

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
ODLEHČOVACÍ KOMORY**

DETERMINATION OF THE Q/H CHARACTERISTIC OF STORM WATER OVERFLOW
CHAMBER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

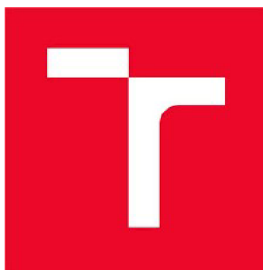
Markéta Škrancová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL ŽOUŽELA, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Markéta Škrancová
Název	Stanovení Q/h charakteristiky odlehčovací komory
Vedoucí práce	Ing. Michal Žoužela, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	24. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

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, 2018

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 bakalářské práce bude na hydraulickém modelu odlehčovací komory stanovena příslušná Q/h charakteristika.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ 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 bakalářské práce

ABSTRAKT

Hlavním úkolem této bakalářské práce je stanovení Q/h charakteristiky stavidlové komory čistírny odpadních vod na fyzikálním hydraulickém modelu, následné zpracování všech naměřených hodnot a jejich výsledná analýza. Všechna měření byla provedena autorem této práce v prostorách Laboratoře vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Výsledkem bakalářské práce je matematický vztah sloužící pro stanovení okamžitého průtoku, jenž bude zadán do vyhodnocovací jednotky nově vybudovaného měřicího systému. Ten bude umístěn v prostoru stavidlové komory čistírny odpadních vod a bude sloužit pro měření průtoku a proteklého množství odlehčovaných vod do řeky Svatky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Q/h charakteristika, měrné přelivy, měření v profilu s volnou hladinou, fyzikální hydraulický model, měřicí systém

ABSTRACT

The main task of this bachelor thesis is to determination the Q / h characteristics of the sluice chamber in the wastewater treatment plant on a physical hydraulic model, processing of all measured values and their analysis. All measurements were performed by the author of this work in the premises of the Laboratory of Water Management Research of the Institute of Water Structures of the Faculty of Civil Engineering of the Brno University of Technology. The result of the bachelor thesis is an equation used to determine the immediate flow which will be entered into to evaluation unit of the newly built measuring system. It will be located in the sluice chamber of the wastewater treatment plant and will be used to measure the flow and flowed amount of overflow water into the Svatka River.

KEYWORDS

Q/h characteristic, measuring weir, streamflow measurement, physical hydraulic model, measuring system

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Markéta Škrancová *Stanovení Q/h charakteristiky odlehčovací komory*. Brno, 2020. 62 s., 6 s. příl. Bakalářská 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 bakalářské práce s názvem *Stanovení Q/h charakteristiky odlehčovací komory* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 24. 5. 2020

Markéta Škrancová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Stanovení Q/h charakteristiky odlehčovací komory* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2020

Markéta Škrancová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Žouželovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, důležité připomínky, vstřícnost a trpělivost během našich konzultací, které mi výrazně napomohly ke zpracování této bakalářské práce.

Obsah

1. ÚVOD	10
2. PROUDĚNÍ KAPALIN V OTEVŘENÝCH KORYTECH	11
2.1. Proudění laminární a turbulentní.....	11
2.2. Proudění kritické, říční a bystrinné	12
2.3. Přechody jednotlivých druhů proudění	14
3. MĚŘICÍ SYSTÉMY PROTEKLÉHO MNOŽSTVÍ VODY V PROFILECH S VOLNOU HLADINOU	15
3.1. Systémy využívající metodu Q/h charakteristiky	15
3.1.1. Měrné přelivy.....	16
3.1.2. Měrné žlaby	19
3.2. Měřicí systémy využívající kontinuální metodu.....	19
4. PROCESNÍ INSTRUMENTACE UŽÍVANÁ V OBLASTI MĚŘENÍ PRŮTOKU V PROFILECH S VOLNOU HLADINOU	21
4.1. Měření úrovně hladiny	21
4.1.1. Kontaktní snímače	21
4.1.2. Bezkontaktní snímače	22
4.2. Měření rychlosti proudu.....	22
4.3. Vyhodnocovací jednotky	23
5. MOTIVACE A CÍL PRÁCE.....	24
6. POPIS STÁVAJÍCÍHO STAVU V PROSTORU SK ČOV.....	25
6.1. Stavebně-konstrukční řešení	25
6.2. Průtokové poměry SK ČOV.....	26
7. NÁVRH MĚŘICÍHO SYSTÉMU.....	27
7.1. Přelivy v prostoru SK ČOV	27
8. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	29
8.1. Fyzikální model, hydraulický okruh, měřicí technika a modelová podobnost	29
8.1.1. Fyzikální model	29
8.1.2. Hydraulický okruh	35
8.1.3. Měřicí technika	35
8.1.4. Zákony modelové podobnosti.....	37
8.2. Postup měření.....	39
8.3. Zpracování naměřených hodnot.....	40
8.4. Proložení bodů Q/h charakteristiky.....	41

8.5.	Výsledky experimentálních prací na modelu	43
8.5.1.	Experimentální stanovení vlivu míry otevření stavidla na tvar a průběh Q/h charakteristiky přelivů	44
8.5.2.	Nalezení náhradní Q_{SvT}/h_s charakteristiky v souvislosti s experimentálně získanými daty	45
8.5.3.	Experimentální stanovení Q_s/h_s charakteristiky pevného stavidla.....	46
8.5.4.	Experimentální stanovení Q_t/h_t charakteristiky pohyblivého tabulového uzávěru	48
8.5.5.	Experimentální stanovení souhrnné Q_{SvT}/h_s charakteristiky	51
9.	DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ MOŽNÉ ZKOUŠKY	55
10.	ZÁVĚR	56
11.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	58
12.	SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	59
13.	SEZNAM PŘÍLOH	62

1. ÚVOD

Tato bakalářská práce vznikla v souvislosti se změnou zákona č. 254/2001 Sb. o vodách, který předepisuje povinnost měřit množství a kvalitu vypouštěných odpadních vod odlehčovaných před čistírnou odpadních vod do recipientu za účelem jejich zpoplatnění. Změnou tohoto zákona jsou nuceny veškeré vodárenské společnosti v České republice nastalou změnu řešit. Jednou z těchto společností jsou i Brněnské vodárny a kanalizace, a.s. (BVK), kde se tato povinnost týká tzv. stavidlové komory čistírny odpadních vod (SK ČOV), která se nachází před nátokem do ČOV Brno-Modřice.

Pracovníci BVK se tak rozhodli zajistit požadavek na měření průtoku a proteklého množství odlehčovaných odpadních vod ze SK ČOV do řeky Svratky za pomoci trvale instalovaného měřicího systému.

Následně bylo rozhodnuto, že se bude jednat o měřicí systém využívající Q/h charakteristiku přelivných hran v prostoru SK ČOV.

Předložená práce se konkrétně zabývá měřením Q/h charakteristik na fyzikálním hydraulickém modelu v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební, zpracováním všech naměřených hodnot a jejich výslednou analýzou.

Práce je rozdělena do 13 kapitol. První částí práce je část teoretická, související s nastíněním problematiky o proudění a měření průtoků v profilech s volnou hladinou. Další částí je část praktická, ve které jsou popsány jednotlivá měření včetně jejich zpracování a výsledné analýzy.

V závěru práce se nachází doporučení pro případné další zkoušky a přílohová část obsahující grafické výstupy.

2. PROUDĚNÍ KAPALIN V OTEVŘENÝCH KORYTECH

V následující kapitole jsou dle [1] popsány druhy a typy proudění, které mohou nastat v otevřených korytech.

U proudění s volnou hladinou je povrch hladiny v přímém kontaktu s okolním ovzduším. Na hladinu tedy působí atmosférický tlak. Jedná se o proudění v otevřených průtočných profilech (koryta řek, kanály, žlaby, energetické a závlahové přivaděče), ale vyskytují se i v uzavřených profilech (kanalizační potrubí, propustky).

Proudění se obecně rozděluje na ustálené či neustálené. Při ustáleném proudění jsou hydraulické veličiny (průtok, průřezová rychlost a průtočná plocha) v čase konstantní. Závisí tedy pouze na poloze. Při neustáleném proudění jsou hydraulické veličiny funkcí času a polohy.

U ustáleného proudění rozlišujeme další dva typy proudění, tj. proudění rovnoměrné a nerovnoměrné. Při rovnoměrném proudění je konstantní průtok, ale také ostatní charakteristiky proudění a koryta (tvar, drsnost a sklon koryta, hloubka a rychlost proudění). U nerovnoměrného proudění je průtok konstantní v čase, ale ostatní parametry koryta a proudění mohou být po délce koryta proměnné.

Proudění ustálené rovnoměrné můžeme pozorovat na upravených tocích nebo umělých náhonech stálého příčného průřezu (příčného profilu) a konstantního sklonu dna koryta. Za tohoto proudění je hladina rovnoběžná se dnem koryta. K nerovnoměrnému ustálenému proudění dochází například v přirozených tocích, kde dochází ke vzniku vzedutí nebo snížení proudu – sklon dna tedy není rovnoběžný s hladinou, a sklon dna i hladiny nejsou konstantní.

2.1. Proudění laminární a turbulentní

Za pomoci experimentálních pokusů Reynolds dokázal, že existují dva základní režimy proudění – laminární a turbulentní. V případě laminárního (vrstevnatého) proudění jednotlivé částice procházejí v rovnoběžných drahách a navzájem se nemísí. Zatímco u turbulentního (vířnatého, neuspořádaného) proudění dochází k pohybu částic po

nepravidelných drahách, k jejich vzájemnému mísení a ke změně složek rychlosti a tlaku [1].

Proudění je možné charakterizovat Reynoldsovým kritériem:

$$Re = \frac{v D}{\nu}; \quad (2.1)$$

kde v je průřezová rychlost proudění, D je charakteristický rozměr proudu (u otevřených koryt zpravidla uvažujeme hydraulický poloměr R a ν je kinematická viskozita kapaliny. Prostřednictvím pokusů bylo zjištěno, že horní hranice laminárního pohybu je pro všechny tekutiny stejná a pro otevřená koryta tato hranice odpovídá $Re \approx 580$. Turbulentní pohyb lze uvažovat při hodnotě $Re > 3\,450$. Rozmezí mezi oběma hodnotami je tzv. přechodná oblast pohybu [1].

V reálném případě proudění o volné hladině se setkáváme prakticky výhradně s pohybem turbulentním [1].

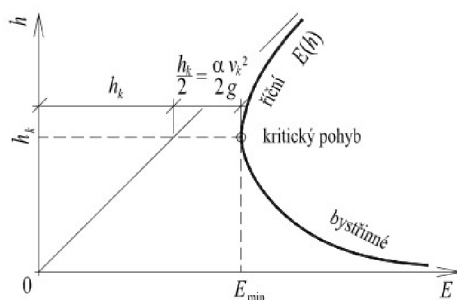
2.2. Proudění kritické, říční a bystrinné

Z pohledu měrné energie průřezu existují v profilech s otevřenou hladinou dva režimy proudění, na které je nutné brát ohled při výpočtu, zvláště při výpočtu průběhů hladin.

Pro konstantní průtok Q volíme v obecném řezu různé hloubky h v mezích od nuly po nekonečno a počítáme příslušné hodnoty energetické výšky průřezu E , které vyneseme do grafu (obr. 1), přičemž energetická výška průřezu E ve smyslu obr. 2 (měrná energie průřezu) je dle [1] definována:

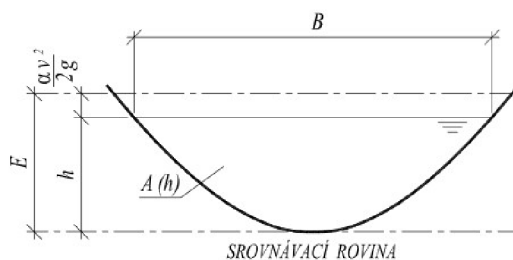
$$E = h + \frac{\alpha v^2}{2g} = h + \frac{\alpha Q^2}{2g S^2}; \quad (2.2)$$

kde h je hloubka vody nad nejnižším bodem dna, α Coriolisovo číslo, které vyjadřuje vliv nerovnoměrného rozdělení rychlosti po průřezu na celkovou energii, Q je průtok a S průtočná plocha.



Obr. 1) Energetická výška průřezu [2]

$$S = f(h). \quad (2.3)$$



Obr. 2) Měrná energie průřezu [2]

Přibližuje-li se h nebo S k nule, roste požadovaná rychlost k převedení daného Q nade všechnu mez. Jinými slovy E se přibližuje k nekonečnu. Křivka se asymptoticky přibližuje k vodorovné ose E (obr. 1). Za předpokladu rovnoměrného ustáleného proudění způsobí změna rychlosti změnu sklonu podle Chézyho rovnice:

$$Q = v S = S C \sqrt{R i}; \quad (2.4)$$

kde S je průtočná plocha, v je průřezová rychlost, C je Chézyho rychlostní součinitel, R je hydraulický poloměr, a i je podélný sklon čáry energie [1].

Narůstá-li h do nekonečna, přibližuje se rychlost nutná k převedení daného průtoku Q k nule a E se opět přibližuje k nekonečnu. Křivka se asymptoticky přibližuje k přímce $E = h$, půlicí úhel mezi oběma osami.

Poloha E_{\min} , které odpovídá příslušná hloubka h_k (kritická hloubka), má význam jak matematický, tak i fyzikální, protože měrná energie průřezu pro dané Q je při něm minimální. Hloubka h_k znázorňuje rozhraní mezi pohybem říčním (podkritickým) a bystřinným (nadkritickým), a také hloubku samostatného režimu proudění, tzv. proudění kritického. Lze tedy odvodit, že při $h > h_k$ jde o proudění říční (velká hloubka a malá rychlost) a při $h < h_k$ o proudění bystřinné (malá hloubka a velká rychlost) [1].

Kritický pohyb určíme podle obecné podmínky vycházející z [1]:

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{S_k^3}{B_k}; \quad (2.5)$$

kde S_k je průtočná plocha a B_k šířka koryta v hladině během kritického proudění. Dosadíme-li za $Q = v_k S_k$, dostaneme specifickou závislost kritického pohybu:

$$\frac{\alpha v_k^2}{2g} = \frac{S_k}{2B_k}. \quad (2.6)$$

Rychlostní výška kritického pohybu je rovna polovině průměrné hloubky h_s průtočného průřezu [1].

V mnoha případech je výhodnější pro určení druhu proudění použít charakteristiku, vyjádřenou bezrozměrným Froudovým kritériem, které je definováno výrazem:

$$Fr = \frac{\alpha v^2}{g h_s} = \frac{\alpha v B}{g S} = \frac{\alpha Q^2 B}{g S^3}; \quad (2.7)$$

kde v je průřezová rychlost, $h_s = S/B$ je střední hloubka průřezu, S je průtočná plocha a B je šířka v hladině. Dle hodnoty Fr [1] je určen pohyb:

- kritický $Fr = 1$;
- říční $Fr < 1$;
- bystřinný $Fr > 1$.

V přírodě se objevují oba typy proudění. V případě bystřinného však dochází ke vzniku zvláštních hydraulických jevů, které mohou komplikovat návrh koryta. Mezi takové jevy patří například vznik stojatých příčných vln, které jsou vyvolány každou změnou tvaru i směru koryta. Mezi velmi významné jevy patří například vodní skok [3].

2.3. Přechody jednotlivých druhů proudění

Přechod z říčního proudění do bystřinného je plynulý, kdežto přechod z bystřinného do říčního se děje nespojitě tzv. vodním skokem [1]. „Vodní skok je hydraulický jev, který vzniká během přechodu z pohybu bystřinného do říčního (za přepadem přes jez, při výtoku pod stavidlem nebo při změně sklonu dna koryta).“ [1] Vyznačuje se především náhlým zvýšením hloubky vody a snížením rychlosti. Vlivem vodního skoku dochází k přeměně kinetické energie na energii potenciální, za vzniku velkých energetických ztrát [1].

3. MĚŘICÍ SYSTÉMY PROTEKLÉHO MNOŽSTVÍ VODY V PROFILECH S VOLNOU HLADINOU

V následující kapitole jsou dle [1] [4] popsány dva nejpoužívanější způsoby stanovení průtoku a proteklých objemů v profilech s volnou hladinou trvale instalovanými měřicími systémy.

3.1. Systémy využívající metodu Q/h charakteristiky

Základem využití metody Q/h charakteristiky je přesné stanovení (pomocí kalibrace či dle vztahu z příslušné normy nebo literatury) závislosti průtočného množství na výšce přepadového paprsku h nebo hloubce vody H , která je měřena v předepsaném profilu měrného prvku, v okamžiku, kdy v blízkosti dochází k výskytu tzv. kritické hloubky h_k (kap. 2.2.).

Říční a bystřinné proudění je obecně charakterizováno v kap. 2.2.

Za předpokladu, že se nám podaří zrealizovat přechod z říčního proudění do proudění bystřinného, pak lze vzniklé proudové poměry vhodně využít pro jednoznačné stanovení aktuálního průtoku.

Jako nejčastěji používané technické způsoby realizace výše zmíněného jevu patří měrné přelivy a měrné žlaby. Z konstrukčního hlediska jde o velice variabilní stavební konstrukce vzdouvacího charakteru.

Zároveň je vhodné si povšimnout, že k vytvoření přechodu z říčního do bystřinného proudění je zapotřebí nemalé množství energie (spádu), která je v místě vzdouvacího prvku zmařena. V mnoha konkrétních případech může tento základní princip metody Q/h charakteristiky způsobit problémy během návrhu měřicího systému nebo přímo rozhodnout o nemožnosti využití zmíněné metody.

Nezaměňujme však metodu Q/h charakteristiky za tzv. metodu sklonu a plochy (výpočet podle Chézyho rovnice ve smyslu vztahu (2.4)) kdy je měřena pouze hloubka rovnoměrného ustáleného proudění v měrném profilu. V tomto případě je průtok nepřímo úměrný drsnosti omočeného obvodu, která bývá velmi často proměnná v čase.

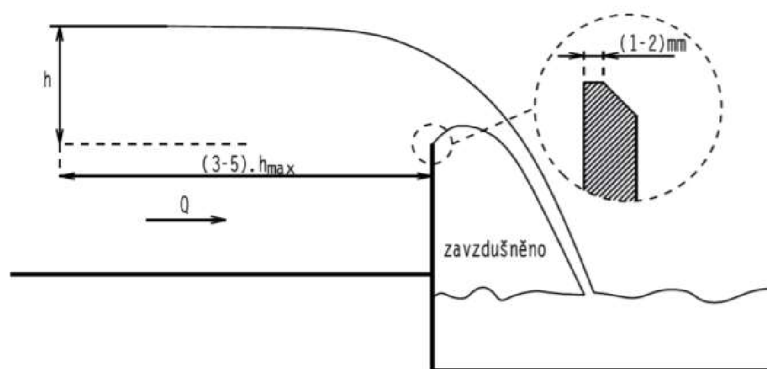
3.1.1. Měrné přelivy

Měření průtoku v profilech o volné hladině za pomoci přelivů je hojně využíváno zejména pro svoji jednoduchost a nízkou zranitelnost celého měřicího systému. Ten se ve smyslu obr. 3 skládá z vlastní tzv. vzdouvací konstrukce a také ze systému měření výšky přepadového paprsku h v jednoznačně definovaném měrném profilu (nejčastěji ve vzdálenosti tři až pěti násobku maximální přepadové výšky) metodami zmíněnými v [4]. Měřená výška přepadového paprsku h v [m] je přepočtena na průtok Q v [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] dle vztahu:

$$Q = A(h + C)^B + D ; \quad (3.1)$$

kde koeficienty A , B , C a D jsou závislé na geometrických a proudových podmínkách a také na použitém měrném přelivu. Lze je stanovit ve smyslu příslušné normy či literatury, za pomoci kalibrace v měrné trati laboratoře nebo přímo v místě instalace měřicího systému.

