ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra hydrotechniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Ověření hydraulické funkce sdruženého objektu malých vodních nádrží a suchých nádrží na fyzikálním modelu

Verification of the hydraulic function of the combined structure of small water reservoirs and dry reservoirs on a physical model

Vedoucí diplomové práce doc. Dr. Ing. Pavel Fošumpaur

Veronika Táboříková

Květen 2022

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Táboříková Jméno: Veronika Osobní číslo: 468317

Zadávající katedra: 142 - Katedra hydrotechniky

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Ověření hydraulické funkce sdruženého objektu malých vodních nádrží a suchých nádrží na fyzikálním modelu

Název diplomové práce anglicky: Verification of the hydraulic function of the combined structure of small water reservoirs and dry reservoirs on a physical model

Pokyny pro vypracování:
Malé vodní nádrže a suché nádrže jsou často vybaveny sdruženým objektem, který kombinuje funkci spodní výpusti a bezpečnostního přelivu. Sdružený objekt je koncipován zpravidla jako bezobslužný bez možnosti manipulace. Hydraulický návrh zpravidla vyžaduje zajištění neškodného odtoku do úrovně přelivné hrany bezpečnostního přelivu. Během převádění povodňových průtoků ovlivňuje kapacitu objektu nejenom kapacita přelivu, ale také kapacita spadiště a odpadu pod hrází. Proudění je dále ovlivněno interakcí průtoku spodní výpustí a přepadu přes přeliv. Cílem diplomové práce je analyzovat hydraulické řešení sdruženého objektu s využitím experimentálních dat získaných na fyzikálním modelu a doporučit vhodný výpočetní přístup pro potřeby inženýrské praxe.

Seznam doporučené literatury:
Broža, V., Kratochvíl, P., Peter, P., Votruba, L.: Přehrady. SNTL/ALFA, Praha 1987.
Čábelka, J., Gabriel, P.: Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice. Academia Praha 1987.
Říha, J., Sedláček, M., Smrž, P., Veselý R., Žatecký, S.: Návrh a realizace suchých nádrží z pohledu technickobezpečnostního dohledu. MŽP ČR, Praha, 2014.
Havlík, V., Marešová, I.: Hydraulika, příklady. ČVUT v Praze, 1990.

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Dr. Ing. Pavel Fošumpaur

Datum zadání diplomové práce: 14.2.2021 Termín odevzdání diplomové práce: [redacted]

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

[redacted]

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce" a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací".

[redacted]

Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Ověření hydraulické funkce sdruženého objektu malých vodních a suchých nádrží na fyzikálním modelu* vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité podklady pro vypracování diplomové práce.

……. …….

Místo, datum Podpis

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce za možnost uskutečnit výzkum na fyzikálním modelu sdruženého objektu, za odborné rady a za odborné vedení. Dále děkuji všem lidem, kteří mi pomohli s fyzikálním modelem a kteří mi dali užitečné rady.

Anotace

Funkční objekty malých vodních nádrží nebo suchých nádrží jsou v současnosti řešeny i formou sdruženého objektu. Funkční objekt kombinuje alespoň dvě odlišná funkční zařízení, nejčastěji bezpečnostní přeliv a výpustné zařízení. Při proudění vody sdruženým objektem vznikají složitější hydraulické jevy. Vzájemnou interakcí proudění výpustí a přepadem přes bezpečnostní přeliv se ovlivňuje nejen průběh hladiny ve sdruženém objektu, ale i jeho kapacita. Cílem diplomové práce je analyzovat hydraulické řešení sdruženého objektu s využitím experimentálních dat získaných na fyzikálním modelu a doporučit vhodné výpočetní přístupy pro potřeby inženýrské praxe.

