenulový průtok je zde realizován za vysokého stupně zatopení. Hodnota takového průtoku je stanovena v závislosti na úrovni přelivné hrany tabulového uzávěru Z . V případě, kdy $Z < 0,000$ m se průtok stanoví na základě vztahů (7.5.3.6) a (7.5.3.7), v opačném případě, kdy $Z > 0,000$ m je průtok stanoven dle vztahů (7.5.3.8) a (7.5.3.9) tak, jak je uvedeno v diagramu (obr. 30).

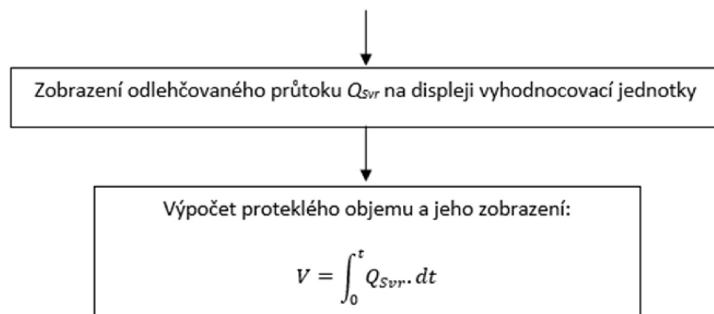
Podrobnější popis postupu výpočtu je znázorněn ve vývojovém diagramu (obr. 30), který byl zásadním podkladem pro programátora software vyhodnocovací jednotky měřicího systému.











Obr. 30) Vývojový diagram

7.6. Porovnání dosažených výsledků s přístupy jiných autorů

V rámci diplomové práce bylo taktéž provedeno posouzení výsledků získaných ze vztahů uvedených v podkapitole 4.2. pro výpočet ovlivněného průtoku s hodnotami stanovenými dle námi odvozeného přístupu pro ovlivněný průtok Q_{Svr_o} vystižený vztahem (7.3.3). Všechny tyto vztahy využívají neovlivněného průtoku stanoveného pro přeliv s pravouhlým výřezem a poměru úrovně hladiny dolní vody a horní vody.

Posouzení bylo provedeno pro hodnoty poměrů hladin $0,0 < h_{ds}/h_s \leq 0,9$, respektive $0,0 < h_{dt}/h_t \leq 0,9$, podmínky realizující se při vysokém stupni zatopení nebyly z tohoto pohledu posuzovány. Během posouzení byla nejprve stanovena hodnota součinitele zatopení K dle vztahů jednotlivých autorů (podkapitola 4.2.) a následně hodnota součinitele zatopení K_s a K_t dle námi zvoleného přístupu (podkapitola 7.3.). Pro výpočet neovlivněného průtoku Q_{Svr_n} bylo využito vztahu (2.3.2) stanoveného v rámci bakalářské práce [1]. Za pomoci hodnot součinitelů zatopení K a hodnot neovlivněných průtoků Q_{Svr_n} bylo dále možné stanovit hodnotu ovlivněného průtoku Q_{Svr_o} dle vztahů uvedených v podkapitole 4.2. a dle vztahu (7.3.3).

Na grafu 8 je možné sledovat relativní odchylky mezi průtoky vypočtenými dle vztahu:

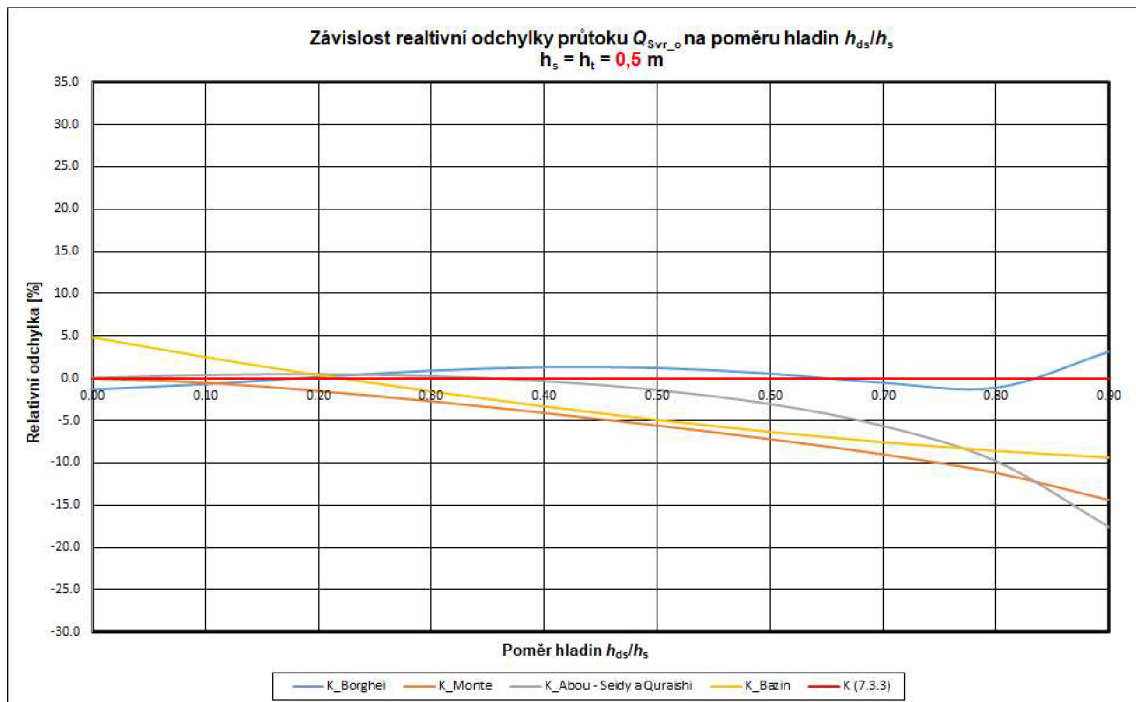
$$\Delta = \frac{(Q_{\text{autor}} - Q_{\text{DP}})}{Q_{\text{DP}}} 100, \quad (7.6.1)$$

kde Q_{autor} je průtok stanovený dle vztahu příslušného autora (podkapitola 4.2.) a Q_{DP} je průtok stanovený dle vztahu (7.3.3).

Z grafu 8 tak vyplývá, že při použití vztahu podle Borghei (4.2.7) vychází hodnoty relativních odchylek příznivě (do 3 %), lze říci, že hodnoty průtoků stanovené dle tohoto vztahu nejvíce odpovídají hodnotám průtoků určených dle námi zvoleného přístupu (7.3.3). Využití vztahu Borghei (4.2.7) by tak bylo vhodným řešením pro stanovení průtoku při ovlivnění přepadového jevu úrovní hladiny dolní vody a je doporučitelné ho v podobných situacích využít.

Při využití vztahů podle Ville Monte (4.2.4) a Abou-Seidy a Quraishi (4.2.5) je možné na grafu 8 sledovat, že relativní odchylky výše zmíněných průtoků přesahují hodnotu 10 %. Zatímco při využití vztahu dle Bazin (4.2.2) nepřesahují odchylky výše zmíněných průtoků hodnotu 10 %.

Využití vzorců Ville Monte (4.2.4), Abou-Seidy a Quraishi (4.2.5) a Bazin (4.2.2) by se tak dalo zhodnotit z hlediska výsledků uspokojivě.