Běžně se měrné přelivy využívají k měření relativně čistých vod, u kterých nedochází v prostoru před vzdouvací konstrukcí k usazování sedimentů. Mezi nejvíce používané z celé škály možných typů přelivů patří přelivy ostrohranné. Ostrohranné přelivy jednoznačně definují místo odtržení přepadového paprsku, jak je tomu na obr. 3.



Obr. 3) Schéma ostrohranného přelivu [4]

Aby nedocházelo k výskytu dynamických pulzací, které jsou způsobeny rozdílným tlakem vzduchu nad a pod přepadajícím paprskem, je nutné zajistit zavzdušnění spodního líce přepadového paprsku pro jednoznačné a přesné stanovení průtoku.

Nejznámějšími ostrohrannými přelivy jsou:

- Přeliv s pravoúhlým výřezem

Jedná se o jeden ze základních typů měrných přelivů, též označovaný jako přeliv Bazinův. Pro stanovení přepadového množství přes přeliv Bazin odvodil rovnici, která se též používá pro výpočet dalších typů přelivů v definovaných podmínkách na přítoku:

$$Q = m b \sqrt{2g} h^{\frac{3}{2}}; \quad (3.2)$$

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

Pro Bazinův součinitel přepadu m pak platí:

$$m = \left(0,405 + \frac{0,003}{h}\right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{h + s_1}\right)^2\right]; \quad (3.3)$$

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

V platnost pak přichází pro rozmezí:

- $0,1 \text{ m} < h < 1,24 \text{ m}$;
- $0,2 \text{ m} < b < 2,00 \text{ m}$;
- $0,2 \text{ m} < s_1 < 2,00 \text{ m}$.

Ze stavebního hlediska se jedná o jednoduchou konstrukci instalovanou v příslušném měrném profilu napříč korytem. Provedení je možné vidět na obr. 4.



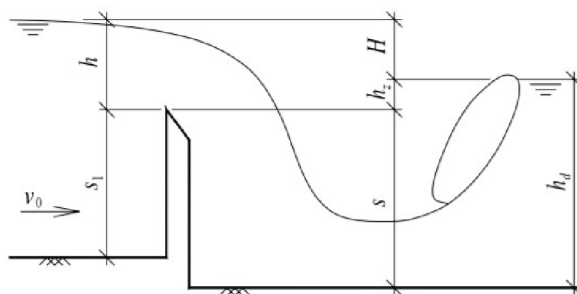
Obr. 4) Přeliv s pravouhlejším výřezem s bočním zúžením [4]

Na obr. 4 je zobrazena verze s tzv. bočním zúžením, které je prováděno zejména v (5 – 10) % rozsahu celkové šířky přítokového kanálu. Pomocí této úpravy dochází k požadovanému zavzdušnění spodního lince přepadového paprsku.

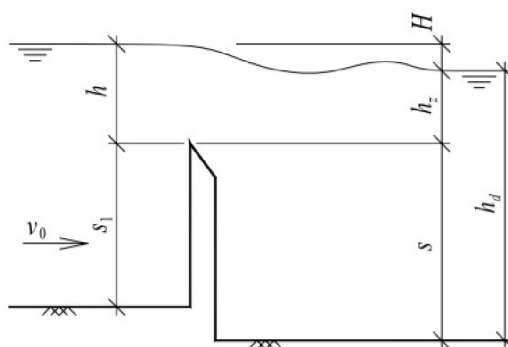
Mezi dále velmi známé přelivy patří:

- Přeliv s lichoběžníkovým výřezem – též označován jako přeliv typu Cipoletti.
- Přeliv s výřezem ve tvaru V – vhodný pro přesné měření značně rozkolísaných průtoků.
- Přelivy speciální složené – těchto speciálních přelivů využívají například správci povodí, kteří monitorují extrémně rozkolísané průsaky drenážními systémy přehradních děl.
- Jiné přelivy – jedná se o přelivy s kruhovou, parabolickou či jinak zakřivenou přelivnou hranou.

Volba typu přelivu je závislá především na geometrických a proudových poměrech v místě instalace, variačním rozsahu měřených průtoků a požadované přesnosti. Při využití měrných přelivů je doporučeno vyvarovat se okamžiku, kdy dochází k ovlivnění průtoku hladinou dolní vody. Tj. případy, kdy dochází ke vzniku tzv. nedokonalého přepadu a také ke snížení kapacity přelivu při konstantní přepadové výšce. Obecně může k takovému jevu docházet v okamžiku, kdy hladina dolní vody sahá po nejnižší úroveň výřezu příslušné přelivné konstrukce. Během nedokonalého přepadu klesá i celková přesnost měřicího systému.



Obr. 5) Dokonalý přepad [1]



Obr. 6) Nedokonalý přepad [1]

Jako materiál se pro měrné přelivy zpravidla používá nerezový ocelový plech, který je zakotven do betonových stěn kanálu v místě měrného profilu. U některých případů lze použít i plastické hmoty.

3.1.2. Měrné žlaby

Zásadním rozdílem žlabů a měrných přelivů je, že nedochází k omezení průtoku vody u dna v místě vlastního měrného žlabu. Podmínky ke vzniku kritické hloubky jsou pak vytvářeny zúžením po výšce žlabu, realizací tzv. hrdla.

Oproti měrným přelivům je při využití žlabových vestaveb hlavní výhodou propustnost pevných či plovoucích částic. Čímž je umožněno využití i pro relativně znečištěné odpadní vody. Mezi další výhody žlabů patří vyšší „průtočnost“ a tedy i nižší citlivost na změny měřených průtoků. V některých případech jsou využívány i pro měření v ovlivněných proudových poměrech, tj. když hladina dolní vody dosahuje úrovně kritické hloubky realizující se v prostoru hrdla žlabu a tím je ovlivněn průtok žlabem. Při těchto podmínkách je stanovení průtoku složitější.

Za pomoci měření příslušné hloubky proudu H , zpravidla protiproudě před měrných žlabem, je analogicky možné dle vztahu (3.1) stanovit průtok Q .

Mezi nejvíce používané měrné žlaby v ČR patří:

- žlab typu Parshall – je tvořen obdélníkovým průtočným průřezem a jeho šířka i tvar dna jsou poproudě proměnné. Hlavním výrobním materiálem je polypropylen (pro menší žlaby) a beton (pro žlaby větších rozměrů).
- žlab typu Venturi – má obdélníkový či lichoběžníkový tvar hrdla, jeho dno je vodorovné případně v mírném sklonu. Jako materiál je využívána ocel (pro menší žlaby) a beton (pro žlaby větších rozměrů).

3.2. Měřicí systémy využívající kontinuální metodu

Někdy je tato metoda nazývána metodou plocha \times rychlost a z důvodu její zdánlivé jednoduchosti patří mezi oblíbené metody.

Principem této metody je měření dvou nezávislých veličin, a to rychlosti u a hloubky H . Za pomoci známých rozměrů měrného profilu je určena plocha průtočného průřezu S . Přenásobením stanovené průtočné plochy průřezovou rychlostí v , kterou lze získat kalibrací z rychlosti vykazované rychlostní snímačem u je možné získat hledaný průtok dle vztahu:

$$Q = k u S = v S; \quad (3.4)$$

kde k je kalibrační součinitel, který zahrnuje rozdíly mezi průřezovou rychlostí a rychlostí vykazovanou rychlostním snímačem.

Metoda je využívána především v měrných profilech, kde by byla výstavba vzdouvacích prvků investičně nákladná (velikost) či stavebně komplikovaná a také pro relativně znečištěnou vodu. Při využití této metody nedochází ke ztrátám spádu, což může být také rozhodujícím faktorem. Metodu je možné také využít do ovlivněných proudových poměrů, kdy například v měrném profilu situovaném v blízkosti vyústění do vodního toku dochází k ovlivnění proudění zpětným vzdutím od hladiny realizující se za zvýšených stavů ve vodním toku.



Obr. 7) *Princip kontinuční metody s odděleným hladinoměrným a rychlostním snímačem, instalovaným ve stěně či dně kanálu [4]*

Bližší informace ke všem výše zmíněným měřicím systémům lze nalézt v článku [4].

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

V následující kapitole jsou ve smyslu [4] popsány základní vlastnosti snímačů, které se používají v rámci kontinuálního měření parametrů proudu během aplikace výše zmíněných metod a také vyhodnocovací jednotky propojené s těmito snímači.

4.1. Měření úrovně hladiny

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

4.1.1. Kontaktní snímače

Jedná se o snímače, které jsou umístěny přímo do pozorovaného proudu. Mezi nejvíce používané patří například membránové piezometrické snímače, které je možné využít i do mírně znečištěných odpadních vod. Čidlo je třeba umisťovat tak, aby nedocházelo k ovlivnění proudových poměrů, k sedimentaci částic a v případě variačního rozpětí hloubek měřicího systému k jejich vynoření. Tento typ čidel je často integrován ve snímači pro měření rychlosti a tím tvoří kombinovanou sondu, kterou lze využívat pro kontinuální metodu měření. Tyto snímače nejsou citlivé na výskyt pěny na hladině, což je oproti celé řadě bezkontaktních snímačů jejich velkou výhodou.



Obr. 8) *Piezometrický snímač [4]*

V případě bystrinného proudění mohou tyto snímače selhávat, poněvadž dochází k ovlivnění vykazovaných hodnot dynamickým účinkem proudu. Pro kontaktní měření průtoku lze využít ultrazvukového principu, kdy je snímač umístěný na dně v místě měrného profilu anebo na plovoucím pontonu (při výskytu dnového sedimentu). V takovém případě je měřena vzdálenost směrem od hladiny k sedimentu nikoliv ke dnu.

4.1.2. Bezkontaktní snímače

Mezi nejvíce používaný patří systém založený na ultrazvukovém principu. Značnou výhodou bezkontaktního měření je snadná instalace a neovlivnění proudových poměrů vlivem samotného snímače. Nevýhodou těchto snímačů je možné zkreslení vykazované měřené hodnoty při výskytu pěny na hladině.



Obr. 9) Ultrazvukový snímač instalovaný před měrným žlabem typu Parshall [4]

4.2. Měření rychlosti proudu

Měření rychlosti je zpravidla realizováno především kontaktními metodami. Za pomoci těchto metod je možné stanovit „bodové“ rychlosti určené z jistého měrného objemu v blízkosti snímače nebo svislicové rychlosti či rychlosti v horizontálních rovinách měrného průřezu. Tyto snímače pracují na ultrazvukovém či indukčním principu. Pro upřesnění během aplikace kontinuální metody se využívání kombinace více sond (obr. 7) někdy lze využít i odlišných měřicích principů. Snímače jsou vyráběny v podobě, kdy jsou určeny pouze pro měření rychlosti, přičemž je za pomoci snímačů zmíněných v kapitole 4.1. nebo ultrazvukového snímače měřena hloubka.



Obr. 10) Ultrazvukový rychlostní senzor s integrovaným ultrazvukovým měřením hloubky proudu [4]

4.3. Vyhodnocovací jednotky

Jedná se o jednotky propojené s výše zmíněnými snímači, sloužící ke zpracování (příjmu, vyhodnocení atd.) výstupního signálu a následně 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, ploše průtočného průřezu a také hodnota stanoveného průtoku. Z okamžitých hodnot průtoku je stanovena hodnota proteklého objemu (časovou integrací). U moderních jednotek jsou zobrazovány provozní hodiny a také je zajištěna archivace proteklého objemu i průtoku obvykle v průměrných hodnotách za (5 – 60) min.

V případě využití vyhodnocovací jednotky u metody Q/h charakteristiky je hlavním cílem ze správně změřené hodnoty stanovit odpovídající průtok. Ve vyhodnocovací jednotce je uložena funkční závislost ve tvaru vztahu (3.1).

V případě jednotek využívaných u kontinuální metody jsou jednotky vybaveny protokolem pro zadání tvaru průtočného průřezu ve funkční závislosti na hloubce proudu. Dále by též měly být vybaveny možností zadání kalibrační konstanty dle vztahu (3.4).



Obr. 11) Příklad vyhodnocovací jednotky užívané u metody Q/h charakteristiky [4]

Více informací o výše zmíněných snímačích či vyhodnocovacích jednotkách lze nalézt v článku [4].

5. MOTIVACE A CÍL PRÁCE

Lednem 2019 došlo ke změně zákona č. 254/2001 Sb. o vodách, který předepisuje měřit množství a kvalitu (jakost) vypouštěných odpadních vod (OV) odlehčovaných před čistírnou odpadních vod (ČOV) do recipientu za účelem jejich zpoplatnění.

ČOV Brno-Modřice má na svém přítoku kanalizační spojnu a stavidlovou komoru (SK), která slouží i jako odlehčovací objekt, jenž během zvýšených průtoků napomáhá odlehčovat odpadní vody přímo do řeky Svratky (recipientu). Za stavidlovou komorou pokračuje odpadní stoka, ve které je instalován stabilní měřicí systém pro stanovení okamžitého průtoku a proteklého množství vody. Stávající systém pracuje na kontinuálním principu a skládá se z jednoho dnového rychloměrného snímače a ze dvou snímačů hloubkoměrných. Tyto snímače jsou dále připojeny k vyhodnocovací jednotce, která je kabelově propojena s počítačem umístěným na centrálním dispečinku ČOV. Po provedení provozně-technického posouzení bylo zjištěno, že je stávající měřicí systém nezpůsobilý pro potřeby poplatkového hlášení za množství vypouštěných odpadních vod, a proto se rozhodlo, že bude navržen zcela nový systém měření průtoku a objemu odlehčovaných vod [5].

Nově navržený měřicí systém bude založen na využití Q/h charakteristiky přelivných hran v prostoru stavidlové komory čistírny odpadních vod (SK ČOV).

Tato bakalářská práce se konkrétně zabývá měřením Q/h charakteristiky na fyzikálním hydraulickém modelu SK ČOV v Laboratoři vodohospodářského výzkumu (LVV) Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Dále také zpracováním naměřených hodnot a jejich výslednou analýzou. Celá bakalářská práce je rozdělena do dvou částí, na část teoretickou popsanou výše a na část praktickou uvedenou v následujících kapitolách.

6. POPIS STÁVAJÍCÍHO STAVU V PROSTORU SK ČOV

6.1. Stavebně-konstrukční řešení

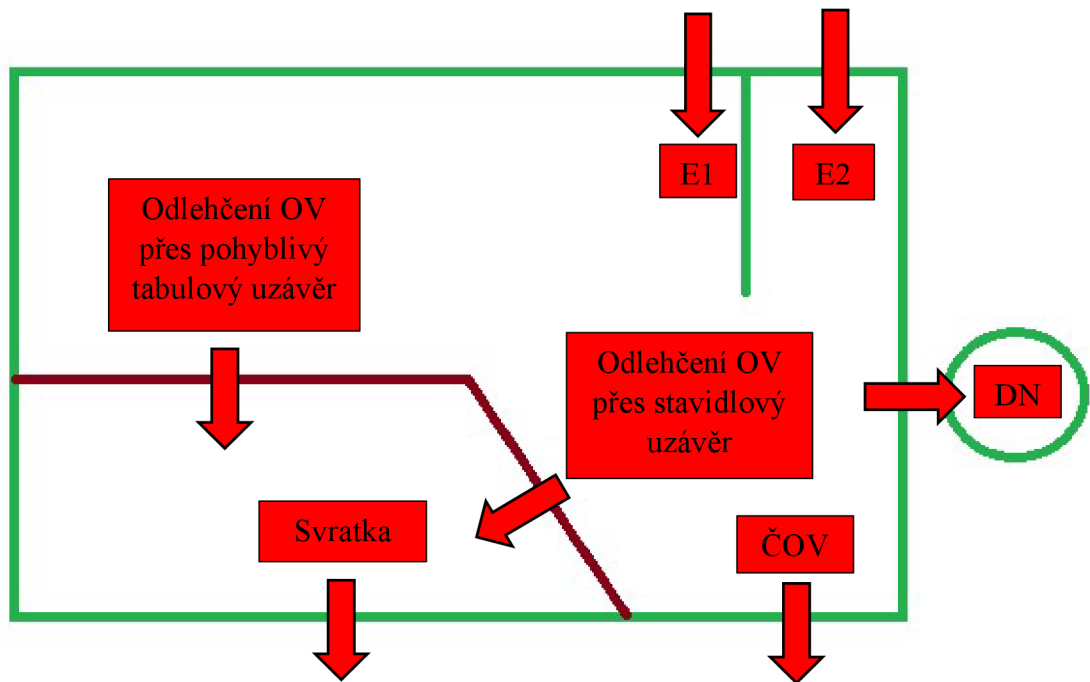
V této kapitole bude ve smyslu [5] popsán stávající stav SK ČOV. Situace v prostoru SK ČOV je pak vystižena na obr. 12.

Do prostoru šachtice přitékají ze dvou sběračů E1 a E2 odpadní vody, které mohou být následně za pomoci čtyř stavidel vedeny různými směry – do dešťové nádrže, do technologické linky ČOV nebo dále přes pevný stavidlový uzávěr a pohyblivý tabulový uzávěr do recipientu (řeky Svratky).

Zdvížené stavidlo, které reguluje nátok do dešťové nádrže (DN) se nachází poproudě vlevo od přítoku sběračů E1 a E2. Na linii sběračů následně navazuje nátok do technologické linky ČOV, ten je hrazen stavidlovým uzávěrem, který slouží jako uzavírací a regulační orgán technologické linky ČOV. Na konci komory poproudě vpravo od sběračů E1 a E2 se nachází vypouštěcí (zdvižný) stavidlový uzávěr sloužící pro případné mimořádné vyprázdnění celého systému. Ten je ovšem za běžných i mimoprovozních stavů zavřený a průtoky, které nejsou vedeny do DN ani do technologické linky ČOV, přepadají přes jeho horní hranu do recipientu.

Na začátku komory poproudě vpravo od sběračů E1 a E2 je proveden nátok k přelévání pohyblivému tabulovému uzávěru. Tento uzávěr je opřen o betonovou stěnu spadiště a slouží k regulaci průtoku odlehčovaných vod přepadem přes jeho horní hranu.