Klíčová slova

sdružený objekt, fyzikální model, proudění

Anotation

Functional objects in small water reservoirs and dry reservoirs are currently also solved in the form of a combined structure. The functional object consists of at least two differrent functional objects, most often an outlet structure and a safety spillway. Complicated hydraulic phenomena ocur when water flows through the combined structure. Reciprocal interaction flow of the outlet structure and overflow through the safety spilway affects not only the course of the level, but also the capacity of combinated structure. The aim of diploma thesis is to analyze the hydraulic solution of the combinated structure with using experimental information obtained on a physical model. Also the aim is to recommend a suitable computational approach for the needs of engineering practice.

Keywords

combinated object, physical model, flow

Obsah

1. Úvod 13
2. Terminologie 14
2.1 Malá vodní nádrž 14
2.2 Suchá nádrž 15
2.3 Funkční zařízení 16
2.3.1 Bezpečnostní přeliv 16
2.3.2 Výpustná zařízení (výpusti) 19
2.3.3 Sdružený objekt 22
3. Fyzikální model sdruženého objektu 28
3.1 Definice fyzikálního modelování 28
3.2 Cíle fyzikálního modelování 28
3.3 Fyzikální model sdruženého objektu 28
3.4 Experimenty na fyzikálním modelu – popis a výsledky 32
3.4.1 Experiment „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“ 32
3.4.2 Experiment „bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí“ 38
4. Hydraulické výpočty 48
4.1 Konzumční křivka bezpečnostního přelivu – teorie 48
4.2 Konzumční křivka bezpečnostního přelivu – výsledky 52
4.3 Konzumční křivka výpusti – teorie 55
4.3.1 Proudění výpustí před dosažením horní hladiny úrovně přelivné hrany 55
4.3.2 Proudění výpusti po dosažení horní hladiny úrovně přelivné hrany 59
4.4 Konzumční křivka výpusti – výsledky 59
4.5 Konzumční křivka sdruženého objektu – teorie 61
4.6 Konzumční křivka sdruženého objektu – výsledky 61
4.7 Průběh hladiny ve spadišti a v odpadní chodbě – teorie 66
4.7.1 Literatura – doporučení pro průběh hladiny a návrh spadiště i odpadu 66
4.7.2 Spadiště 67
4.7.3 Odpadní chodba 69
4.8 Průběh hladiny ve spadišti a v odpadní chodbě – výsledky 72
4.8.1 Průběh hladiny ve spadišti a v odpadní chodbě při nezahlceném vtoku odpadní chodby 72
4.8.2 Průběh hladiny ve spadišti a v odpadní chodbě při zahlceném vtoku odpadní chodby 80
4.9 Rekapitulace s rozpravou 84

5. Závěr 90
6. Literatura 92
7. Seznam 94
7.1 Seznam příloh 94
7.2 Seznam obrázků, tabulek a grafů 94
7.2.1 Seznam obrázků 94
7.2.2 Seznam grafů 97
7.2.3 Seznam tabulek 99

1. Úvod

Funkční objekty malých vodních nádrží a suchých nádrží se v současnosti řeší i formou sdruženého objektu. Sdružený objekt kombinuje alespoň dvě různá funkční zařízení, obvykle bezpečnostní přeliv a výpustné zařízení (výpust). Ve srovnání s návrhem samostatných oddělených funkčních objektů je sloučení odlišných funkčních zařízení do jednoho sdruženého objektu někdy výhodnější, ať už z pohledu provozního, technického nebo ekonomického. [1] [2] Sloučení funkčních zařízení sebou nese řadu výhod i nevýhod. Příkladem vodního díla vybaveného funkčním objektem typu sdružený objekt je třeba suchá nádrž Čihadlo, suchá nádrž Jelení nebo malá vodní nádrž Neškaredice.

Podle konstrukčního řešení se sdružený objekt dělí na více podtypů. Diplomová práce se zabývá jednopatrovým sdruženým objektem s bezpečnostním přelivem, s výpustí zaústěnou v čelní stěně a se zkráceným uzavřeným odpadem. Pro účely diplomové práce byl postaven fyzikální model sdruženého objektu, jenž se umístil do laboratorního žlabu ve vodohospodářské hale Fakulty stavební Českého vysokého učení technického v Praze.