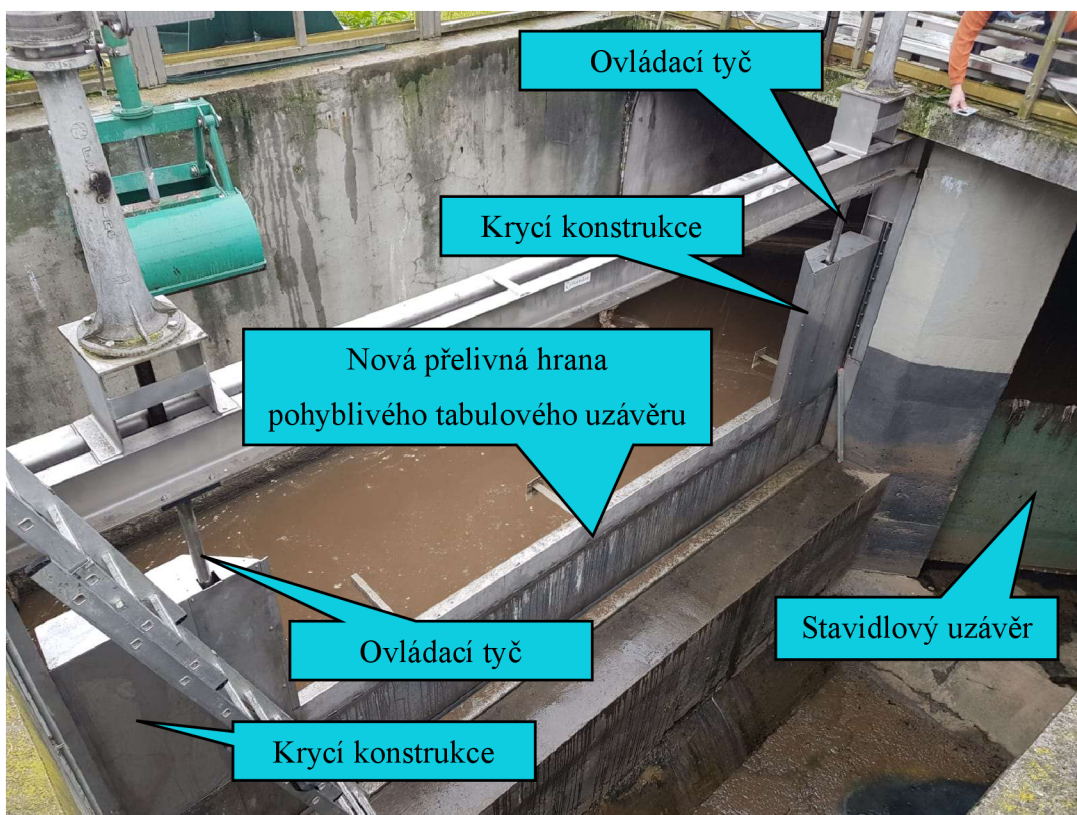


Graf 8) Odchytky hodnot ovlivněných průtoků Q_{Svr_o} stanovených jednotlivými autory od hodnot námi zvoleného přístupu (7.3.3)

8. REALIZACE VÝSLEDKŮ IN-SITU

V rámci uplatnění námi dosažených výsledků in situ byla zprvu do prostoru SK ČOV mezi ovládací tyče tabulového uzávěru instalována nová přelivná hrana (obr. 31), jež je podrobněji popsána v rámci podkapitoly 2.3.

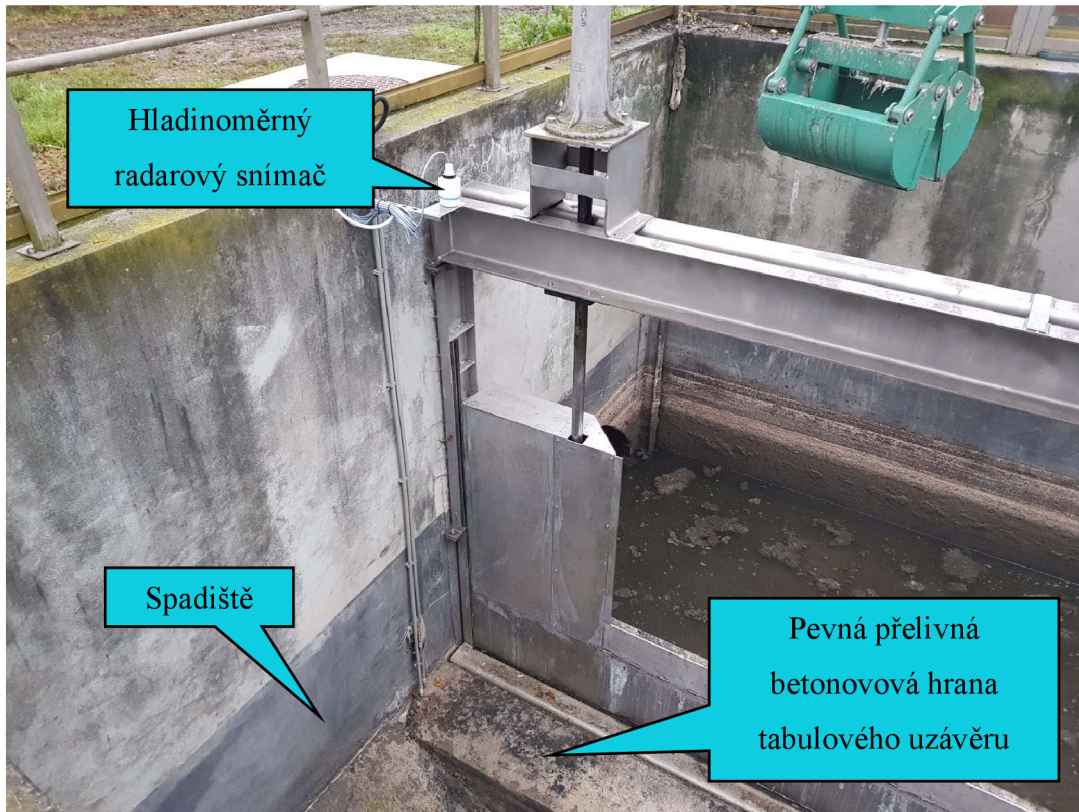
V prostoru SK ČOV byl dále umístěn hlavní snímač sloužící pro měření přepadové výšky h_s protiproudě před předmětnými přelivy, jehož umístění je vyznačeno na obr. 5. Vhodné umístění tohoto snímače bylo nalezeno již v rámci bakalářské práce [1] během prvních experimentálních prací s různým nastavením ovlivňujících prvků jimiž jsou např. odlišné průtoky, polohy stavidla na vtoku do ČOV a změna výškové odlehlosti Z .