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



Obr. 12) Situace v prostoru SK ČOV

6.2. Průtokové poměry SK ČOV

Celý provoz SK ČOV je ovládán z centrálního dispečinku ČOV tak, aby bylo v rámci technologické linky ČOV čištěno maximální množství odpadních vod. Za SK ČOV jsou do technologické linky 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 $1,05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Vzhledem k tomuto tak lze předpokládat hodnoty průtoků vedených 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 vyplývají z celkové kapacity technologické linky ČOV, která odpovídá cca $4,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

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

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

7. NÁVRH MĚŘICÍHO SYSTÉMU

V následující kapitole je popsán nově navržený měřicí systém ve smyslu [5], který bude umístěn v prostoru SK ČOV.

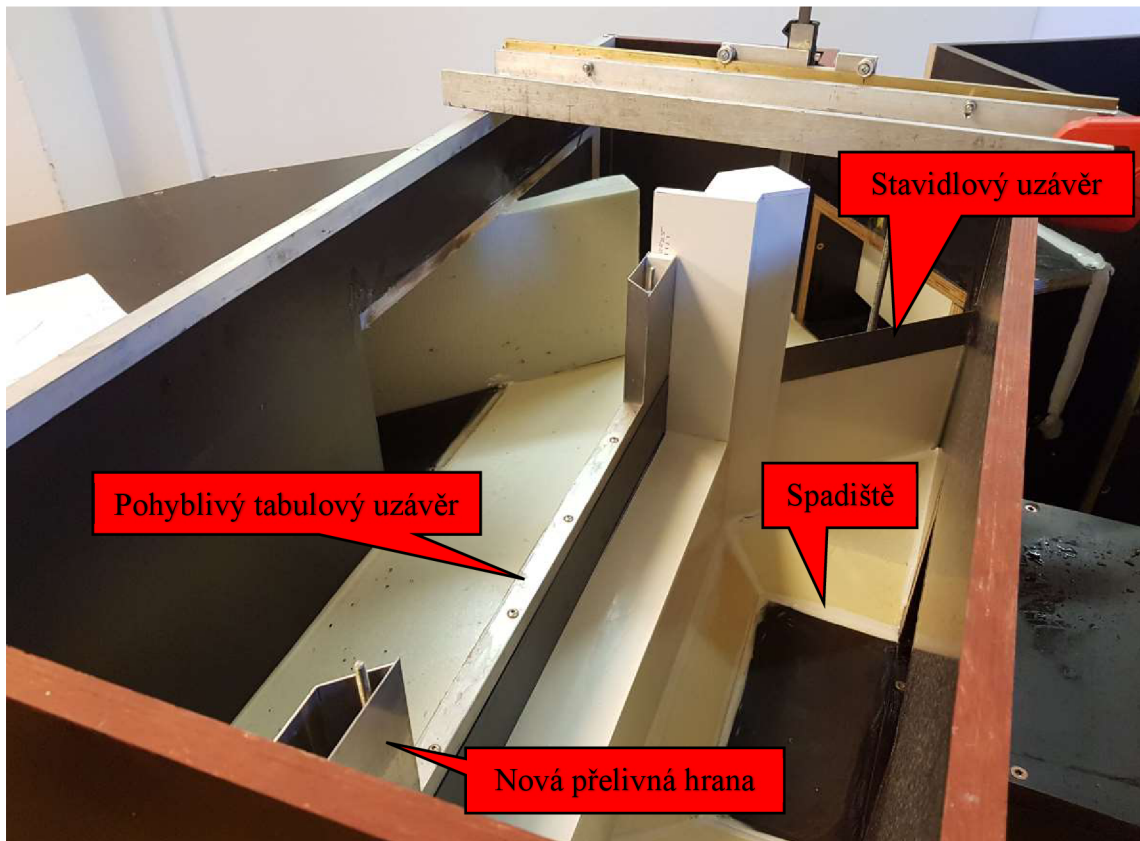
7.1. Přelivy v prostoru SK ČOV

Nový systém měření bude založen na využití jednoznačné funkční závislosti mezi protiproudně měřenou hloubkou před přeléváním stavidlem a nově vybudovanou přelivnou hranou na přelévání tabulového uzávěru a průtokem. Jde o tzv. Q/h charakteristiku vzdouvacího objektu typu přeliv (v našem případě jde o kombinovaný přepad přes dva přelivy) tak, jak bylo popsáno v kapitole 3.

Mezi ovládací tyče přelévání tabulového uzávěru bude umístěna přelivná hrana s konstrukční výškou nad stávající horní hranu tabulového uzávěru 0,20 m. Aby nedocházelo k zachytávání pevného odpadu na ovládacích tyčích, bude na obou stranách mezi tyčemi a betonovými stěnami zvýšena úroveň přelivné hrany. Dále budou ovládací tyče zakryty i z jejich návodní strany. Současně tak dojde k zajištění jednoznačně bočního zavzdušnění spodního líce přepadajícího paprsku. Konstrukční výška tohoto zvýšení je 1,00 m nad úroveň nové přelivné hrany. Tímto přístupem tak docílíme vytvoření ostrohranného přelivu o světlé šířce 3,90 m. V situaci, kdy začne voda přepadat i přes stavidlový uzávěr s délkou přelivné hrany 2,47 m, bude zajištěna dostatečná kapacita celého měřicího systému. Počátek přepadu vody je závislý na konkrétní proměnné výškové úrovni nově zřízené přelivné hrany tabulového uzávěru.

Z důvodu zachování měřicí schopnosti nově navrženého měřicího systému v celém variačním rozsahu předpokládaných průtoků je nutné zajistit, aby nedocházelo k ovlivnění vzniku kritické hloubky v prostoru nad přelivnými hranami (podkapitola 3.1.1.).

V případě, že úroveň hladiny vody ve Svratce se dostane až do takové úrovně, kdy dojde k protiproudění vzduchu a zatopení přelivných hran, začne se voda z recipientu dostávat do stokové sítě. Jde zcela o výjimečnou situaci, v takovém případě může být během vysokého stupně zatopení skutečný průtok i nulový, v tomto případě však bude měřicí systém vykazovat hodnotu průtoků odpovídající příslušné přepadové výšce.



Obr. 13) Pohled na model přelivů v prostoru SK ČOV

Příslušná měřicí technika pro navržený systém se bude skládat ze dvou hladinoměrných ultrazvukových (UZV) snímačů, které budou dále napojeny do vyhodnocovací jednotky. Hlavní snímač, který slouží pro měření přepadové výšky h_s umístěný v prostoru SK ČOV protiproudě před přelivy bude vztažen k výškové úrovni, která odpovídá horní přelivné hraně přelévaného stavidla. Druhý UZV snímač bude sledovat polohu pohyblivé přelivné hrany tabulového uzávěru. Jeho referenční výšková úroveň odpovídá taktéž hraně přelévaného stavidla s tím, že bude nabývat jak hodnot kladných, tak i záporných. Pokud bude úroveň nově zřízené přelivné hrany tabulového uzávěru níže než úroveň hrany stavidla, bude snímač vykazovat zápornou hodnotu Z a naopak. Hodnota přepadové výšky realizující se na přelivné hraně tabulového uzávěru h_t bude dána vztahem:

$$h_t = h_s - Z. \quad (7.1)$$

Rozsah pohybu tabulového uzávěru v metrech je uvažován v intervalu $Z \in (-0,20; 0,25)$.

8. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V prostorách LVV Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně byla provedena experimentální měření Q/h charakteristiky odlehčovací komory. Odlehčovací komora byla zkoumána pomocí hydraulického fyzikálního modelu v délkovém měřítku 1 : 10.

Obsahem této kapitoly je popis fyzikálního modelu, hydraulického okruhu, měřicí techniky, modelové podobnosti, zkoumaných objektů SK ČOV a postup měření. V závěru kapitoly je popsáno zpracování naměřených hodnot včetně výsledků měření.

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

V následující podkapitole je ve smyslu [5] popsán fyzikální model společně s hydraulickým okruhem, na který byl připojen. Dále zde bude popsána použitá měřicí technika a v závěru podkapitoly bude ve zkratce popsána problematika související modelové podobnosti.

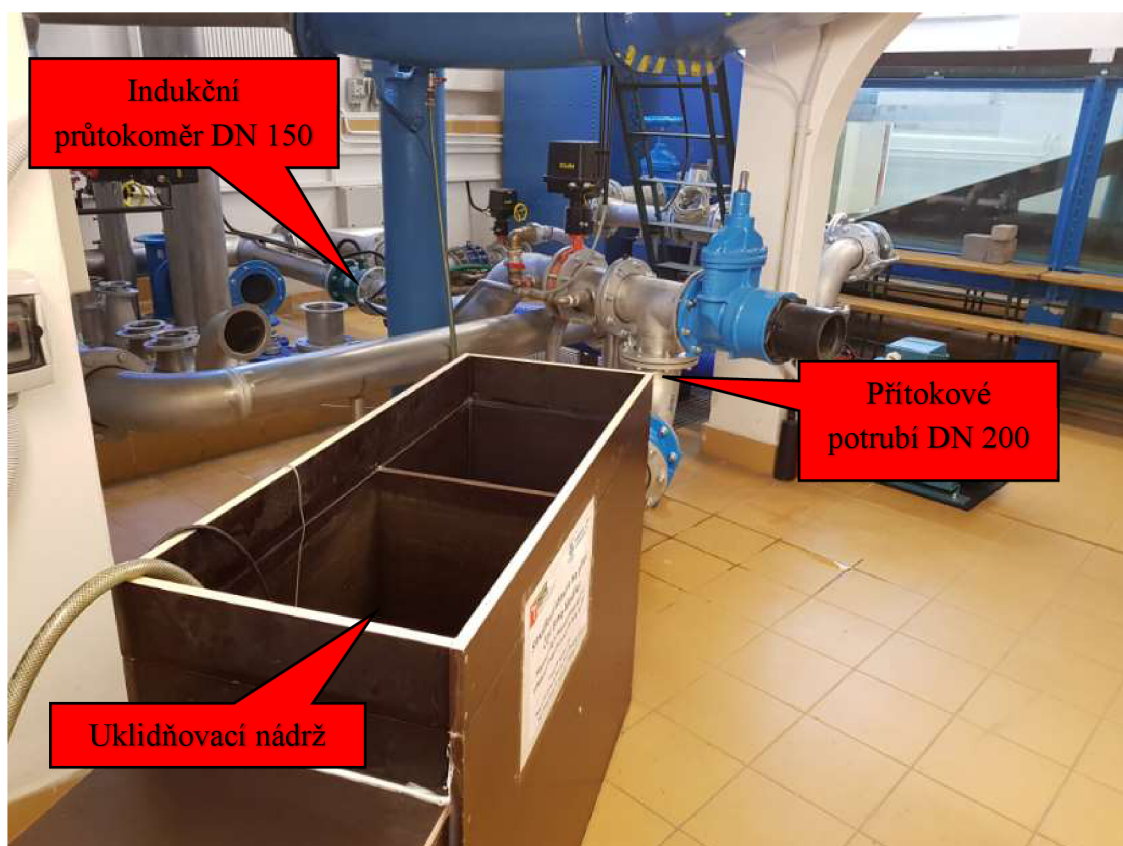
8.1.1. Fyzikální model

Fyzikální model objektu SK ČOV byl vybudován v délkovém měřítku 1 : 10, pak tedy $M = 10$. Toto měřítko vzniklo z analýzy požadavků na rozsah experimentálních prací, mezních podmínek mechanické podobnosti pozorovaných jevů a v úzké vazbě na prostorové a kapacitní možnosti laboratorního okruhu. Veškeré rozměry a tvary modelu odpovídají skutečným parametrům zmenšeným v měřítku délek 1 : 10.

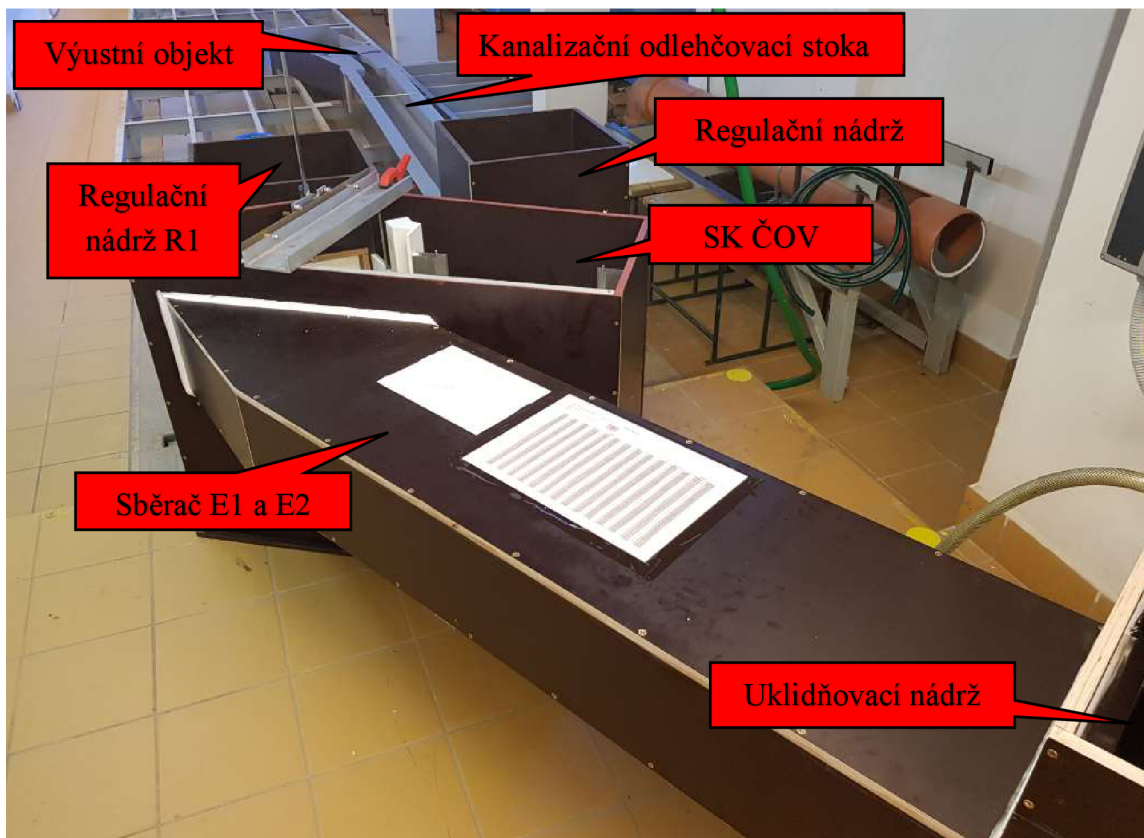
Jako materiál všech konstrukčních částí je použita vodovzdorná překližka tloušťky 18 mm. Pro přesné tvary přeléváných konstrukcí a obtékaných pílířů je využit materiál PVC šedé či bílé barvy v tloušťkách 5 mm, 10 mm a 25 mm. Pro tvarově složitější prvky je využit extrudovaný polystyrén XPS. V rámci úprav byl pro některé části modelu použit nerezový či pozinkovaný plech. Spojování jednotlivých prvků modelu je prováděno lepením nebo šroubovými spoji. Těsnění je pak zajištěno pomocí silikonových a polyuretanových tmelů. Kanalizační tlamová stoka včetně výustního objektu jsou opatřeny speciálním šedým nátěrem pro zajištění odpovídajícího stupně drsnosti omočených povrchů.

Model je instalován v místě jednoho z hydraulických okruhů laboratoře s označením B121 a je koncipován následovně.

Uklidňovací nádrž je za pomoci potrubí DN 200, které je vybaveno průtokoměrem, připojena na hydraulický okruh (obr. 14). Na uklidňovací nádrž dále navazují sběrače E1 a E2, ze kterých přitékají OV do prostoru SK ČOV. V prostoru SK ČOV jsou realizovány dva výtoky, jeden simuluje nátok do technologické linky ČOV (R1) a druhý navazuje na spadišťovou šachtu za přelivy (R2). Oba nátoky jsou zaústěny do spojných a regulačních nádrží R1 a R2. Za nádrží R2 následuje dlouhý úsek odlehčovací stoky a výustní objekt. Za ním voda volně padá zpět do akumulární nádrže vody laboratoře (obr. 15).



Obr. 14) Protiproudí pohled na uklidňovací nádrž



Obr. 15) Celkový popravní pohled na hydraulický model

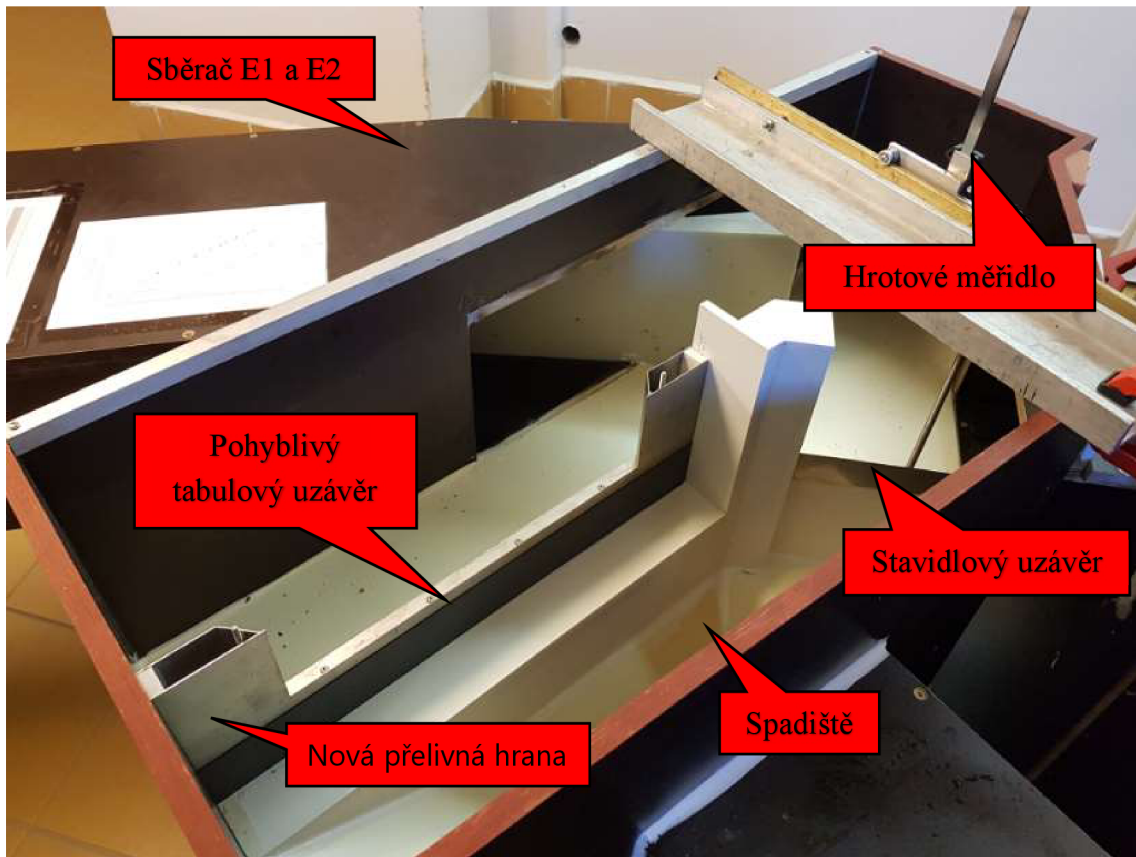
Na obr. 16 lze vidět prostorové uspořádání modelu SK ČOV. Na pohyblivém tabulovém uzávěru je instalována nová přelivná hrana s konstrukční výškou nad stávající horní hranou tabulového uzávěru 0,20 m po přepočtu na dílo. Pohyb tabulového uzávěru je zajištěn pomocí tří svislých drážek vytvořených v jeho těle.