Než horní hladina v nádrži dosáhne úrovně přelivné hrany bezpečnostního přelivu, převádí průtok pouze výpust. Hydraulický návrh výpusti mnohdy vyžaduje zajištění neškodného odtoku do úrovně přelivné hrany bezpečnostního přelivu. Po vystoupání horní hladiny v nádrži nad úroveň přelivné hrany se přidává k proudění výpusti i přepad přes bezpečnostní přeliv. Vzájemná interakce proudění výpustí a přepadu přes bezpečnostní přeliv ovlivňuje nejen proudění ve sdruženém objektu, ale i jeho kapacitu. Kapacita sdruženého objektu je dána jak kapacitou bezpečnostního přelivu a kapacitou výpusti, tak i kapacitou spadiště, kapacitou odpadu a podmínkami pod hrází. Při proudění sdruženým objektem vznikají ve společných částech funkčního objektu, tj. ve spadišti, v odpadu a ve vývaru, složité hydraulické poměry. V praxi se můžeme setkat se situací, kdy dojde k omezení provozuschopnosti výpusti a kdy zůstává funkční pouze bezpečnostní přeliv. Pro účely diplomové práce se na fyzikálním modelu měřil experiment, kdy je v provozu pouze výpust, kdy je v provozu pouze bezpečnostní přeliv a kdy je v provozu výpust i bezpečnostní přeliv.

Cílem diplomové práce je analyzovat hydraulické řešení sdruženého objektu s využitím experimentálních dat získaných na fyzikálním modelu a doporučit vhodné výpočetní přístupy pro potřeby inženýrské praxe.

2. Terminologie

2.1 Malá vodní nádrž

Vodní nádrž se považuje za malou vodní nádrž, pokud objem po hladinu ovladatelného prostoru (normální hladiny) činí maximálně 2 mil. m^3 a pokud hloubka nádrže není větší než 9 m. Hloubkou nádrže se rozumí svislá vzdálenost nejníže položeného místa dna nádrže od maximální hladiny. Hladina ovladatelného prostoru je úroveň hladiny v nádrži rovna kótě nejnižší části přelivné hrany nebo úrovně horní hrany hrazeného přelivu. [3]

Malé vodní nádrže se mohou členit na základě různých kritérií. Například podle polohy nádrže vůči vodnímu toku se dělí na průtočné (neboli protékané) a neprůtočné (neboli neprotékané, např. boční či břehové). [1] [4] Norma ČSN 75 2410 *Malé vodní nádrže* dělí malé vodní nádrže podle jejich funkce na:

- Zásobní nádrže – akumulují vodu za účelem hospodaření v době nadbytku a nedostatku. Mezi zásobní nádrže patří například vodárenská nádrž, závlahová nádrž nebo kompenzační nádrž. [3]
- Ochranné (retenční) nádrže – slouží k zachycování povodňových odtoků, k transformaci povodňové vlny a k ochraně území (krajiny, objektů, zařízení, …) před negativním účinkem povodňových událostí v území pod vodním dílem. Mezi ochranné nádrže patří vodní díla, u nichž je jejich ochranná funkce dominantní nebo alespoň převažující. Do kategorie ochranné nádrže patří například suchá ochranná nádrž, protierozní nádrž, ochranná nádrž s malým zásobním prostorem apod. [3] [1]
- Čisticí nádrže – slouží k úpravě vlastnosti vody. Do kategorie spadá například chladicí nádrž, předehřívací nádrž či usazovací nádrž. [3]
- Rybochovné nádrže – vytváří ideální podmínky pro chov ryb. Do kategorie patří například výtěrový rybník, třecí rybník, hlavní rybník nebo sádky. [3]
- Hospodářské nádrže – slouží k plnění konkrétních hospodářských funcích. Mezi hospodářské nádrže se řadí například požární nádrž, výtopová nádrž či nádrž pro chov vodní drůbeže. [3]
- Speciální účelové nádrže – slouží pro konkrétní provozní potřeby a účely. Do kategorie spadá například vyrovnávací nádrž, přečerpávací nádrž a jiné [3]
- Asanační nádrže – slouží k asanaci území. Mezi asanační nádrže patří například záchytná nádrž nebo umělá laguna. [3]
- Rekreační nádrže – Slouží k rekreačním účelům. U rekreačních nádrží je přizpůsobené i okolí nádrže. Za rekreační nádrž se považuje například přírodní koupaliště, nádrž pro vodní sporty atd. [3]
- Krajinotvorné nádrže a nádrže v obytné zástavbě – zajišťují zlepšení ekologické nebo estetické funkce daného prostředí. Do kategorie patří například návesní rybník, okrasná nádrž nebo hydromelioračních nádrž. [3]