Obr. 31) Pohled do prostoru SK ČOV

Na obr. 32 a obr. 33 můžeme pozorovat umístění nového hladinoměrného radarového snímače sloužícího pro měření svislé odlehlosti mezi úrovní hladiny dolní vody v prostoru spadiště a kótou přelivné hrany stavidlového uzávěru ($\pm 0,000$). Jedná se o hodnotu h_d , a platí zde, že hodnota svislé odlehlosti pro pevné stavidlo h_{ds} je dána vztahem (7.2.1). Půdorysně se tento snímač nachází cca 0,30 m od svislé stěny SK ČOV

symetricky nad pevnou betonovou přelivnou hranou tabulového uzávěru tak, jak bylo doporučeno z výsledků měření na fyzikálním modelu.



Obr. 32) Pohled na instalaci nového snímače pro měření úrovně hladiny dolní vody h_d poproudě za předmětnými přelivy v prostoru spadiště



Obr. 33) *Detail instalace nového hladinoměrného snímače*

Na obr. 34 můžeme sledovat umístění druhého nového hladinoměrného snímače nad odraznou deskou instalovanou na tělese tabulového uzávěru pro měření jeho výškové odlehlosti Z . Umístění tohoto snímače je taktéž vyznačeno na obr. 5. Za pomoci změřené výškové odlehlosti Z a přepadové výšky h_s je následně možné stanovit přepadovou výšku h_t ve smyslu vztahu (2.3.1) a také úroveň hladiny dolní vody h_{dt} ze vztahu (7.2.2) realizujících se na přelivné hraně pohyblivého tabulového uzávěru.

Referenční výškovou úrovní je pro všechny výše zmíněné snímače úroveň hrany stavidlového uzávěru ($\pm 0,000$).



Obr. 34) Pohled na instalaci nového snímače pro měření výškové odlehlosti Z přelivné hrany pohyblivého tabulového uzávěru