Propojení SK ČOV s regulační nádrží R1 je provedeno uzavřeným kanálem pravoúhlého profilu (obr. 18). Součástí propojení je i stavidlo, sloužící k regulaci vody do nádrže R1, která představuje technologickou linku ČOV. Stavidlo je na modelu regulováno pomocí ručního posunu s možností jeho fixace v jakékoliv poloze. Regulace hladiny v nádrži R1 lze provádět za pomoci regulačního šoupěte situovaného na odpadním potrubí DN 150. Toto potrubí je instalováno na odtoku z R1 a odvádí tak vodu zpět do akumulární jímky vody hydraulického okruhu. Zároveň je opatřeno průtokoměrem DN 100.

Celkový přítok Q_{pr} do modelu byl měřen jedním průtokoměrem a na odtoku z regulační nádrže R1 byl instalován druhý průtokoměr, který měřil průtoky $Q_{čov}$ natékající do technologické linky ČOV.

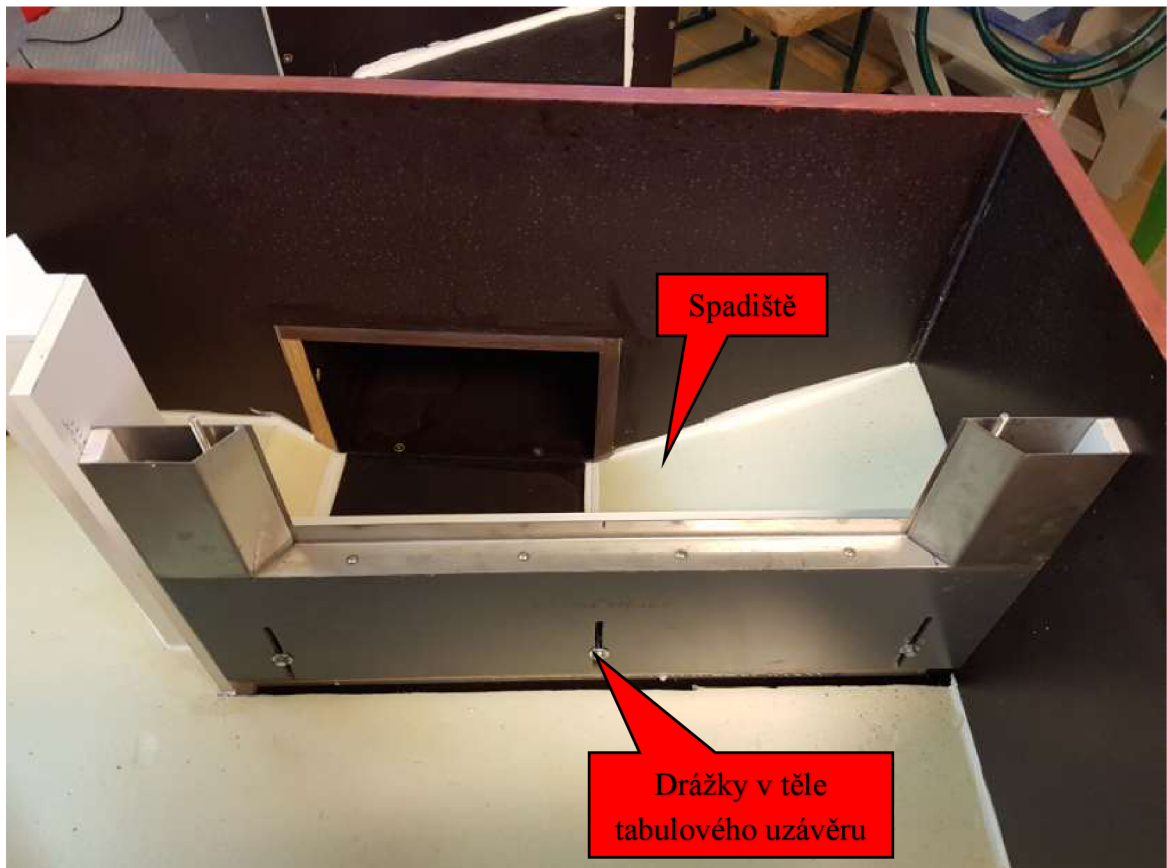
Za pomoci těchto průtokoměrů bylo možné z rozdílů jejich hodnot stanovit průtok odlehčovaných vod do recipientu (řeky Svatky):

$$Q_{\text{svr}} = Q_{\text{př}} - Q_{\text{čov}} \quad (8.1)$$

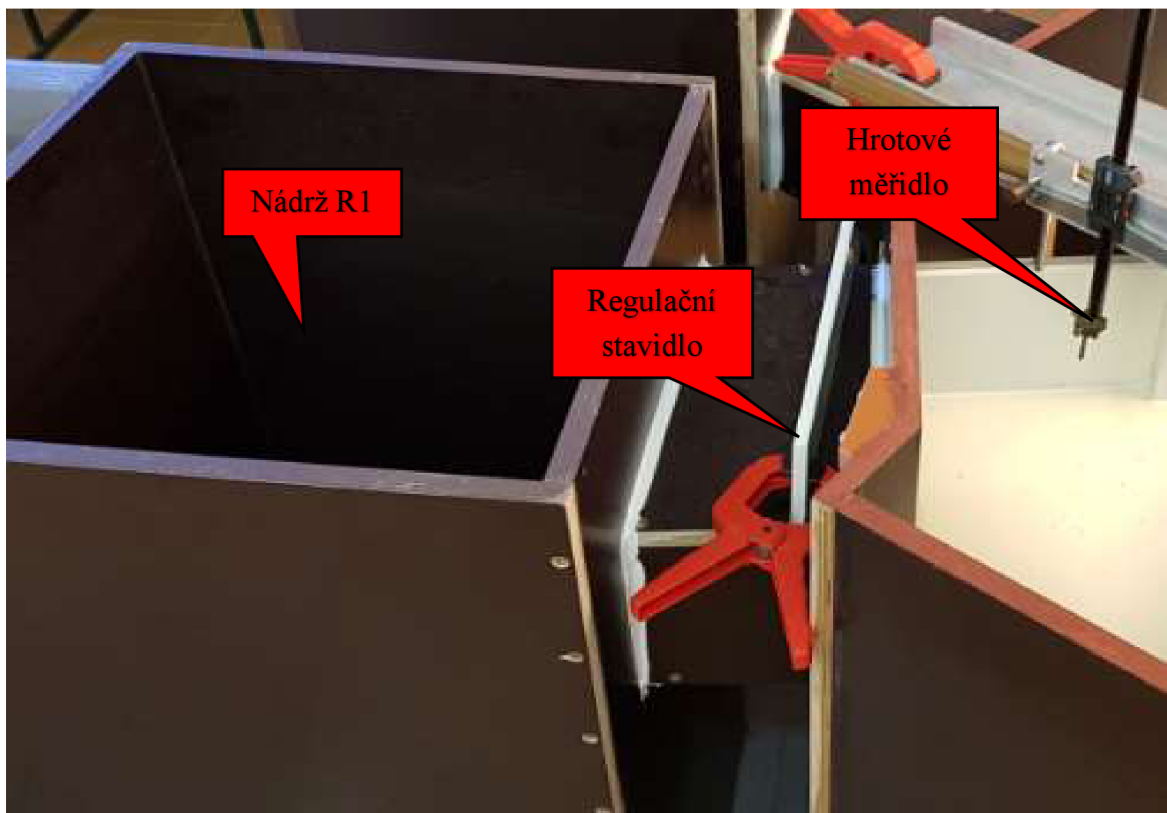


Obr. 16) Pohled na SK ČOV

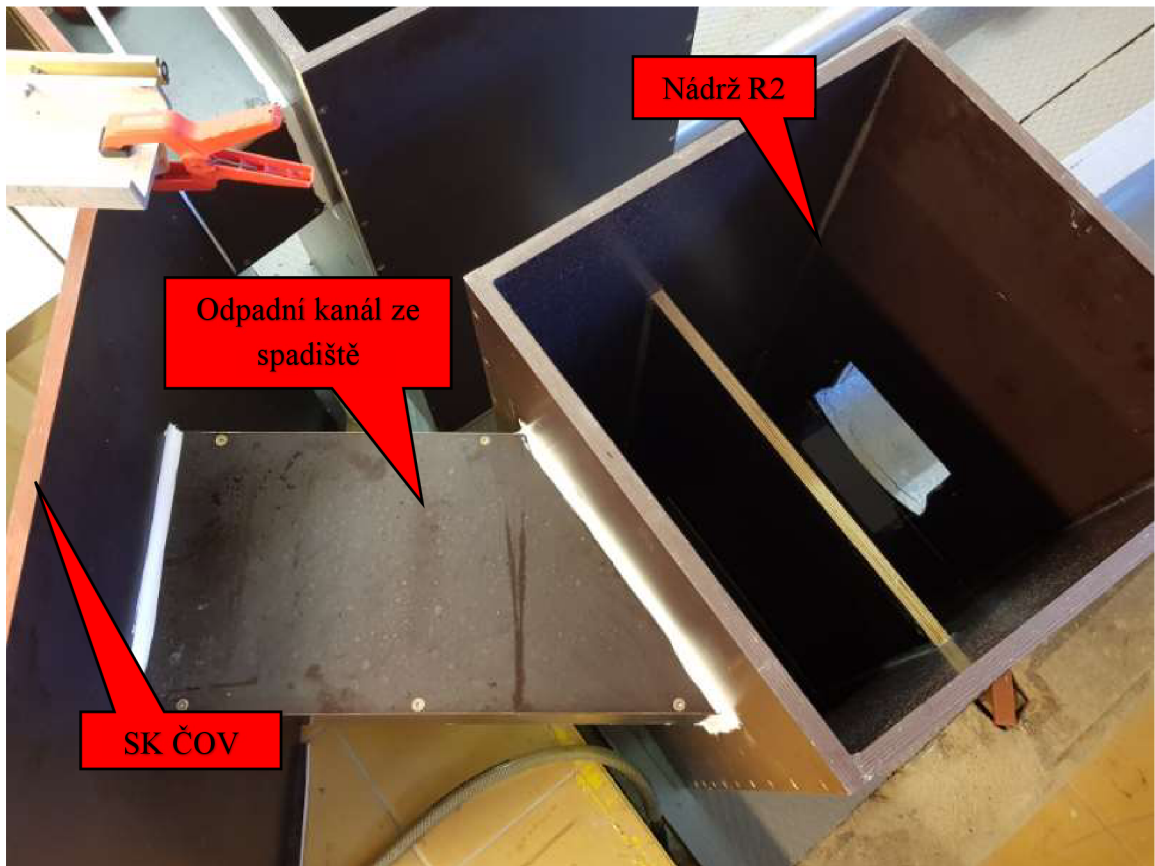
Na obr. 19 je patrný odtokový prostor SK ČOV do šachtice R2. Na ni přímo navazuje prizmatická část odlehčovací tlamové stoky. Napojení stoky na šachtici R2 lze vidět na obr. 19 a obr. 20.



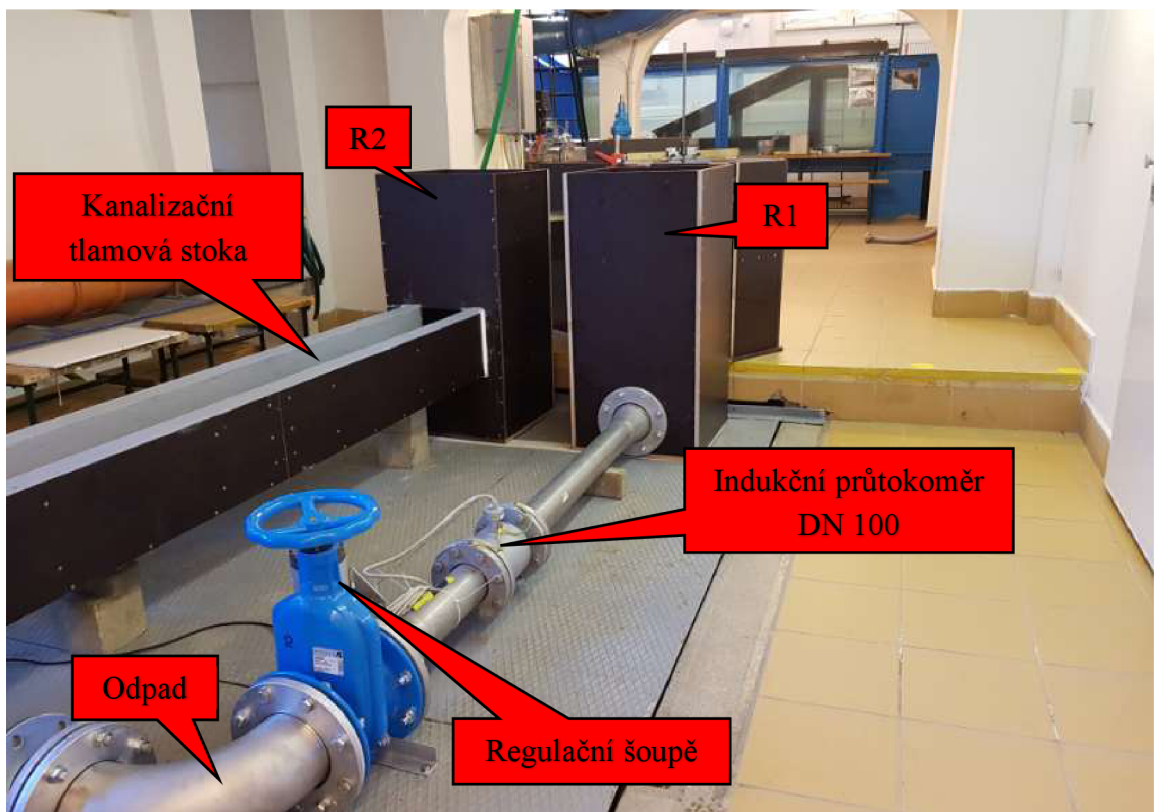
Obr. 17) Pohled na pohyblivý tabulový uzávěr



Obr. 18) Propojení SK ČOV s regulační nádrží R1



Obr. 19) Pohled na propojení SK ČOV se šachticí R2



Obr. 20) Protiproudni pohled na nádrže R1 a R2 a odtoků z nich

8.1.2. Hydraulický okruh

Hydraulický okruh je umístěn v budově B areálu fakulty. Celý okruh je založen na cirkulačním principu. Voda je čerpána za pomoci dvou čerpadel z podzemní zásobní akumulární nádrže o objemu 50 m^3 a dále dopravována nerezovým potrubím do různých tratí laboratoře. Jedna z těchto tratí je určena pro volně stojící modely a na ni je právě napojen i model SK ČOV. Čerpací stanici (ČS) hydraulického okruhu tvoří dvě ponorná čerpadla odstředivého typu s kapacitou $2 \times 75 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Díky čemuž bylo možné bez větších problémů zcela vyhovět požadované průtočné kapacitě modelu. Maximální průtok zkoušený na modelu činil $38 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, ten odpovídá průtoku na díle $12 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

Elektro-technologická část ČS hydraulického okruhu je řešena tak, že všechny elektro prvky jsou instalovány ve skříňovém rozvaděči, ve kterém jsou umístěny i dva měřiče frekvence a řídicí systém, který je v tomto případě integrován do 10" vizualizačního dotykového panelu od firmy B&R, jehož plochu lze zobrazit i na vzdáleném počítači.

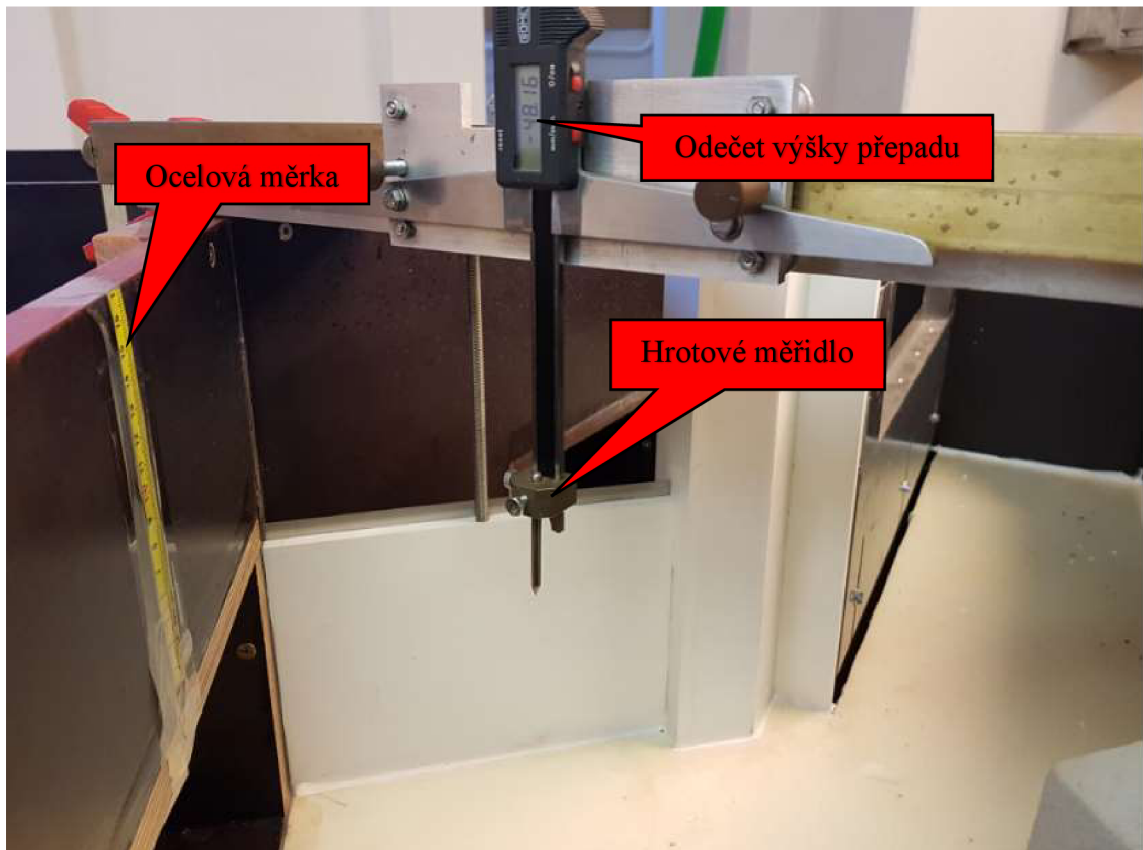
Jednotlivá čerpadla jsou ovládána měřičem frekvence tak, aby bylo možné pokrýt celý rozsah požadavků na průtok. Model byl napojen k přírubě čerpací stanice hydraulického okruhu pomocí tvarovek a nerezového potrubí (obr. 14).