2.2 Suchá nádrž

Suchá nádrž slouží k ochraně zájmového území před účinkem povodňových událostí. Při průchodu povodňové vlny se zadržením vody v přirozeně nebo uměle vytvořeném ochranném prostoru suché nádrže sníží povodňový průtok pod vodním dílem. Po skončení povodňové události se prostor řízeně vyprazdňuje. Suchá nádrž se zatěžuje nahodile při povodňové události. Celkový objem nádrže odpovídá téměř součtu ovladatelného a neovladatelného ochranného prostoru. V nádrži se může vyskytovat i zanedbatelné, v poměru k celkovému objemu, stálé nadržení. Stále nadržení plní krajinotvornou nebo ekologickou funkci. V době mimo povodňovou událost, kdy suchá nádrž neplní svou ochrannou (retenční) funkci, se může využít prostor suché nádrže k jiným účelům. Plochy v nádrži se využívají převážně k lesnickým nebo k zemědělským účelům. Avšak není vyloučeno pozemky využít i pro jiné záměry, jako k rekreaci, ke sportovním aktivitám apod. Suchá nádrž se považuje za vodní nádrž. [2] [3] [5] [6]

Na území České republiky se nacházejí nejen suché nádrže, které svými parametry odpovídají malým vodním nádržím, ale též i suché nádrže podobné přehradám. [5] Vzhledem k poloze suché nádrže vůči vodnímu toku se rozlišují protékané a neprotékané suché nádrže. Protékaná nádrž leží na vodním toku, jenž protéká napříč vodním dílem, a převádí vzniklé povodňové průtoky na toku. Naopak neprotékaná nádrž se nenachází na vodním toku. Přitéká do ní část povodňových průtoků z přilehlého vodního toku nebo povodňové průtoky z mezipovodí příslušné k nádrži. [6] [2] Suché nádrže se umisťují mnohdy nad obydlenými územími, často v odlehlých oblastech s obtížným přístupem a s rizikem poškození. [5, p. 8] Na území České republiky převládají dominantně suché nádrže se sypanou hrází.

Obr. 1 – Suchá nádrž typu malé vodní nádrže – Suchá nádrž na Klapovském potoce [7]
(pozn. obrázek zmenšen)

Obr. 2 – Suchá nádrž typu přehrady – Suchá nádrž Jelení [8]
(pozn. obrázek zmenšen)

2.3 Funkční zařízení

Malé vodní nádrže i suché nádrže se vybavují funkčními objekty. Funkční objekt představuje stavební objekt, v němž je umístěno funkční zařízení. Funkčním zařízením se rozumí soubor konstrukcí a mechanismů určený pro manipulaci s hladinou, k odběru nebo k vypouštění vody. [2] Funkční objekty malých vodních nádržích zahrnují přelivy, výpustná zařízení, odběrná zařízení pro odběr vody, sdružené funkční objekty nebo speciální objekty (napouštěcí objekt, rozdělovací objekt, …). [3] U suchých nádrží se vyskytují hlavně výpustná zařízení a pojistná zařízení (bezpečnostní nebo nouzový přeliv), popřípadě společný sdružený objekt. Avšak není vyloučeno i použití speciálních objektů. [5] [9]