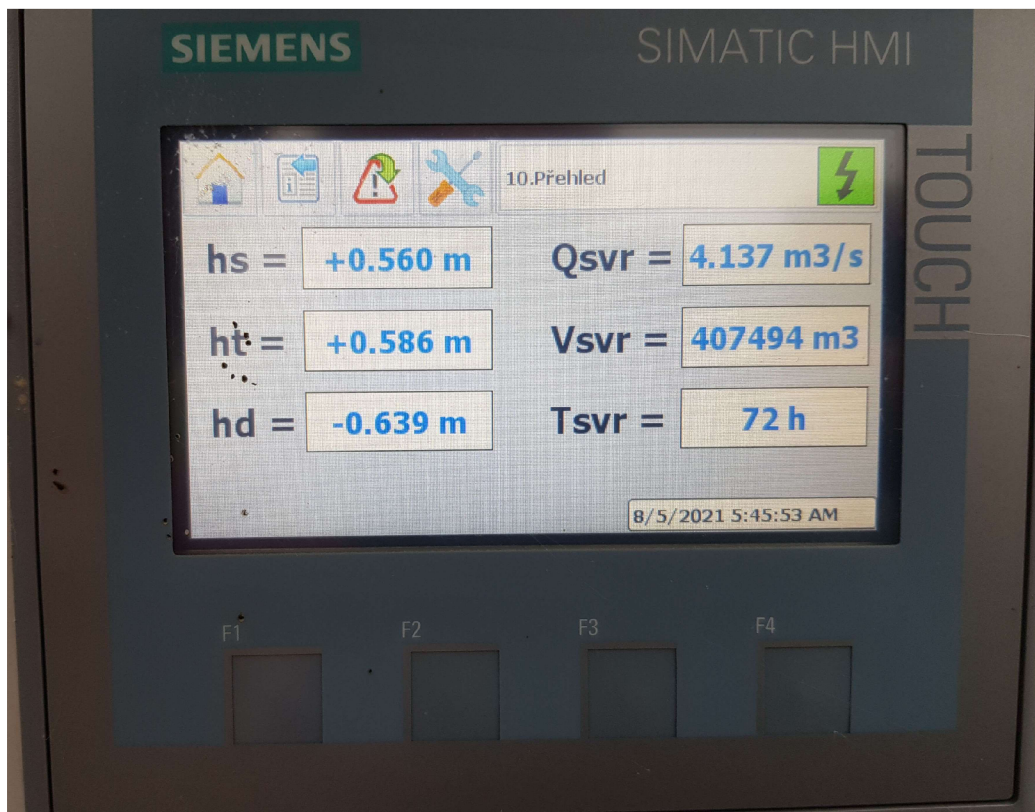
K výše uvedeným snímačům patří i s nimi propojená příslušná vyhodnocovací jednotka sloužící k příjmu, zpracování a vyhodnocení změřené hodnoty výškové odlehlosti Z , přepadové výšky h_s a úrovně hladiny dolní vody h_d za pomoci kterých je následně dle postupu vývojového diagramu (obr. 30) stanoven odpovídající průtok odlehčovaných vod do řeky Svratky Q_{Svr} .

Na obr. 36 je možné sledovat výsledné hodnoty stanovené na základě vztahů uvedených v (obr. 30).

Pro potřeby realizace a v rámci programování celého měřicího systému bylo součástí předložené diplomové práce sestavení vývojového diagramu v programu Microsoft Word a jeho naprogramování za využití programu Microsoft Excel. Tento program byl použit při verifikaci software vyhodnocovací jednotky a současně je velmi dobře použitelný při provádění tzv. posouzení funkční způsobilosti měřicího systému.



Obr. 35) Přebád vody přes pohyblivý tabulový uzávěr a pevné stavidlo



Obr. 36) Displej vyhodnocovací jednotky s výstupními hodnotami

9. ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala měřením Q/h charakteristiky kombinovaného přelivu v podmínkách ovlivnění přepadového jevu úrovní hladiny dolní vody. Veškerá měření probíhala na fyzikálním hydraulickém modelu, v délkovém měřítku M 1:10, stavidlové komory ČOV Brno – Modřice v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Práce se taktéž zabývala zpracováním veškerých naměřených hodnot a jejich výslednou analýzou.

Měřením na fyzikálním hydraulickém modelu došlo k rozšíření výzkumných prací provedených v rámci bakalářské práce, kde byl navržen zcela nový měřicí systém pro stanovení průtoku a proteklého množství odlehčovaných vod ze stavidlové komory ČOV za podmínek dokonalého přepadu, tedy bez ovlivnění úrovní hladiny dolní vody. Provedené experimenty v rámci předložené diplomové práce vedly ke stanovení průtoku a proteklého množství odlehčovaných vod ze stavidlové komory ČOV do řeky Svatky při ovlivnění přepadového jevu úrovní hladiny dolní vody.

V teoretické části předložené diplomové práce byl popsán stávající stav stavidlové komory ČOV, výstupy z bakalářské práce, způsoby měření proteklého množství, typy měřicích systémů a jednotlivé druhy snímačů včetně vyhodnocovacích jednotek s nimi propojených. Teoretická část diplomové práce byla důležitým podkladem pro pochopení navazující části praktické.