8.1.3. Měřicí technika

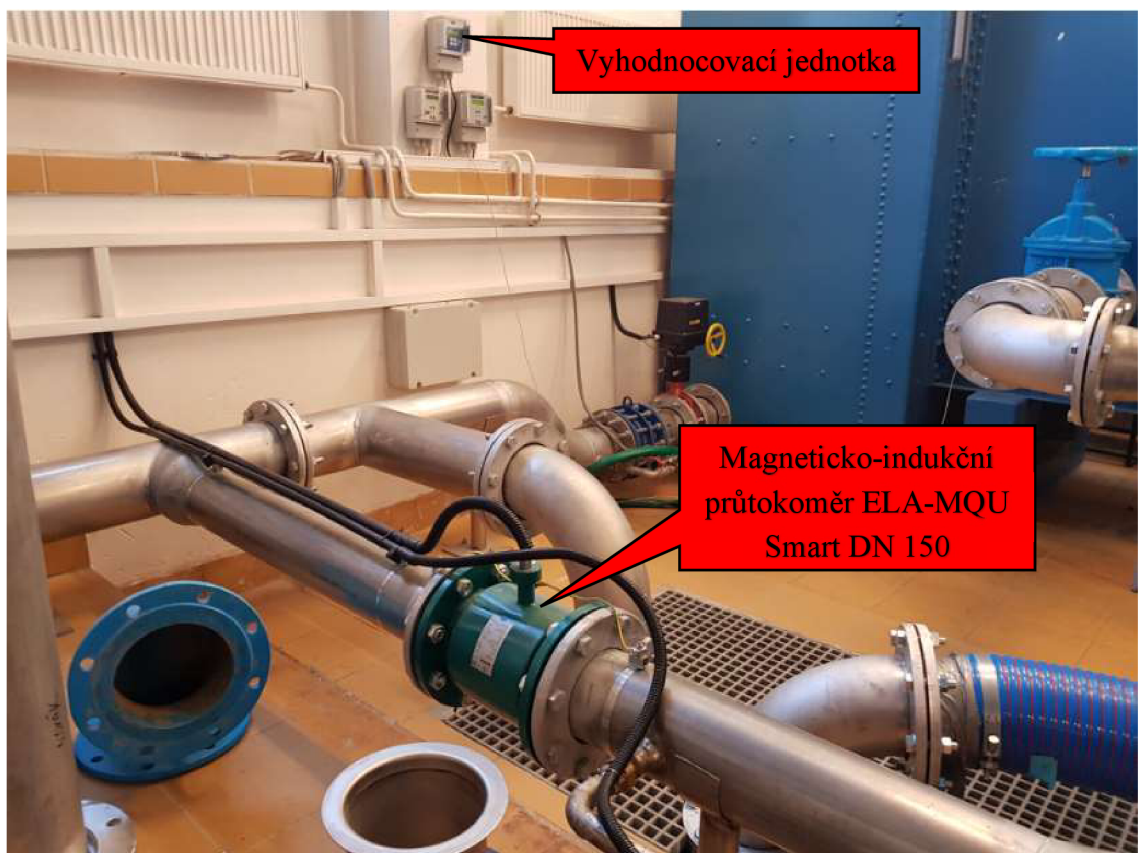
Pro měření byly použity pomůcky a měřidla jako hrotové měřidlo, ocelová měrka a PC, které jsou patrné z obr. 21, 22 a 23. Dále byl použit magneticko-indukční průtokoměr ELA-MQU Smart DN 150 pro měření průtoků na přítoku do ukliďňovací nádrže. Na zobrazovacím zařízení průtokoměru byla přesnost odečtu v desetinách $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$.

Tentýž typ průtokoměru o DN 100 byl použit i na odtoku z nádrže R1. Na zobrazovacím zařízení průtokoměru pak byla přesnost odečtu průtoku v setinách $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$.

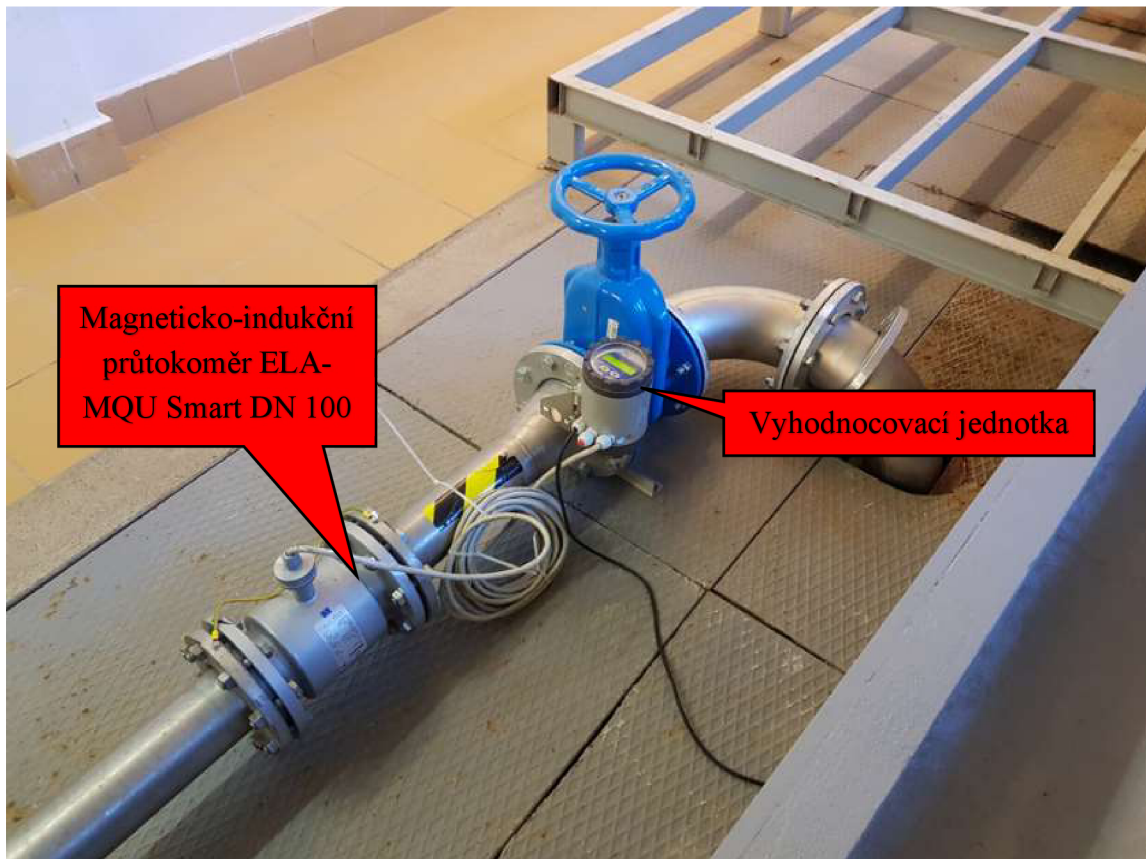
Pro měření úrovně hladiny v prostoru modelu SK ČOV bylo využito digitální hrotové měřidlo. Současně byla prováděna průběžná kontrola měřených hloubek za pomoci žlutých eloxovaných ocelových měrek v délkách 300 mm a 500 mm. V prostoru SK ČOV byla trvale instalována ocelová měrka sloužící pro rychlou kontrolu správnosti měření přepadových výšek.



Obr. 21) Měření úrovně hladiny v prostoru SK ČOV



Obr. 22) Měření průtoku na přítoku do uklidňovací nádrže



Obr. 23) Měření průtoku na odtoku z nádrže R1

V rámci výzkumných prací byly všechny výškové odlehlosti měřeny laserových rotačním nivelačním přístrojem. Pro změření výškových odlehlostí mezi hranou stavidlového a tabulového uzávěru bylo použito analogové posuvné měřidlo. Zaměření rovinnosti přelivných hran bylo provedeno pomocí vodních vah o různých délkách.

Veškeré měřené hodnoty byly zaznamenávány a vyhodnoceny za pomoci PC.

8.1.4. Zákony modelové podobnosti

Pokud je proudění na objektu či modelu ovlivňováno převážně silami tíže, pak platí pro vzájemný přepočítání jevů Froudovo kritérium podobnosti ve smyslu vztahu (2.7).

Pro pozorovaný jev na modelu i na díle musí být hodnota Froudova kritéria shodná. Pro přepočítání veličin pak platí:

$$l_s = l_m M; \quad (8.2)$$

$$v_s = v_m M^{0,5}; \quad (8.3)$$

$$Q_s = Q_m M^{2,5}; \quad (8.4)$$

kde veličiny s indexem s jsou vztaženy na skutečnost (dílo) a veličiny s indexem m jsou vztaženy na model. Uvedené vztahy lze vystihnout pro délkové měřítko modelu $M = 10$ následujícími rovnicemi:

$$l_s = l_m 10; \quad (8.5)$$

$$v_s = v_m \sqrt{10} = v_m 3,16; \quad (8.6)$$

$$Q_s = Q_m 10^{2,5} = Q_m 316,23. \quad (8.7)$$

Pokud proudový jev ovlivňuje více druhů sil (gravitační, povrchové napětí, viskozita, ...) současně, nelze použít přepočítání uvažující dominantní působení pouze jedné z těchto sil. Z tohoto důvodu je nutné brát v úvahu u zmenšování modelovaných jevů omezující podmínky, které zdola ohraničují platnost použitého kritéria. Pro Freudovo kritérium platí nutnost dodržení spodních hodnot při modelování proudových jevů se spolupůsobením kapilárních sil, vyvolávající povrchové napětí i sil viskozity.

Na ostrohranném přelivu modelu musí být přepadová výška paprsku $h_{\min} \geq 60$ mm. Naměřený tvar paprsku vytékající do atmosférického prostředí se dá za těchto podmínek bezpečně extrapolovat. Ovšem to neplatí pro vztah mezi průtokem a výškou přepadového paprsku. V tomto případě lze uvažovat, že teprve až při hloubkách podstatně menších v okolí hodnoty 25 mm lze pozorovat počátek vlivu povrchového napětí na Q/h charakteristiku. Tato skutečnost vyplývá z řady výzkumných prací prováděných na ostrohranných měrných přelivech. Podrobnější informace k této problematice jsou uvedeny v rámci výzkumné zprávy [5].

8.2. Postup měření

Veškeré práce na modelu lze ve smyslu [5] chronologicky seřadit do následujícího přehledu.

1. Experimentální stanovení vlivu míry otevření stavidla, které slouží k regulaci nátoky vody na technologickou linku ČOV, na tvar a průběh Q/h charakteristiky přelivů.
2. Experimentální stanovení Q_s/h_s charakteristiky v situaci, kdy voda přepadá pouze přes pevné stavidlo.
3. Experimentální stanovení Q_t/h_t charakteristiky v situaci, kdy voda přepadá pouze přes tabulový uzávěr.
4. Experimentální stanovení souhrnné Q_{SvT}/h_s charakteristiky vody, která přepadá přes oba přelivy s tím, že poloha tabulového uzávěru se mění v uvedených mezních hodnotách $\pm Z$.
5. Nalezení náhradní Q_{SvT}/h_s charakteristiky v souvislosti s experimentálně získanými daty.

Pro stanovení Q/h charakteristiky všech výše zmíněných řešených oblastí bylo nutné provést měření úrovně hladiny h v místě protiproudě před přelivy (viz. umístění hrotového měřidla je patrného z obr. 21). Jako nula vodočtu pro všechna měření byla zvolena kóta přelivné hrany pevného stavidla. Výška přepadového paprsku je pak označována jako h_s a výšku realizující se na pohyblivém tabulovém uzávěru h_t pak lze odvodit dle vztahu (7.1) v závislosti na velikosti výškové odlehlosti $\pm Z$.

Komplexní měření Q/h charakteristiky objektu bylo prováděno v rozsahu průtoků od $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ až do $12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (uváděno po přepočtu na dílo). Na modelu hodnota $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ odpovídá průtoku $7,9 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ a hodnota $12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ odpovídá $38 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Pro případné zjištění vlivu postupu měření na získaná data bylo prováděno stanovení Q/h charakteristiky vždy v první řadě vzestupně vynecháním každé druhé hodnoty v uvedeném intervalu rozsahu průtoků a následně sestupně přes vynechané hodnoty od $12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ po $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Hodnoty průtoku na přítoku do modelu a na odtoku z technologické linky ČOV byly odečítány z vyhodnocovacích jednotek indukčních průtokoměrů a zaznamenány do tabulky. Hodnoty průtoku na přítoku byly odečítány s přesností na jedno desetinné místo

a hodnoty průtoku na odtoku z technologické linky ČOV s přesností na dvě desetinná místa.

Vždy po ustálení průtoku a pozorovaného jevu byla měřena úroveň hladiny h za pomoci digitálního hrotového měřidla, vždy celkem třikrát a zaznamenávána do tabulky s přesností na dvě desetinná místa. Výslednou hodnotou h je pak aritmetický průměr těchto tří naměřených hodnot.

8.3. Zpracování naměřených hodnot

Naměřenými hodnotami rozumíme hodnoty úrovně hladiny h a průtoku Q , které byly matematicky i graficky zpracovány v programu Microsoft Excel. V následující podkapitole budou uvedeny veškeré výpočty potřebné pro stanovení všech předmětných Q/h charakteristik.

V tab. 1 lze v modrých polích pozorovat hodnoty naměřené a v oranžových polích hodnoty vypočtené. Tabulka se vztahuje k měření Q/h charakteristiky přelivů s mírou otevření regulačního stavidla 20 %.

Tab. 1) Zpracování naměřených hodnot

Frekvence čerpadla Hz	$Q_{labpř}$ $l.s^{-1}$	$Q_{labčOV}$ $l.s^{-1}$	Q_{labSvr} $l.s^{-1}$	h_{lab1} mm	h_{lab2} mm	h_{lab3} mm	h_{lab} mm	Otevření a %	Q_{pi} $m^3.s^{-1}$	$Q_{čOV}$ $m^3.s^{-1}$	Q_{Svr} $m^3.s^{-1}$	h_{skut} m
19.5	11.40	9.20	2.20	14.60	14.60	14.60	14.60	20	3.60	2.91	0.70	0.146
20.5	16.00	10.83	5.17	29.10	29.10	29.10	29.10	20	5.06	3.42	1.63	0.291
20.5	15.70	10.80	4.90	28.70	28.70	28.70	28.70	20	4.96	3.42	1.55	0.287
21.0	17.30	9.26	8.04	39.10	39.10	39.10	39.10	21	5.47	2.93	2.54	0.391
20.5	18.00	11.30	6.70	35.46	35.75	35.81	35.67	20	5.69	3.57	2.12	0.357
22.0	22.70	9.20	13.50	56.10	56.10	56.10	56.10	20	7.18	2.91	4.27	0.561
22.0	22.25	10.68	11.57	52.56	52.53	52.60	52.56	20	7.04	3.38	3.66	0.526
22.0	22.25	12.10	10.15	49.34	49.54	49.88	49.59	20	7.04	3.83	3.21	0.496
24.5	28.10	9.25	18.85	73.10	73.20	73.30	73.20	20	8.89	2.93	5.96	0.732
24.0	27.25	10.70	16.55	67.70	67.93	67.25	67.63	20	8.62	3.38	5.23	0.676
26.0	31.70	9.10	22.60	83.50	83.50	83.40	83.47	20	10.02	2.88	7.15	0.835
26.0	31.95	10.73	21.22	80.68	80.88	80.76	80.77	20	10.10	3.39	6.71	0.808
26.0	31.95	12.56	19.39	75.63	75.39	75.53	75.52	20	10.10	3.97	6.13	0.755
28.0	36.50	9.20	27.30	96.50	96.50	97.00	96.67	20	11.54	2.91	8.63	0.967
28.0	36.25	10.75	25.50	91.41	91.09	91.63	91.38	20	11.46	3.40	8.06	0.914
28.0	36.25	12.70	23.55	85.72	85.53	85.63	85.63	20	11.46	4.02	7.45	0.856
28.0	36.25	13.15	23.10	86.23	86.58	86.19	86.33	20	11.46	4.16	7.30	0.863

Průtoky $Q_{labpř}$ a $Q_{labčOV}$ byly odečteny z vyhodnocovacích jednotek indukčních průtokoměrů a následně z těchto dvou hodnot byl stanoven průtok Q_{labSvr} dle vztahu (8.1).

Z naměřených hodnot úrovně hladiny h_{lab} pro daný průtokový stav byla výsledná hodnota úrovně hladiny vypočtena aritmetickým průměrem:

$$h_{lab} = \frac{\sum_{i=1}^n h_{labi}}{n}; \quad (8.8)$$

kde počet měření $n = 3$.

Následně bylo nutné všechny získané hodnoty přepočítat z modelu na dílo dle zákonů modelové podobnosti (podkapitola 8.1.4.) a vztahů pro délky l_s (8.5) a průtoky Q_s (8.7). Přepočtené hodnoty byly následně vyneseny do grafu a proloženy příslušnými trendy. Tímto způsobem bylo docíleno stanovení Q/h charakteristik pro všechny varianty měření. Výsledkem zpracování všech naměřených hodnot je tak tabulka s naměřenými a přepočtenými hodnotami včetně grafického znázornění předmětné Q/h charakteristiky.

8.4. Proložení bodů Q/h charakteristiky

Po grafickém znázornění předmětné Q/h charakteristiky bylo nutné všechny do grafu vnesené body proložit pomocnou spojnicí trendu. V této podkapitole je popsáno, která matematická funkce byla pro proložení těchto bodů (regresi) nejvíce „vhodná“ a podle čeho tak bylo rozhodnuto.

K určení vhodné matematické funkce byly použity všechny měřené hodnoty průtoků Q a k nim vztažené přepadové výšky h z důvodu docílení co nejpřesnějšího vystižení všech měřených dat. Pro hledání příslušné spojnice trendu byl použit program Microsoft Excel.

V programu Microsoft Excel byla pro nalezení takové spojnice trendu, která by nejlépe odpovídala naměřeným datům, klíčová tzv. hodnota spolehlivosti R (koeficient korelace), vyjadřující míru shody vypočteného trendu (regresní závislosti) s naměřenými daty. Tato hodnota se pohybuje v intervalu od -1 až do 1 a platí, že čím blíže je R hodnotě 1, tím výstižnější je přiblížení regresní závislosti k původním naměřeným bodům. Hodnota spolehlivosti R je často prezentována ve formě R^2 (druhá mocnina koeficientu korelace R) běžně známá též pod názvem korelační determinace [6].