Při návrhu funkčních objektů se přihlíží k různým požadavkům. Například se zohledňuje bezpečnost vodního díla, spolehlivost vodního díla, optimální vynaložení ekonomických nákladů na výstavbu, provoz, opravy i rekonstrukce, dále zabezpečenost a odolnost proti vnějším zásahům cizích nepovolaných osob, dlouhodobá životnost konstrukce, požadavky na migrační prostupnost apod. Upřednostňují se konstrukce bezobslužné, popřípadě se snadnou obsluhou, a s jednoduchou údržbou. [3] [5] [9] Při návrhu funkčních objektů se dodržují specifické konstrukční zásady.

2.3.1 Bezpečnostní přeliv

Bezpečnostní přeliv patří mezi přelivná bezpečnostní (pojistná) výpustná zařízení. [2] Slouží k neškodnému převedení povodňových průtoků a k zabezpečení tělesa hráze proti přelití. Uvádí se do provozu při stoupání hladiny vody v nádrži nad úroveň přelivné hrany. [10] Bezpečnostní přeliv se dimenzuje mnohdy na návrhový průtok, jenž se odvíjí od kategorie vodního díla. Přeliv rovněž musí splnit požadavek na převedení návrhové kontrolní vlny. [5] Protékané vodní nádrže jsou vždy vybaveny bezpečnostním přelivem. Kapacitu přelivu

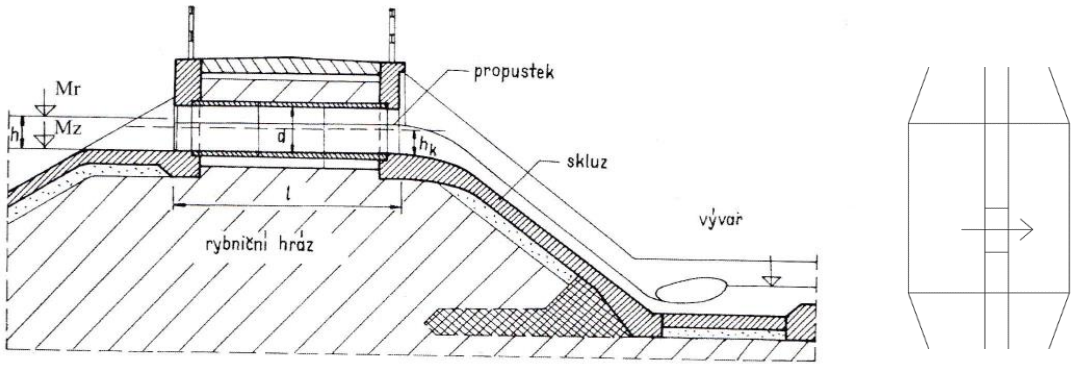
u neprotékaných vodních nádrží je možné za určitých podmínek navrhnout na maximální hodnotu, jež do nádrže maximálně přitéká (přes napouštěcí objekt, z vlastního povodí nádrže). U nebeských (bezodtokových) nádrží se přeliv nevyžaduje. [11]

Bezpečnostní přeliv tvoří více prvků navazujících na sebe. Skládá se z konstrukce přelivu (např. přelivná hrana, spadiště, kašna, uzávěr), z prvků pro odvod vody (skluz, odpadní chodba v tělese hráze nebo štola ražená v boku údolí) a z prvků určených k tlumení kinetické energie vody (vývar, zdrsnění koryta, rozrážeče atd.). [5] Prvky pro odvod vody od přelivů se dělí na otevřené (skluz) nebo uzavřené (odpadní chodba, odpadní štola). Při průchodu odpadu tělesem hráze se nepřipouští tlakové proudění, tj. voda musí proudit o volné hladině. Upřednostňuje se bezobslužný nehrazený přeliv bez pohyblivých částí. [3] [5] Norma ČSN 75 2410 nedoporučuje aplikovat bezpečnostní přeliv nebo odpad náchylný k zahlcení po překročení průtoku, na který byl dimenzován. [3] Podle umístění a konstrukčního uspořádání se rozlišují následující bezpečnostní přelivy:

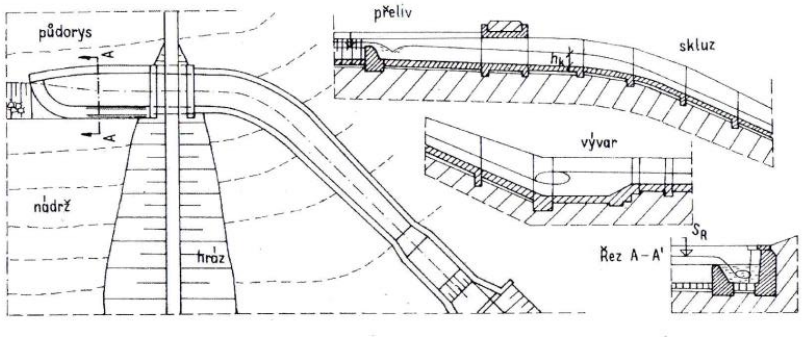
- Čelní (přímý) přeliv, korunový přeliv – přeliv je umístěn v čele hráze nádrže. Samotnou konstrukci čelního přelivu tvoří jezová konstrukce, popřípadě trubní přeliv nebo žlabový přeliv. [11] Voda přepadá přes přelivnou hranu, jež vede rovnoběžně s osou hráze, ve směru vodního toku. [10]
- Boční přeliv – bezpečnostní přeliv je situován mimo těleso hráze při břehu nádrže. Voda z nádrže přepadá přes přelivnou hranu do spadiště převážně příčně (kolmo) na směr vodního toku. Ve spadišti voda mění směr proudění a je odvedena ve směru rovnoběžném s vodním tokem (s přelivnou hranou). [10] [11]
- Postranní přeliv („boční korunový přeliv“) – bezpečnostní přeliv je vybudován jako prodloužení koruny mimo těleso hráze u břehu nádrže. Voda přepadá přes přelivnou hranu ve směru souběžném se směrem vodního toku. [10]
- Šachtový přeliv – voda přepadá přes přelivnou hranu do svislé šachty, jež přechází v dolní části kolenem do odpadní štoly (chodby). [10] [11]
- Kašnový přeliv – usazuje se před hráz nebo zasahuje částečně do hráze. Voda přepadá přes přelivnou hranu do spadiště. Přelivná hrana kašnového přelivu bývá v půdorysu půlkruhovitá, poloeliptická, kombinovaná nebo má nepravidelný tvar. [2] [10] [11]
- Žlabový přeliv – voda přepadá přes přelivnou hranu do protáhlého spadiště (ve tvaru žlabu), kde mění směr proudění (podobně jako u bočního přelivu). Přeliv je často oboustranný, ale bývá i jednostranný nebo ve tvaru kachního zobáku. [2] [10] [12] Některá literatura zařazuje žlabový přeliv pod kašnový bezpečnostní přeliv.
- Speciální přelivy (např. nouzový nebo násoskový)

  Například nouzový přeliv je obdobou bezpečnostního přelivu. Slouží jako bezpečnostní rezerva pro případ výskytu průtoků vyšších než návrhový a kontrolní průtok pro bezpečnostní přeliv nebo při mimořádných situacích. [3] [2]
- Kombinovaný (sdružený) přeliv – slučuje několik odlišných funkčních zařízení do jednoho objektu, nejčastěji výpustné zařízení, bezpečnostní přeliv nebo odběrný objekt. [11]

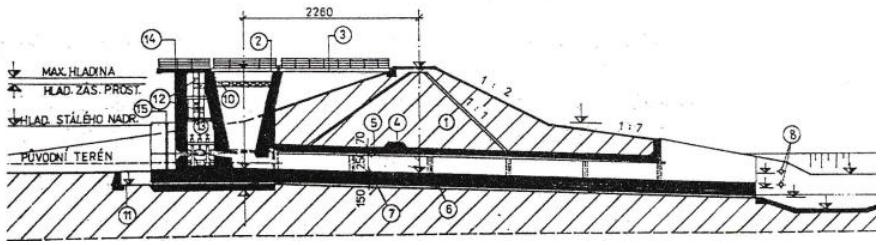
Následující obrázky 3 až 7 zachycují vybrané typy bezpečnostních přelivů malých vodních a suchý retenčních nádrží.