V praktické části je popsán fyzikální model stavidlové komory ČOV, hydraulický okruh, na který byl model napojen, použitá měřicí technika a problematika modelové podobnosti. Dále je popsán postup měření, zpracování naměřených hodnot a dosažené výsledky experimentálních prací na modelu. Na základě výsledné analýzy naměřených hodnot byl dále sestaven vývojový diagram, jenž popisuje postup stanovení průtoku odlehčovaných vod do řeky Svatky, a to i v případě zatopení přelivných hran hladinou dolní vody od řeky Svatky. V závěru praktické části je popsáno porovnání dosažených výsledků s přístupy jiných autorů a realizace výsledků in-situ.

Za pomoci dosažených výsledků tak byl realizován nový měřicí systém průtoku a proteklého množství založený na postupu popsáném ve vývojovém diagramu. Experimentální práce je tak možné považovat za vydařené a plně prakticky využitě.

10. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. **ŠKRANCOVÁ, Markéta.** Stanovení Q/h charakteristiky odlehčovací komory. *Bakalářská práce.* Brno : Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. MICHAL ŽOUŽELA, Ph.D., 2020.
2. **ŽOUŽELA, Michal, Markéta Škrancová, Jiří Ježek.** Stanovení množství odlehčovaných odpadních vod do řeky Svratky využitím přelivů stavidlové komory na přítoku do ČOV Brno-Modřice. *SOVAK. 9/ 2020.* stránky 14-20.
3. **ŽOUŽELA, Michal.** :*Stanovení Q/h charakteristiky přelivů stavidlové komory a návrh vzdouvacího prahu v prostoru výustního objektu odlehčovací stoky na ČOV-Modřice (fyzikální modelový výzkum).* Výzkumná zpráva. Brno : LVV-FAST-VUT v Brně, 2019.
4. **ŽOUŽELA, Michal.** Měřicí systémy proteklého množství vody užívané v profilech s volnou hladinou. *Metrologie.* 3 2008. stránky 10-16.
5. **TNV 25 9305.** *Měřicí systémy proteklého objemu vody v profilech s volnou hladinou.* Praha : HYDROPROJEKT CZ a.s., 2012.
6. **JANDORA, Jan a Jan ŠULC.** *Hydraulika: modul 01.* Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 978-80-7204-512-9.
7. **BOOR, Boris, Cyril PATOČKA a Jiří KUNŠTÁTSKÝ.** *Hydraulika pro vodohospodářské stavby.* Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1968.
8. **KOLÁŘ Václav, Jan Smetana, Václav Eliáš, Jaroslav Hrbek, Dagmar Kafková, Alexander Puzanov, Miroslav Rudiš, Radoš Smutek a Jan Švec.** *Hydraulika.* Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1966.
9. **Detlef, AIGNER.** *Wasserbauliches Versuchswesen.* Dresden : Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, 2000.
10. **VILLE, MONTE.** *Submerged thin plate weirs with unequal upstream and downstream beds.* místo neznámé : The University of Waikato, 2006.
11. **Franke, P.-G.** *Abfluß über Wehre und Überfälle.* Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin : autor neznámý, 1982. ISBN 3-7625-2052-6.
12. **nivus.de. Produkte.** [Online] [Citace: 5. 6 2021.] <https://www.nivus.de/de/produkte/fuellstandsmessung/hydrostatische-fuellstandsmessung/sensoren-1/nivubar-h-iii/>.
13. **nivus.com. Products.** [Online] [Citace: 16. 8 2021.] <https://www.nivus.com/en/products/>.
14. **JANDORA, Jan.** *Vodohospodářské stavby: Modul 01 Základy hydrauliky.* 2004.

15. **FEJFAROVÁ, Marie.** Stanovení průtoku ostrohranným přelivem typu V za podmínek ovlivnění úrovní hladiny dolní vody. *Diplomová práce.* Brno : Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. MICHAL ŽOUŽELA, Ph.D, 2010.

11. SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

SEZNAM SYMBOLŮ:

Označení	Popis
A, B, C, D	Regresní koeficienty (-)
B	Šířka obdélníkového žlabu před přelivem (m)
b	Šířka přelivné hrany (m)
C_d	Průtokový koeficient (-)
Fr	Froudovo číslo (-)
g	Gravitační tíhové zrychlení ($m \cdot s^{-2}$)
h	Výška přepadového paprsku (m)
h_z	Úroveň hladiny dolní vody (m)
h_t	Přepadová výška na hraně tabulového uzávěru (m)
h_{dt}	Úroveň hladiny dolní vody na přelivné hraně pohyblivého tabulového uzávěru (m)
h_s	Přepadová výška na hraně pevného stavidla (m)
h_{ds}	Úroveň hladiny dolní vody na přelivné hraně pevného stavidla (m)
h_d	Úroveň hladiny dolní vody (m)
H	Hloubka proudu (m)
K, K_z	Součinitel zatopení (-)
K_s	Součinitel zatopení pevného stavidla (-)
K_t	Součinitel zatopení pohyblivého tabulového uzávěru (-)
K_{reg}	Regresní součinitel zatopení (-)
K_{spol}	Společný součinitel zatopení pevného stavidla a pohyblivého tabulového uzávěru (-)

K_{spol_s}	Společný součinitel zatopení pevného stavidla a pohyblivého tabulového uzávěru vztažený k přelivné hraně pevného stavidla (-)
K_{spol_t}	Společný součinitel zatopení pevného stavidla a pohyblivého tabulového uzávěru vztažený k přelivné hraně pohyblivého tabulového uzávěru (-)
k	Kalibrační součinitel (-)
L	Délka přelivné hrany (m)
l_s	Délka vztažená na dílo (m)
l_m	Délka vztažená na model (m)
m	Bazinův přepadový součinitel (-)
m_t	Součinitel přelivu s výřezem ve tvaru V (-)
$M 1:10$	Model v délkovém měřítku 1:10 (-)
n	Počet měření
Q	Průtok ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
$Q_{\text{př}}$	Průtok přitékající do modelu ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
$Q_{\text{čOV}}$	Průtok přitékající do technologické linky ČOV ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
Q_{Svr}	Průtok odlehčovaný do řeky Svatky ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
Q_{Svr_n}, Q_m	Průtok odlehčovaný do řeky Svatky neovlivněný úrovní hladiny dolní vody ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
$Q_{\text{Svr}_o}, Q_{\text{DP}}, Q_{\text{autor}}$	Průtok odlehčovaný do řeky Svatky ovlivněný úrovní hladiny dolní vody ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
Q_m	Průtok vztažený na model ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
Q_s	Průtok vztažený na dílo ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Q_s	Průtok přepadající přes pevné stavidlo neovlivněný úrovní hladiny dolní vody ($m^3 \cdot s^{-1}$)
Q_{so}	Průtok přepadající přes pevné stavidlo ovlivněný úrovní hladiny dolní vody ($m^3 \cdot s^{-1}$)
Q_t	Průtok přepadající přes tabulový uzávěr neovlivněný úrovní hladiny dolní vody ($m^3 \cdot s^{-1}$)
Q_{to}	Průtok přepadající přes tabulový uzávěr ovlivněný úrovní hladiny dolní vody ($m^3 \cdot s^{-1}$)
Q_{sum}	Součet průtoků Q_s a Q_t ($m^3 \cdot s^{-1}$)
S	Průtočná plocha (m^2)
S_1	Odlehlost přelivné hrany od dolního dna (m)
u	Rychlost vykazovaná snímačem ($m \cdot s^{-1}$)
v	Průřezová rychlost ($m \cdot s^{-1}$)
v_s	Průřezová rychlost vztažená na dílo ($m \cdot s^{-1}$)
v_m	Průřezová rychlost vztažená na model ($m \cdot s^{-1}$)
Δ	Relativní odchylka průtoků (%)
μ	Součinitel přepadu (-)
α	Vrcholový úhel výřezu ($^\circ$)
$\omega, \kappa, \lambda, \chi, \phi, \rho$	Optimalizované parametry (-)
Z	Svislá odlehlost mezi přelivnými hranami (m)
β	Poměr mezi hladinou dolní a horní vody (-)
β, γ	Korekční parametry (-)

SEZNAM ZKRATEK:

SK	Stavidlová komora
ČOV	Čistírna odpadních vod
OV	Odpadní vody

ČS	Čerpací stanice
LVV	Laboratoř vodohospodářského výzkumu
DN	Dešťová nádrž
DN 100, DN 150, DN 200	Jmenovitá světlost potrubí
BVK, a.s.	Brněnské vodárny a kanalizace, a.s.

12. SEZNAM PŘÍLOH

- P1 Vývojový diagram – Bakalářská práce
- P2 Vývojový diagram – Diplomová práce