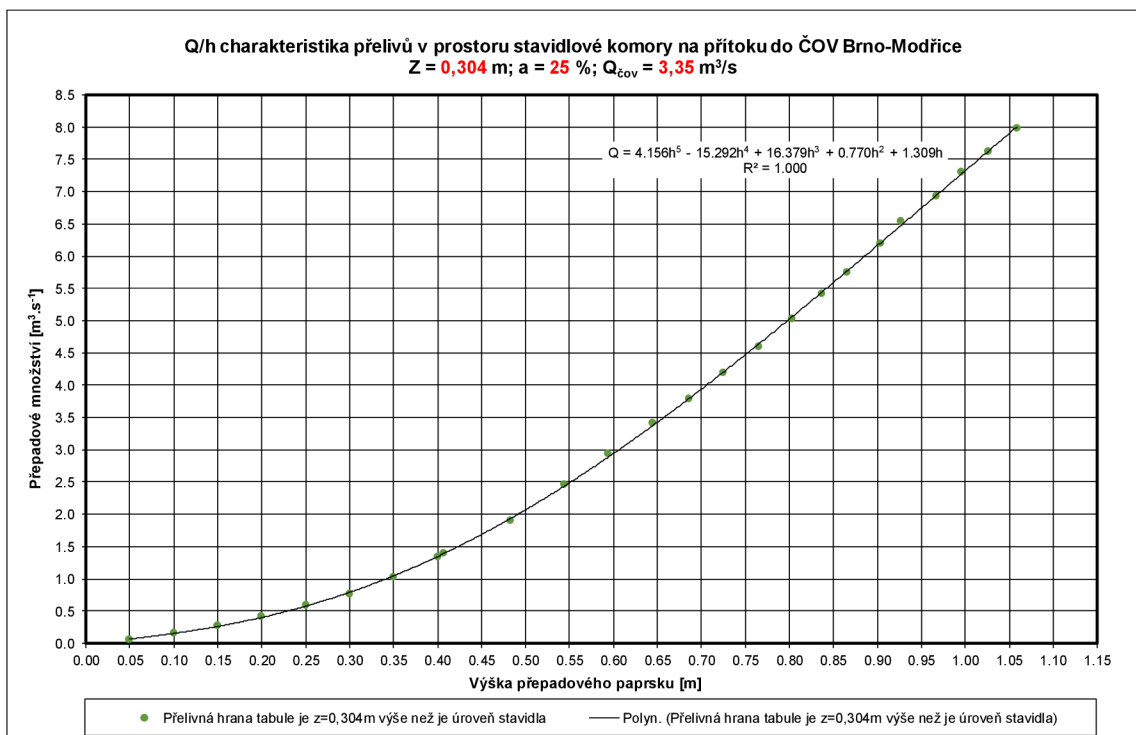
Pro stanovení koeficientu korelace R je využíváno vztahu:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}} = \frac{S_{xy}}{S_x S_y}; \quad (8.9)$$

kde S_x je směrodatná odchylka proměnné hodnoty X , S_y je směrodatná odchylka hodnoty Y a S_{xy} je tzv. kovariance proměnných X a Y [7].

Pro proložení tak byly následně s ohledem na výše uvedené využity především mocninné spojnice trendu a polynomické spojnice trendu druhého a pátého řádu. Zbylé možnosti spojnice trendu jako jsou například exponenciální nebo logaritmická nebyly použity.

V některých případech nebylo vhodné použít mocninnou funkci pro průtokové stavy nad $1,50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, z důvodu nižší hodnoty spolehlivosti R^2 . Bylo proto rozhodnuto, že v těchto případech budou naměřené hodnoty proloženy funkcí polynomickou. Postupnou volbou polynomů od nejnižších řádů po nejvyšší bylo zkoumáno, který z nich nejvíce odpovídá naměřeným hodnotám. Následně bylo zjištěno, že naměřené hodnoty dokáže nejlépe vystihnout polynomická spojnice trendu pátého řádu. Na následujícím grafu 1 je vyobrazeno vhodné proložení naměřených bodů polynomickou spojnici trendu pátého řádu s hodnotou spolehlivosti $R^2 = 1,000$.



Graf 1) Vhodné proložení naměřených bodů polynomickou funkcí pátého řádu

Po nalezení správné regresní křivky jí bylo možné proložit většinu naměřených dat a přiřadit k ní regresní koeficienty (A , B , C , D a E) popisující její tvar. Za pomoci těchto koeficientů lze tak stanovit regresní průtok Q_{reg} dle vztahu:

$$Q_{\text{reg}} = A h_{\text{skut}}^5 + B h_{\text{skut}}^4 + C h_{\text{skut}}^3 + D h_{\text{skut}}^2 + E h_{\text{skut}} + F. \quad (8.10)$$

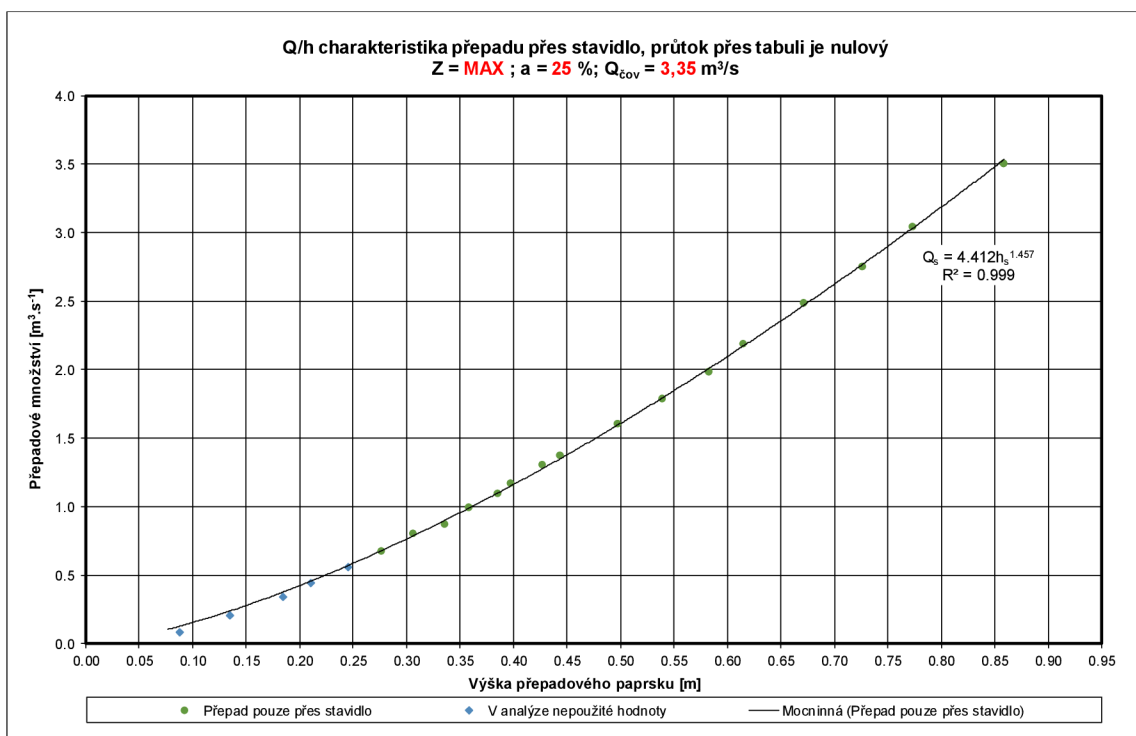
Tento regresní průtok Q_{reg} bude dále označován jako průtok $Q_{\text{SVr_měř}}$ a hloubka hladiny na díle h_{skut} jako h . Platí zde okrajová podmínka, která říká, že nulový průtok nastane při nulové přepadové výšce, tj. když $Q = 0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, tak $h = 0 \text{ m}$. Rovnice (8.10) tak nabývá

platnosti při přepadové výšce $h > 0$ m. Je zde tedy uvažováno i s nulovým koeficientem F , kde $F = 0$.

V některých případech bylo, díky dostačující hodnotě spolehlivosti R^2 , možné využít k proložení funkci mocninnou (graf 2). I k této výsledné regresní křivce byla přiřazena rovnice s regresními koeficienty A a B (označované též jako C a D), sloužící pro její popis. Díky těmto koeficientům lze dále stanovit regresní průtok Q_{reg} dle následujícího vztahu:

$$Q_{\text{reg}} = A h_{\text{skut}}^B \quad (8.11)$$

V tomto případě bude dále regresní průtok Q_{reg} označován jako Q_s nebo Q_t a hloubka hladiny na díle h_{skut} jako h_s či h_t .



Graf 2) Proložení naměřených bodů mocninnou funkcí

8.5. Výsledky experimentálních prací na modelu

V následujících podkapitolách budou postupně popsány výsledky experimentálních prací probíhajících na modelu. Veškeré následně uvedené vztahy jsou odvozeny pro základní jednotky SI [m], [m³·s⁻¹]. Výsledky jsou uváděny v rozměrech přepočtených na dílo, pokud nebude uvedeno jinak.

8.5.1. Experimentální stanovení vlivu míry otevření stavidla na tvar a průběh Q/h charakteristiky přelivů

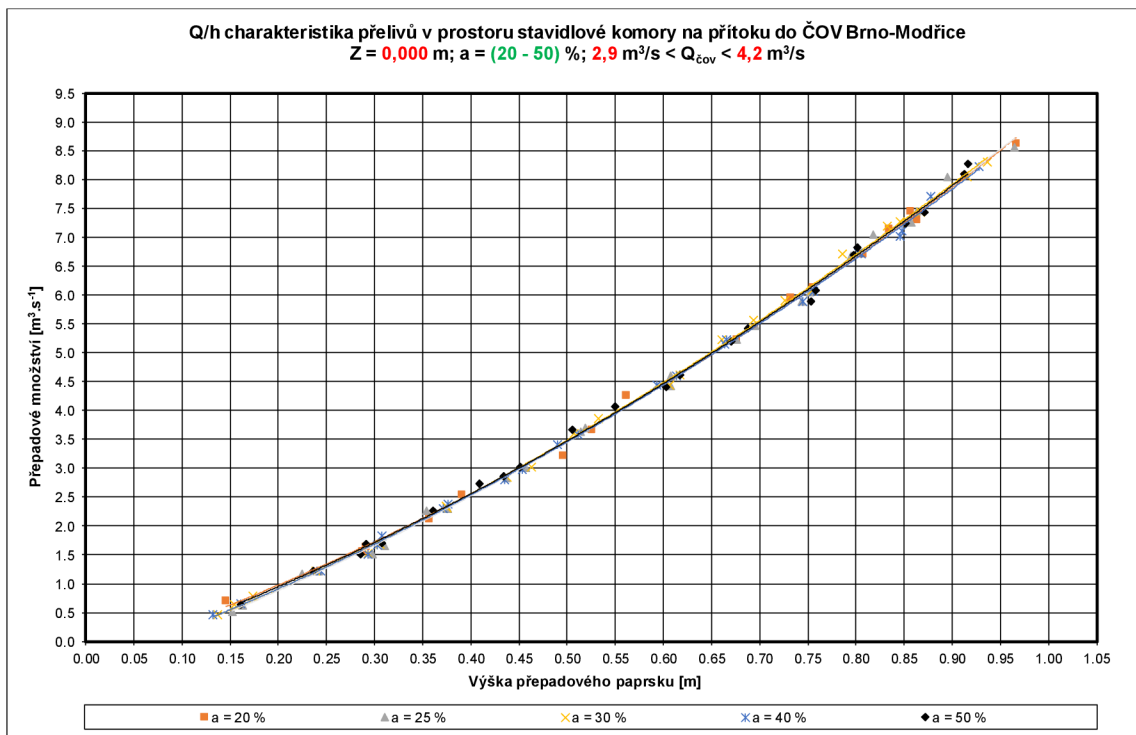
V první části experimentálních prací bylo nutné zjistit, zda má míra otevření stavidla, které slouží k regulaci průtoku do technologické linky ČOV, vliv na průběh celkové charakteristiky objektu. Komplexní měření Q/h charakteristiky bylo prováděno v rozsahu průtoků zmíněných v kapitola 8.2. Průtoky realizující se pod předmětným stavidlem byly v intervalu od $2,90 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ až do extrémní hodnoty $4,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Současně bylo prováděno měření Q/h charakteristiky s různou mírou otevření stavidla a od 20 % do 50 %. Konkrétně pro hodnoty $a = 20 \%$, $a = 25 \%$, $a = 30 \%$, $a = 40 \%$ a pro $a = 50 \%$. Během těchto měření byla úroveň přelivné hrany stavidla a úroveň přelivné hrany tabulového uzávěru shodná, tedy $Z = 0,00 \text{ m}$.

Měření probíhalo za ustáleného přítoku do modelu a s konstantní mírou otevření předmětného stavidla. Hodnota průtoku směřujícího do technologické linky ČOV byla nastavována škrcením průtoku za pomoci regulačního šoupěte (obr. 20).

Po zpracování naměřených hodnot ve smyslu kapitoly 8.3. byly tyto hodnoty vyneseny do grafu 3 a následným proložením všech charakteristik polynomy, bylo zjištěno, že tyto polynomy jsou prakticky pro všechny míry otevření stejné. Bylo tak dokázáno, v rozsahu zkoušených průtoků, že míra otevření stavidla nemá praktický vliv na tvar a průběh celkové Q/h charakteristiky SK ČOV.

Pro průběh dalších experimentálních prací bylo tedy rozhodnuto, že stavidlo bude trvale otevřeno na 25 % svého rozsahu a simulovaný průtok do technologické linky bude $Q_{\text{čov}} = 3,35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



Graf 3) Vliv míry otevření regulačního stavidla na celkovou Q/h charakteristiku SK ČOV

8.5.2. Nalezení náhradní Q_{svr}/h_s charakteristiky v souvislosti s experimentálně získanými daty

V rámci průběžně získávaných experimentálních výsledků bylo v rámci námi prováděné analýzy voleno několik strategií, jak nejjednodušeji stanovit celkovou Q/h charakteristiku objektu.

Největším problémem byla neustále se měnící celková Q/h charakteristika v závislosti na poloze tabulového uzávěru, resp. hodnotě parametru Z . Měřením a následným zpracováním hodnot jsme získali nekonečné množství Q/h charakteristik v závislosti na změně výškové odlehlosti mezi přelivnými hranami předmětných přelivů.

Jako výsledná strategie byl vybrán postup vycházející z korekce prostého součtu dvou průtoků, které odpovídají příslušné přepadové výšce ve smyslu vztahu:

$$Q_{svr_reg} = \beta Q_{sum}^{\gamma} = \beta (Q_s + Q_t)^{\gamma}; \quad (8.12)$$

kde Q_{svr_reg} je odlehčovaný průtok do řeky Svatky, Q_s je průtok přepadající přes pevný stavidlový uzávěr a Q_t je průtok přepadající přes pohyblivý tabulový uzávěr. Hodnoty součinitele β a γ jsou stanoveny na základě experimentálních prací na modelu.

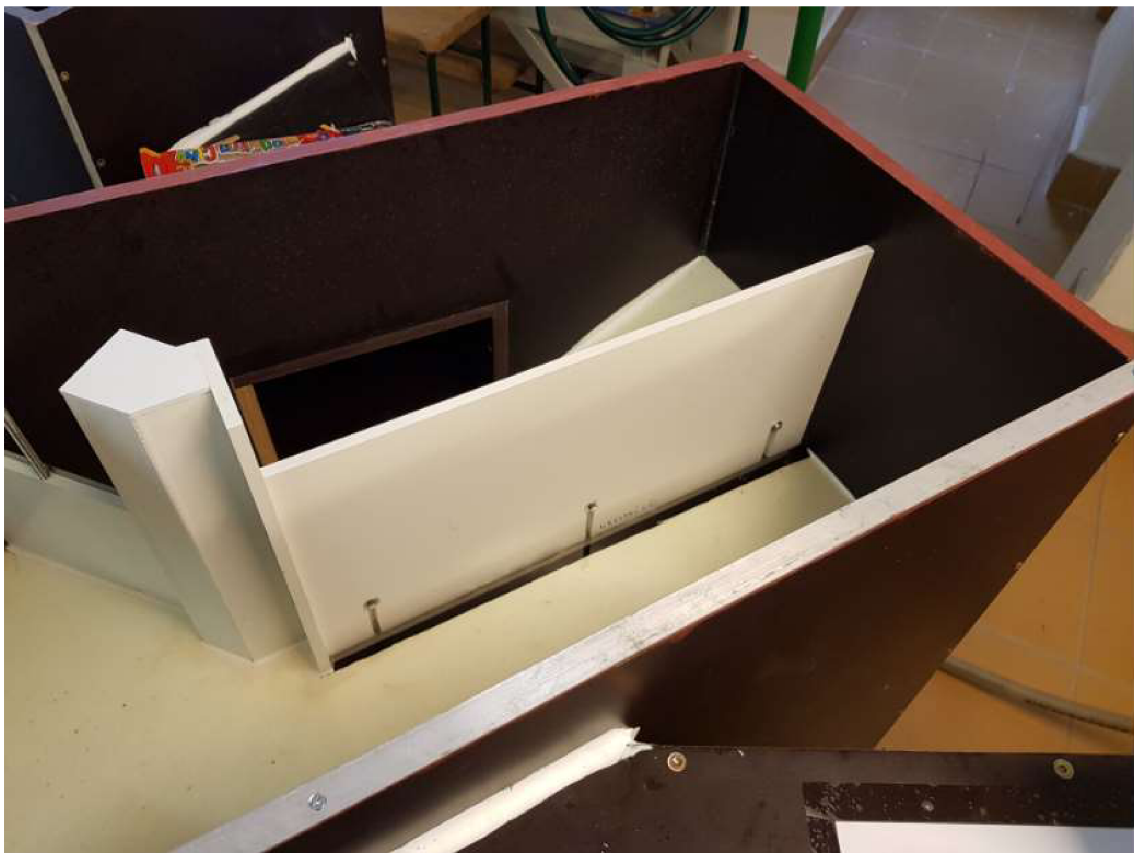
Stanovením funkčních závislostí Q_s/h_s a Q_v/h_t a následným porovnáním součtů příslušných stanovených průtoků s charakteristikami, které byly stanoveny v rámci experimentálních prací pro různé hodnoty parametru Z , získáme součinitele β a γ .

Z tohoto důvodu byly experimentální práce zaměřeny na stanovení Q_s/h_s charakteristiky, Q_v/h_t charakteristiky a součinitelů β a γ .