Obr. 3 – Přímý trubní bezpečnostní přeliv [13, p. 59] a ukázka polohy přelivu s vyznačeným směrem proudění

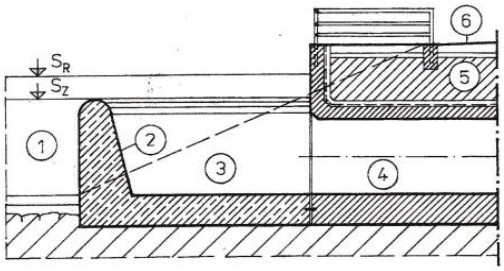


Obr. 4 – Boční bezpečnostní přeliv [13, p. 59]



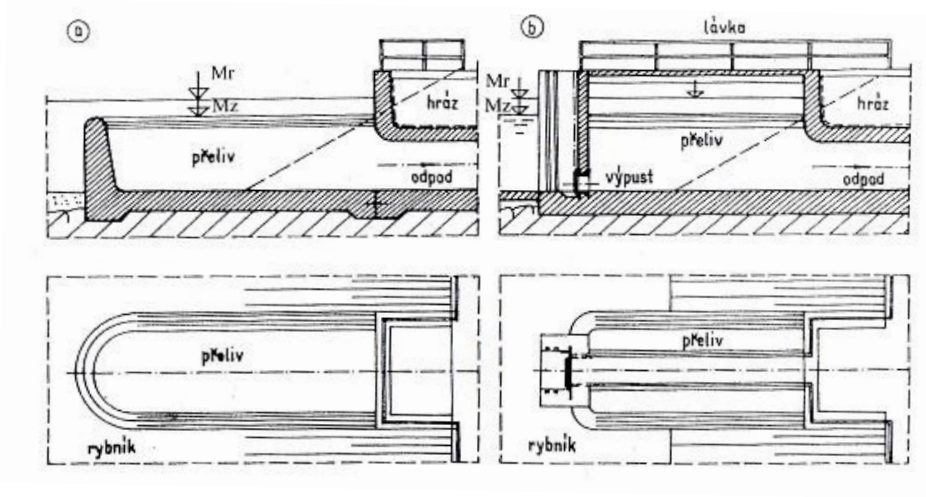
1-hráz, 2,3-lávka, 4-ozub, 5-odběr, 6-dilatační spáry 7-stavební výpust, 8-drén, 9,12-schody, 10-obklad koruny přelivu, 11-jímka, 13-šoupátkový uzávěr, 14-drážky česlí a hradidel, 15- drážky

Obr. 5 – Schéma sdruženého objektu se šachtovým bezpečnostním přelivem, výpustí a odběrem [1, p. 45]



Legenda
1 - nádrž,
2 – kašna,
3 – spadiště,
4 – odpad od přelivu,
5 – hráz,
6 – vozovka, koruna hráze

Obr. 6 – Kašnový bezpečnostní přeliv [1, p. 45]