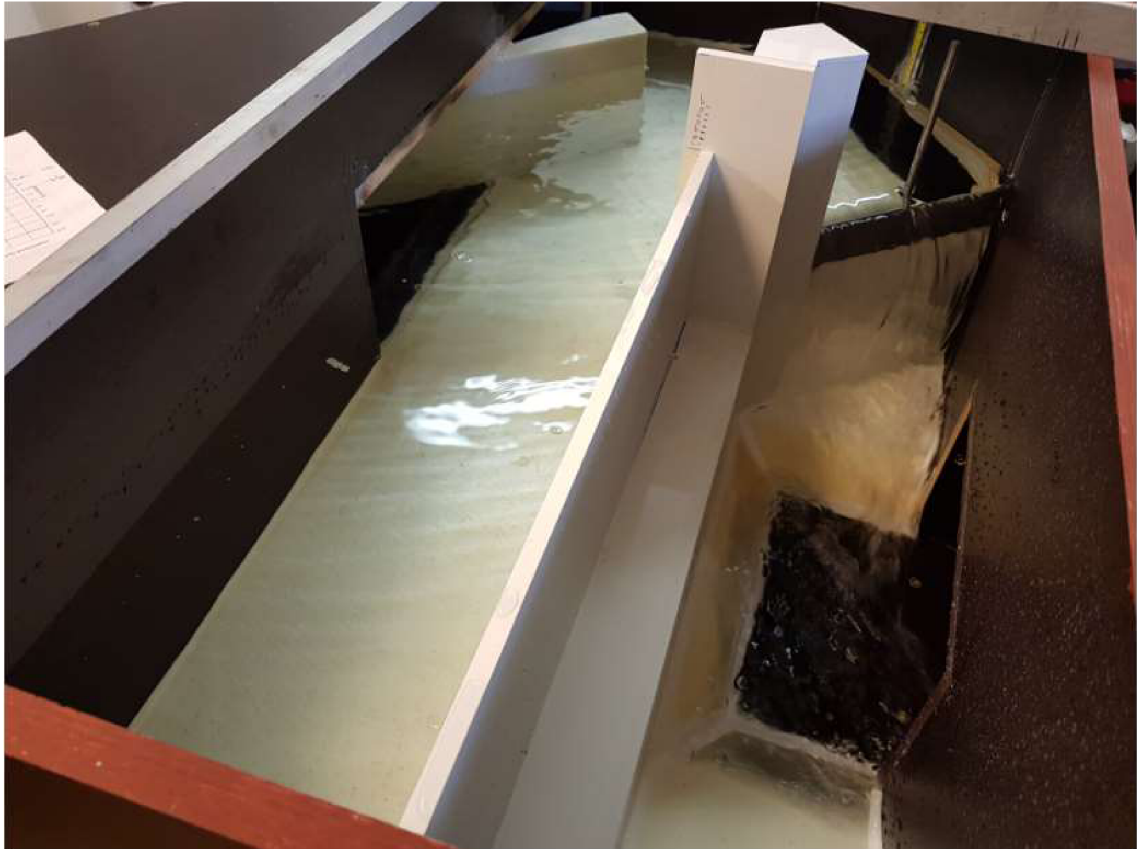
8.5.3. Experimentální stanovení Q_s/h_s charakteristiky pevného stavidla

Hlavním cílem druhé části experimentálních prací bylo stanovení Q/h charakteristiky pevného stavidla. Muselo být tedy zajištěno, aby v celém rozsahu přepadových výšek docházelo k přepadu vody pouze přes pevné stavidlo. Z tohoto důvodu byla do drážek pro tabulový uzávěr zasunuta deska (patrná z obr. 24), která nám tuto podmínku zajistila.

Následně bylo provedeno měření Q/h charakteristiky, kdy směrem do technologické linky ČOV odtékal již zmíněný průtok $Q_{\text{čov}} = 3,35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ při míře otevření stavidla 25 %. Přes pevné stavidlo pak volně přepadala voda v rozsahu hodnot od $0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $3,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr. 24) Umístění desky pro zajištění přepadu pouze přes pevné stavidlo



Obr. 25) Měření s podmínkou přepadu pouze přes pevné stavidlo

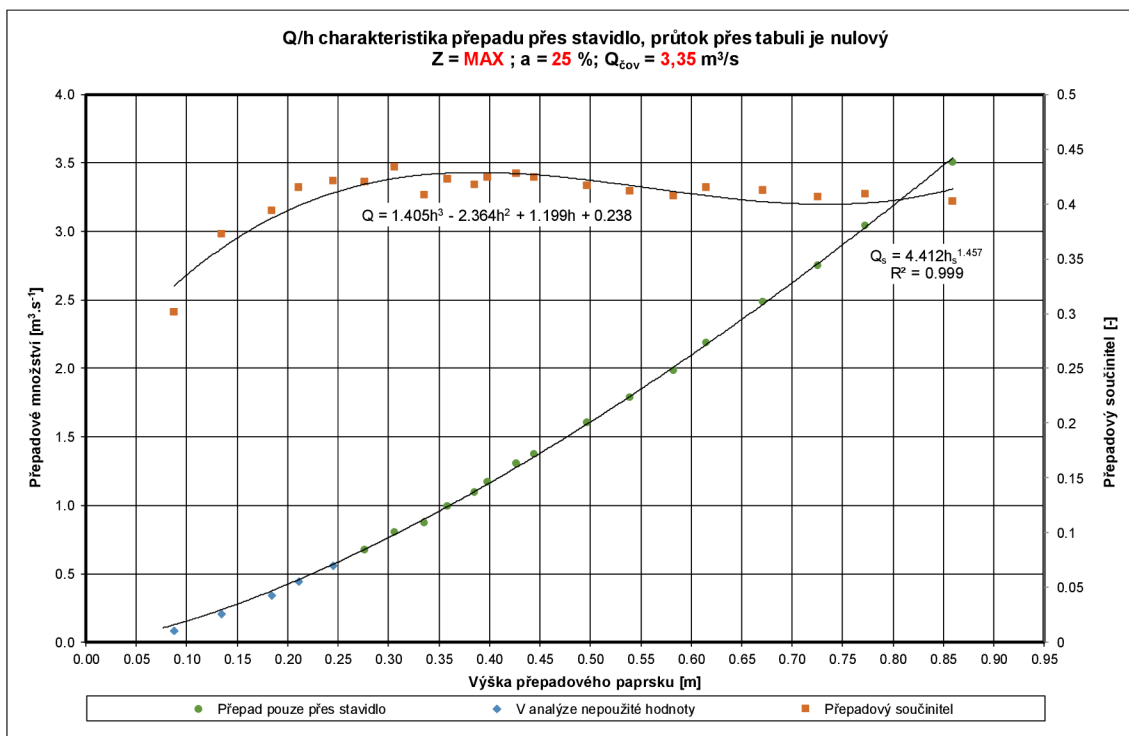
V dalším kroku byly všechny zpracované naměřené hodnoty vyneseny do grafu a ve smyslu (8.11) proloženy monotónní mocninnou funkcí popisující stanovení průtoku vody přepadajícího přes stavidlo:

$$Q_s = A h_s^B = 4,4120 h_s^{1,4565}. \quad (8.13)$$

V grafu 4 je dále také znázorněn průběh hodnoty přepadového součinitele určeného dle vztahu (3.3), na kterém je možné si povšimnout poklesu hodnoty přepadového součinitele u hodnot menších než 0,2 m. Tento pokles je s největší pravděpodobností způsoben vlivem povrchového napětí na přepadový jev, zmíněného v podkapitole 8.1.5. Hodnota výšky přepadového paprsku 0,2 m pak odpovídá průtoku okolo $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, což je též patrné z grafu 4.

Protože se těmito hodnotám stanovených za nízkých přepadových výšek díky uvedenému vlivu povrchového napětí nedá důvěřovat, byly z analýzy odebrány (modře vyznačené hodnoty). Pro analýzu byly následně použity pouze vyšší hodnoty s okrajovou podmínkou, že nulový průtok nastává při nulové přepadové výšce, tj. když $h_s = 0 \text{ m}$, tak

$Q_s = 0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Pokud $h_s > 0 \text{ m}$ pak pro výpočet Q_s využijeme v celém rozsahu hodnoty určené ze vztahu (8.13).

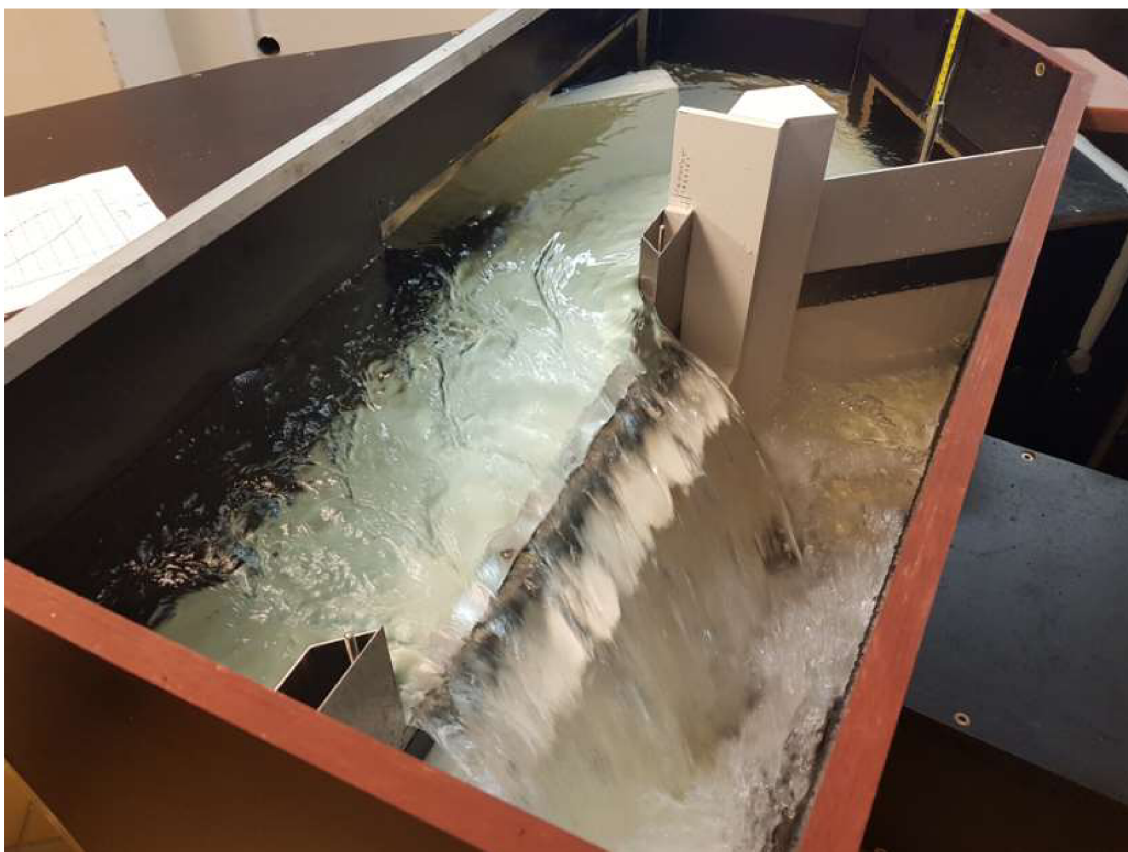


Graf 4) Q/h charakteristika pevného stavidla

8.5.4. Experimentální stanovení Q_t/h_t charakteristiky pohyblivého tabulového uzávěru

Stanovení Q/h charakteristiky v podmínkách, kdy voda přepadá pouze přes tabulový uzávěr, bylo realizováno obdobně jako v případě, kdy voda přepadala pouze přes pevné stavidlo (podkapitola 8.5.3.). K přepadu vody na pevném stavidle bylo zabráněno vložím plastové stěny. Jelikož bylo nutné stanovit Q/h charakteristiky pro různé polohy hrany tabulového uzávěru, tedy pro různé hodnoty parametru Z , rozsah měření byl zde větší.

Měření Q/h charakteristiky bylo provedeno celkem pro čtyři různé výškové úrovně přelivné hrany tabulového uzávěru, a to konkrétně pro hodnoty parametru $Z = -0,208 \text{ m}$, $Z = -0,061 \text{ m}$, $Z = 0,084 \text{ m}$ a $Z = 0,232 \text{ m}$. Následně byly všechny hodnoty zpracované ve smyslu kapitoly 8.3. vyneseny do grafu 5 a proloženy mocninnou funkcí.

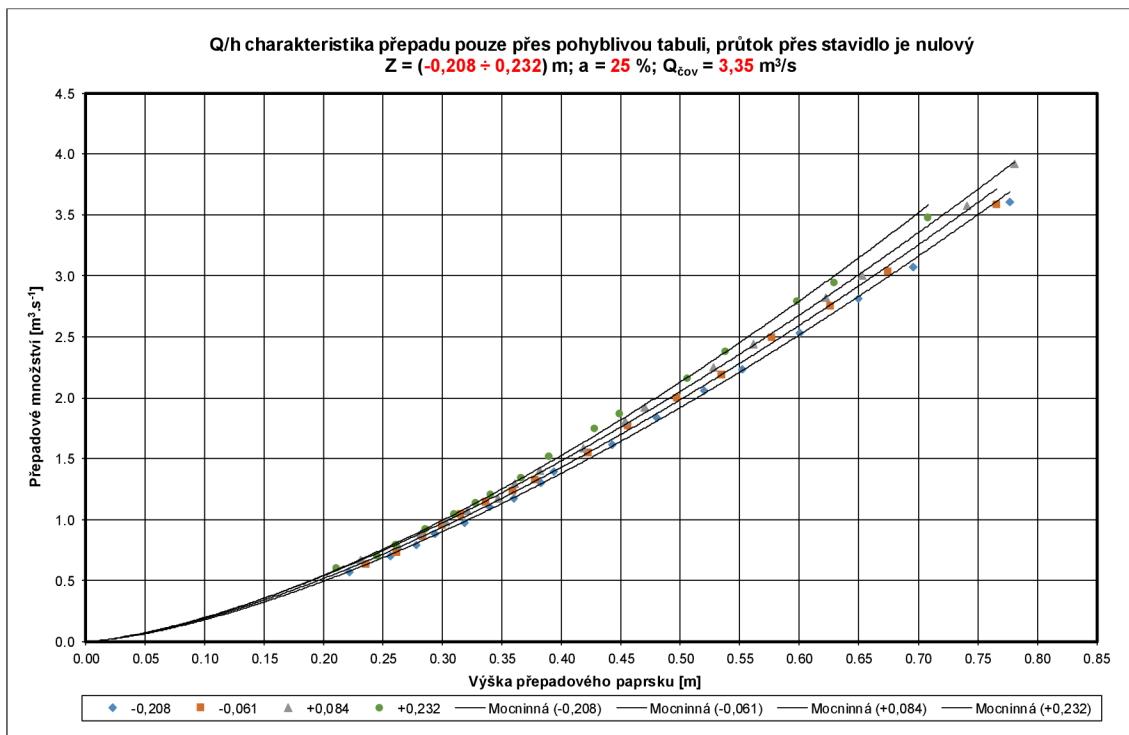


Obr. 26) Měření přepadu pouze přes tabulový uzávěr

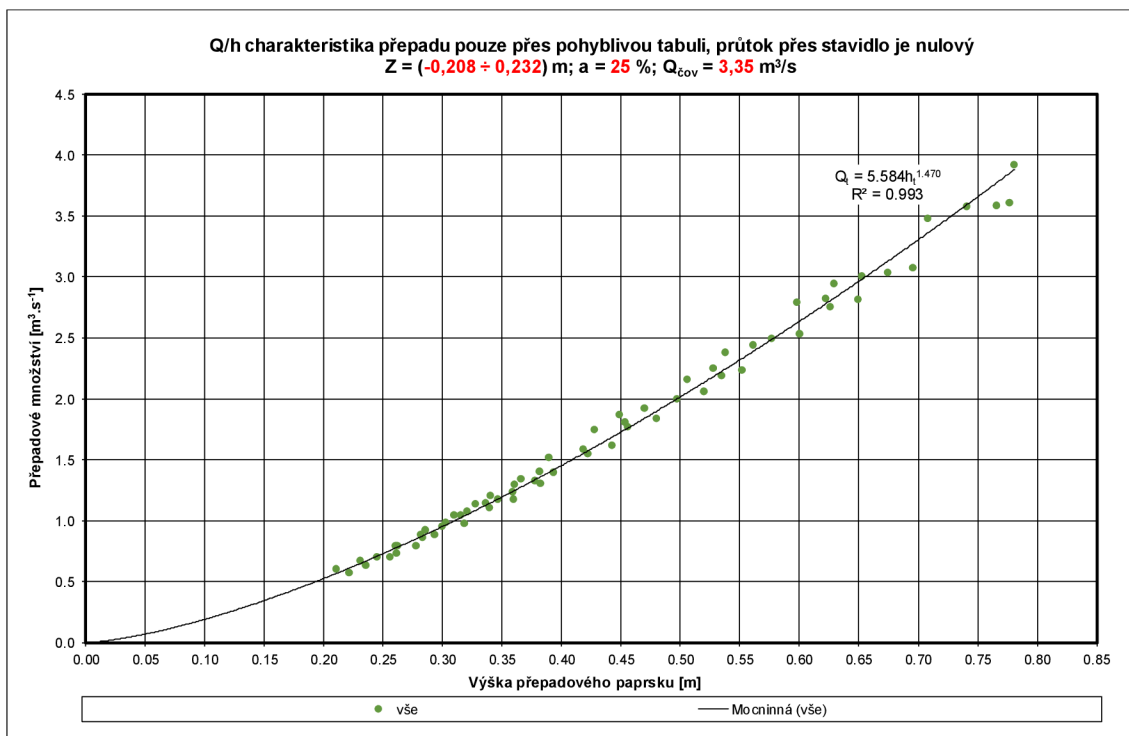
Z grafu 5 je patrné, že se Q/h charakteristika v závislosti na poloze tabulového uzávěru mění, tj. čím vyšší průtok, tím větší rozdíly mezi získanými daty. I v tomto případě byly hodnoty stanovené za nízkých přepadových výšek (nižších jak 0,2 m) odebrány z analýzy, z již výše zmíněných důvodů. Proto zde platí podmínka, když $h_t = 0$ m, tak $Q_t = 0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a pokud bude $h_t > 0$ m, tak pro výpočet Q_t využijeme vztahu (8.14).

S ohledem na výsledný průtok odlehčovaný do řeky Svratky, který je dle vztahu (8.12) korigovaným součtem dvou průtoků Q_s a Q_t , bylo dále možné, pro zjednodušení, proložit získané charakteristiky (graf 5) jednou „průměrnou“ charakteristikou, která je patrná z grafu 6 za pomoci mocninné funkce ve smyslu (8.11) tvarem:

$$Q_t = C h_t^D = 5,5838 h_t^{1,4698}. \quad (8.14)$$



Graf 5) Q/h charakteristika pohyblivého tabulového uzávěru pro jeho různé výškové úrovně

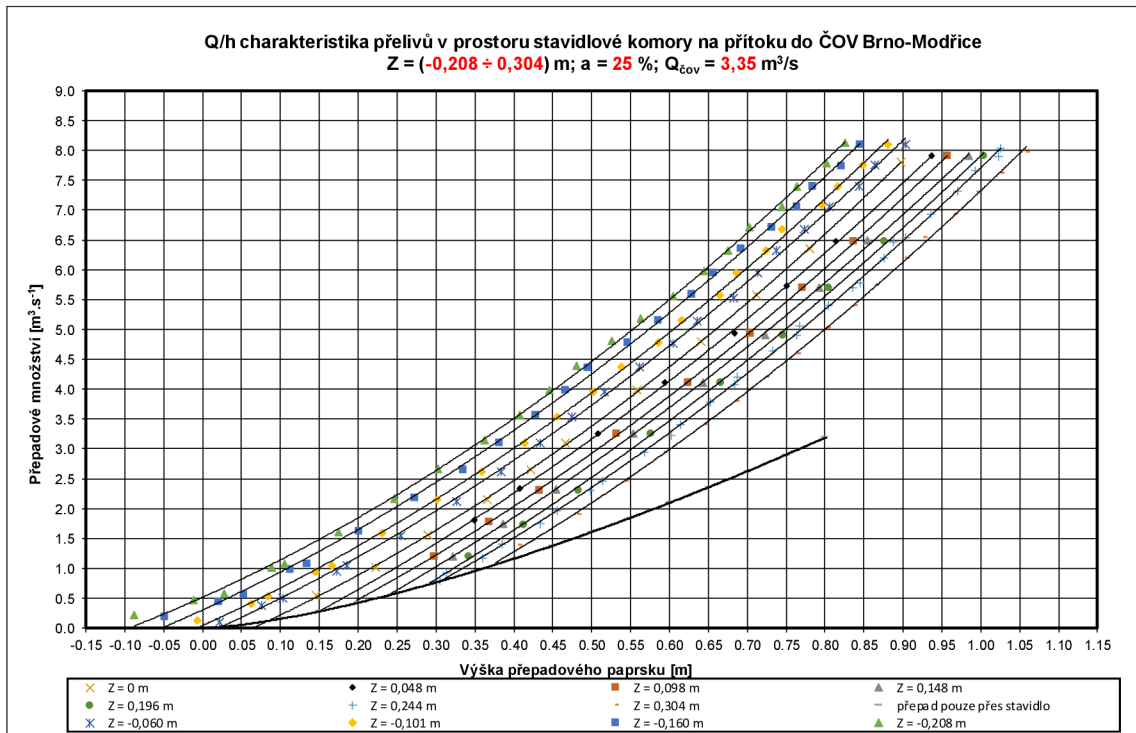


Graf 6) Souhrnná „průměrná“ charakteristika pohyblivého tabulového uzávěru

8.5.5. Experimentální stanovení souhrnné Q_{Svr}/h_s charakteristiky

V této části měření bylo nutné získat řadu komplexních Q/h charakteristik, které vystihují celý přepadový jev při měnící se úrovni přelivné hrany tabulového uzávěru Z , a to z důvodu získání parametrů β a γ uvedených ve vztahu (8.12) a korigovat tak prostý součet průtoků Q_s a Q_t (tedy Q_{sum}).

Měření bylo provedeno celkem pro 11 úrovní hrany tabulového uzávěru Z . Ta byla vzhledem k technickým možnostem pohybovacího mechanismu tabulového uzávěru volena v intervalu $Z \in (-0,208; 0,304)$ m. V následujícím grafu 7 jsou uvedeny Q/h charakteristiky pro všech 11 úrovní hrany tabulového uzávěru Z včetně Q/h charakteristiky pro přepad vody přes pevné stavidlo ve smyslu vztahu (8.13).



Graf 7) Q/h charakteristiky SK ČOV stanovených v rozsahu $Z \in (-0,208; 0,304)$ m

Pro stanovení přepadové výšky byla měřena hodnota h_s ve stejném místě jako u předchozích měření. Z obr. 27 a obr. 28 je patrné měření při kladných i záporných hodnotách parametru Z .



Obr. 27) Měření celkové Q/h charakteristiky SK ČOV při hodnotě $Z = - 0,208$ m



Obr. 28) Měření celkové Q/h charakteristiky SK ČOV při hodnotě $Z = + 0,244$ m

Po zpracování všech naměřených hodnot ($Q_{Svr_měř}$), pro všech 11 úrovní hrany Z , byla data proložena polynomem ve smyslu (8.10) a získané koeficienty polynomu byly použity k další analýze. Výsledná charakteristika byla, pro příliš nízké přepadové výšky, v rámci analýzy nahrazena vhodnou extrapolací vycházející ze vztahů (8.13) a (8.14)

Z následujícího grafu 8 je patrné, že shoda mezi prostým součtem průtoků Q_{Sum} a měřenými daty $Q_{Svr_měř}$ je relativně dobrá, ovšem u zvyšujících se hodnot rozdíl mezi hodnotami roste. Proto bylo nutné najít takové parametry β a γ ve smyslu vztahu (8.12), kterými je možné korigovat prostý součet průtoků na hodnoty stanovené měřením. Pro jejich stanovení byla v programu Microsoft Excel použita regresní analýza.

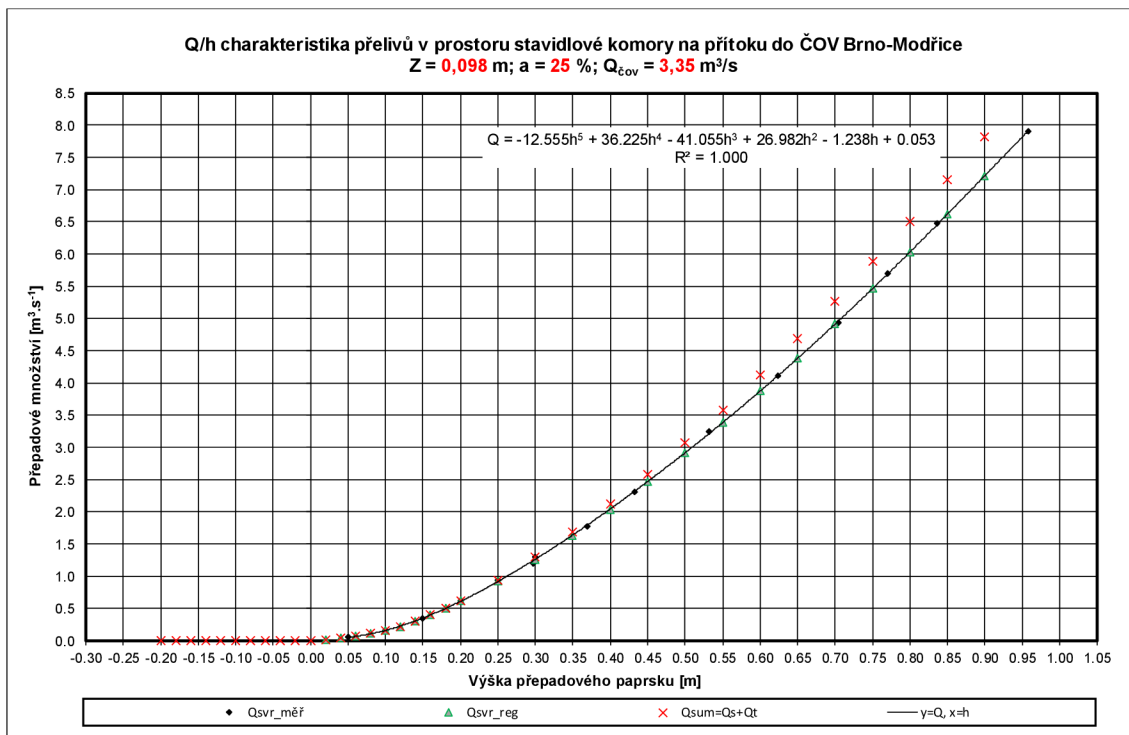
Pro případ grafu 8 jsou tyto hodnoty $\beta = 0,98$ a $\gamma = 0,97$. Následným dosazením těchto hodnot do vztahu (8.12) lze stanovit výslednou charakteristiku Q_{Svr_reg} , která je též vyznačena v grafu 8. Zmíněné hodnoty parametrů β a γ jsou ale platné pouze pro případ hodnot zobrazených v grafu 8, kdy je hodnota parametru $Z = 0,098$ m.

Abychom tedy získali korekční parametry β a γ pro zbývajících 10 změřených charakteristik byl opět aplikován výše popsany postup.

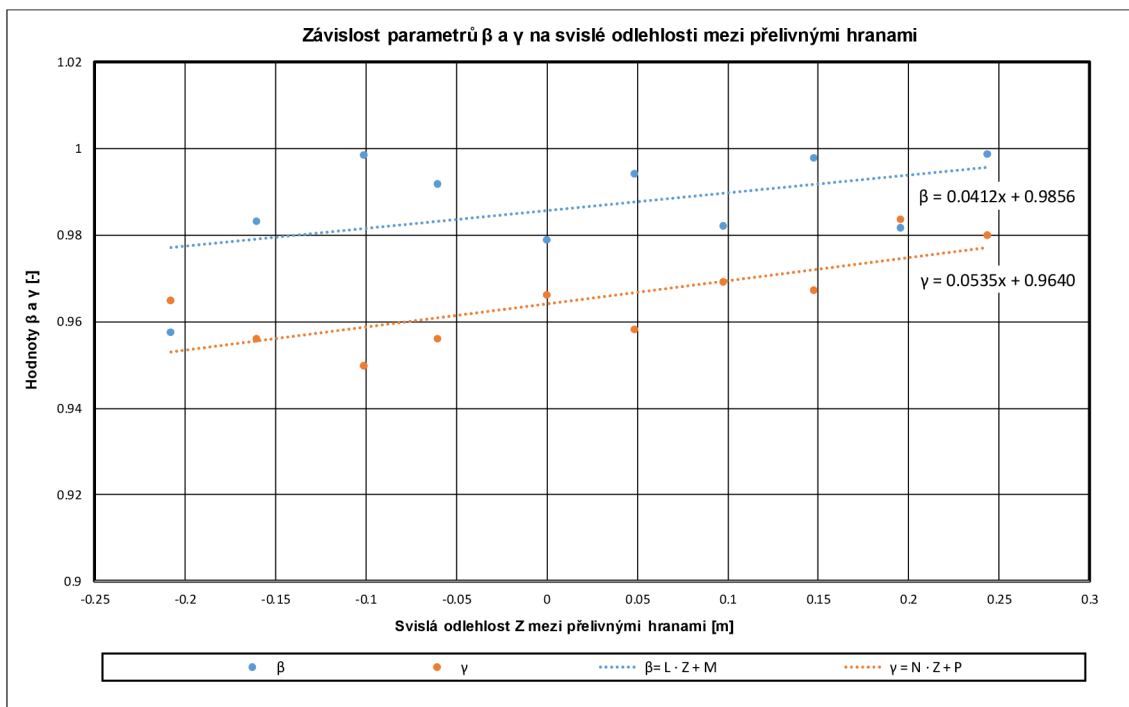
Následně byly získané hodnoty všech parametrů β a γ vyneseny do grafu 9 v závislosti na parametru Z a proloženy lineárními funkcemi, které lze popsat:

$$\beta = L Z + M = 0,0412 Z + 0,9856; \quad (8.15)$$

$$\gamma = N Z + P = 0,0535 Z + 0,9640. \quad (8.16)$$



Graf 8) Celková Q/h charakteristika SK ČOV při Z = 0,098 m



Graf 9) Nalezení lineárních funkcí pro hodnoty β a γ

9. DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ MOŽNÉ ZKOUŠKY

Všechna měření příslušných Q/h charakteristik SK ČOV byla prováděna za dokonalého přepadu, tedy bez ovlivnění přepadového jevu úrovní hladiny dolní vody od řeky Svratky. V případě, že dojde k protiproudání vzduší a zatopení přelivných hran (nedokonalý přepad), tak jak bylo popsáno v kapitole 6.1., může být při vysokém stupni zatopení výsledný průtok i nulový, ovšem nově navržený měřicí systém bude vykazovat hodnotu průtoku Q odpovídající příslušné přepadové výšce h .

Pro další možné modelové zkoušky je tak doporučeno měření v podmínkách, kdy dojde k zatopení přelivných hran v prostoru SK ČOV. Tímto měřením by došlo k rozšíření provedených výzkumných prací o stanovení příslušné náhradní funkce Q/h charakteristiky, za pomoci které, by bylo zaručeno správné měření průtoku i v případě zatopení přelivných hran SK ČOV.

10. ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala měřením Q/h charakteristiky na fyzikálním hydraulickém modelu (v délkovém měřítku 1:10) stavidlové komory ČOV Brno – Modřice v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Následně se zabývala zpracováním naměřených hodnot a jejich výslednou analýzou.

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

V teoretické části této bakalářské práce byly popsány jednotlivé druhy proudění, typy měřicích systémů, jednotlivé typy snímačů s popisem jejich základních vlastností a také vyhodnocovací jednotky propojené s těmito snímači. Informace uvedené v této části bakalářské práce byly podstatné pro pochopení navazující části praktické.

V této praktické části je nejdříve popsán fyzikální hydraulický model stavidlové komory ČOV Brno – Modřice, hydraulický okruh, použitá měřicí technika a zákony modelové podobnosti. Dále se práce zabývá již vlastním měřením a následným zpracováním naměřených hodnot. Z výsledné analýzy těchto hodnot byl získán matematický vztah pro stanovení průtoku odlehčovaných odpadních vod do řeky Svratky, a to i v případě změny výškové úrovně přelivné hrany tabulového uzávěru stavidlové komory ČOV.

Z provedených experimentálních zkoušek bylo prokázáno, že pro stanovení průtoku a proteklého množství odlehčovaných odpadních vod ze stavidlové komory ČOV do řeky Svratky lze využít dvou stávajících přelivných hran. Tyto hrany představují pevné stavidlo a pohyblivý tabulový uzávěr. Aby bylo možné využít jednoznačné Q/h charakteristiky pro stanovení konkrétního přepadového množství odlehčovaných odpadních vod do řeky Svratky, byly v rámci experimentálních prací navrženy a doporučeny úpravy přelivné hrany pohyblivého uzávěru v prostoru stavidlové komory ČOV.

Na základě získaných výsledků tak bude možné realizovat nový měřicí systém průtoku a proteklého objemu odlehčovaných vod do řeky Svratky. Lze tedy považovat provedené

experimentální práce za úspěšné a prakticky aplikovatelné. V závěru této bakalářské práce je také zmíněno doporučení pro další možné zkoušky.

11. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. **JANDORA, Jan a Jan ŠULC.** *Hydraulika: modul 01.* Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 978-80-7204-512-9.
2. **JANDORA, Jan.** *Vodohospodářské stavby: Modul 01 Základy hydrauliky.* 2004.
3. **MATTAS, Daniel.** *Výpočet průtoku v otevřených korytech .* Praha : Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, 2014. ISBN 978-80-87402-27-6.
4. **ŽOUŽELA, M.** *Měřicí systémy proteklého množství vody užívané v profilech s volnou hladinou. Metrologie.* 3/2008. str. 10-16.
5. **ŽOUŽELA, M.** *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.
6. **DURČÁK, Pavel.** Excel 2019: *Spojnice trendu.* www.napocitaci.cz. [Online] 21. 5. 2019. [Citace: 17. 4. 2020] <https://www.napocitaci.cz/33/excel-2019-spojnice-trendu-uniqueidgOkE4NvrWuNY54vrLeM675phXqvIrYfM1UWBS0tlgLw/>.
7. **Microsoft Word 12.** *Korelační analýza.* kps.pedf.cuni.cz. [Online] 26. 11. 2014. [Citace: 17. 4. 2020.] <http://kps.pedf.cuni.cz/skalouda/pokrocili/korelacni.htm>.
8. **BOOR, Boris, Cyril PATOČKA a Jiří KUNŠTÁTSKÝ.** *Hydraulika pro vodohospodářské stavby.* Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1968.
9. **TNV 25 9305.** *Měřicí systémy proteklého objemu vody v profilech s volnou hladinou.* Praha : HYDROPROJEKT CZ a.s., 2012.
10. **BOHÁČ, Daniel.** *Stanovení Q/H charakteristiky atypického měrného žlabu.* Brno, 2019, 71 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. MICHAL ŽOUŽELA, Ph.D.
11. **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. Brno: LVV – FAST – VUT v Brně, 2019.

12. SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

SEZNAM SYMBOLŮ:

Označení	Popis
A, B, C, D, E	Regresní koeficienty (-)
B	Šířka koryta v hladině (m)
B_k (m)	Šířka koryta v hladině během kritického proudění
b	Šířka přelivné hrany (m)
C	Chézyho rychlostní součinitel ($m^{0,5} \cdot s^{-1}$)
E	Energetická výška (m)
f	Funkční závislost (-)
Fr	Froudovo číslo (-)
g	Gravitační tíhové zrychlení ($m \cdot s^{-2}$)
h	Výška přepadového paprsku (m)
h_t	Přepadová výška na hraně tabulového uzávěru (m)
h_s	Přepadová výška na hraně pevného stavidla (m)
h_s	Střední hloubka průřezu (m)
h_{skut}	Přepadová výška na díle (m)
h_k	Kritická hloubka (m)
H	Hloubka vody (m)
i	Podélný sklon čáry energie (-)
k	Kalibrační součinitel (-)
l_s	Délka vztažená na dílo (m)
l_m	Délka vztažená na model (m)
m	Bazinův přepadový součinitel (-)

M 1:10	Model v délkovém měřítku 1:10 (-)
Q	Průtok ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
$Q_{\text{př}}$	Průtok přitékající do modelu ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
$Q_{\text{čov}}$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Průtok přitékající do technologické linky ČOV
Q_{Svr}	Průtok odlehčovaný do řeky Svratky ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
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_{t}	Průtok přepadající přes tabulový uzávěr ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
Q_{s}	Průtok přepadající přes pevné stavidlo ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
Q_{reg}	Regresní průtok ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
Q_{sum}	Součet průtoků Q_{s} a Q_{t} ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
$Q_{\text{měř}}$	Měřený průtok na modelu ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
R	Hydraulický poloměr (m)
R	Koeficient korelace (-)
R^2	Koeficient determinace (-)
Re	Reynoldsovo kritérium (-)
S	Průtočná plocha (m^2)
S_{k}	Průtočná plocha během kritického proudění (m^2)
S_1	Odlehlost přelivné hrany od dolního dna (m)
S_x, S_y	Směrodatná odchylka (-)
S_{xy}	Kovariance proměnných X a Y (-)
u	Rychlost vykazovaná snímačem ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
v	Průřezová rychlost ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
v_s	Průřezová rychlost vztažená na dílo ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

v_m	Průřezová rychlost vztažená na model ($m \cdot s^{-1}$)
X, Y	Proměnné hodnoty (-)
Z	Svislá odlehlost mezi přelivnými hranami (m)
α	Coriolisovo číslo (-)
β, γ	Korekční parametry (-)
U	Kinematická viskozita kapaliny (-)

SEZNAM ZKRATEK:

SK	Stavidlová komora
ČOV	Čistírna odpadních vod
OV	Odpadní vody
LVV	Laboratoř vodohospodářského výzkumu
DN	Dešťová nádrž
DN 100, DN 150, DN 200	Jmenovitá světlost potrubí

13. SEZNAM PŘÍLOH

Grafické zpracování naměřených dat

- P1 Q/h charakteristika přelivů v prostoru stavidlové komory na přítoku do ČOV Brno-Modřice pro různé míry otevření regulačního stavidla
- P2 Q/h charakteristika přepadu přes stavidlo, průtok přes tabuli je nulový
- P3 Q/h charakteristika přepadu pouze přes pohyblivou tabuli, průtok přes stavidlo je nulový
- P4 Q/h charakteristika přelivů stavidlové komory na přítoku do ČOV Brno-Modřice pro různé úrovně tabulového uzávěru $Z \in (-0,208; 0,304)$ m
- P5 Nalezení lineárních funkcí pro hodnoty β a γ