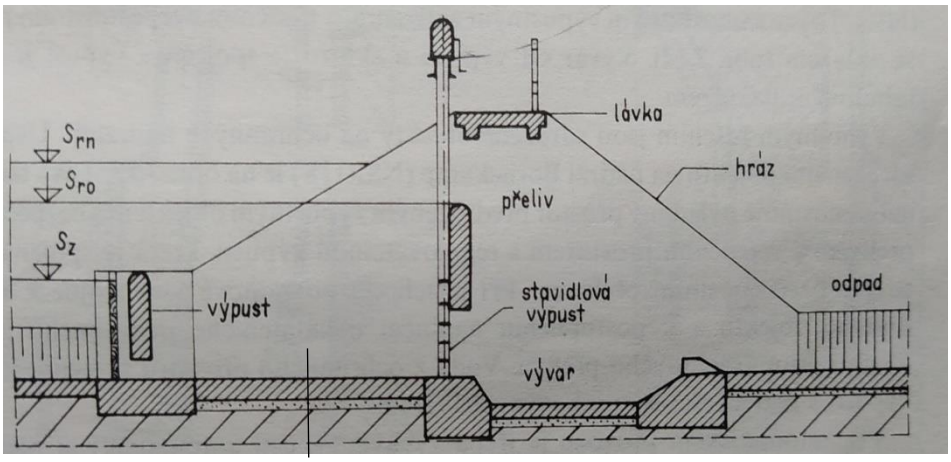
Obr. 7 – Kašnový bezpečnostní přeliv a kombinovaný bezpečnostní přeliv (kašnový bezpečnostní přeliv, výpust) [13, p. 61]

2.3.2 Výpustná zařízení (výpusti)

Výpustná zařízení slouží k řízenému vypouštění vody z nádrže. Mezi výpustná zařízení patří výpusti. [2] Kapacita výpusti se odvíjí od požadavků plynoucích z funkce konkrétní nádrže. Například výpust suché nádrže, s ohledem na svou ochrannou funkci, musí být schopná převádět běžné průtoky bez vzdouvání vody v ochranném prostoru nádrže (neplatí pro prostor stálého nadržení), umožnit úplné vyprázdnění prostoru nádrže (při jakékoliv kótě v nádrži), během povodňové události převádět maximálně požadovaný neškodný průtok před dosažením kóty přelivné hrany bezpečnostního přelivu nebo umožnit napouštění nádrže, vypouštění nádrže i uskutečnění řízeného ověřovacího provozu vodního díla podle vyhlášky č. 471/2001 Sb. [3] [5] [6] Počet a uspořádání výpustí malých vodních nádrží a suchých nádrží vyplývá z požadavků normy ČSN 75 2410 a normy ČSN 75 2340. Při objemu ovladatelného prostoru do 1 mil. m^3 a hloubkou vody do 9 m disponuje vodní dílo pouze jednou výpustí. [3] [14]

Obdobně jako bezpečnostní přeliv i výpust se sestává z více prvků na sebe navazujících. Skládá se z prvků na vtoku výpusti, z prvků pro odvod vody (př. odpadní potrubí) a z prvků pro tlumení kinetické energie (př. vývar, zdrsněné koryto). Prvky na vtoku výpusti slouží k usnadnění vtoku vody z nádrže do výpusti. Mezi prvky patří například objekty pro ochranu vtoku (př. česle), uzávěr, škrcení, nátokové zdi, šachta požeráku, někdy přívodní koryto apod.

Podle konstrukčního uspořádání se dělí výpusti na otevřené výpusti a uzavřené výpusti. [11] Otevřené výpusti, nazývané taktéž jako žlabové nebo stavidlové, jsou tvořeny železobetonovými nebo kamennými žlaby. Stěny výpusti se budují na celou výšku hráze. Pokud po koruně hráze vede vozovka nebo cesta, překlene se výpust mostem nebo lávkou. U malých vodních nádrží tvoří hradicí prvek často stavidlo, ale i segmentový uzávěr, klapkový uzávěr nebo tabulkový uzávěr. [15] [11] Obrázek 8 zobrazuje otevřenou výpust se stavidlovým uzávěrem u malé vodní nádrže se stálým nadržením a s nižší výškou hráze.



Obr. 8 – Otevřená výpust se stavidlovým uzávěrem u malé vodní nádrže se stálým nadržením a s nižší výškou hráze [15, p. 90] (pozn. dopsáno sousloví přívodní koryto)

Trubní výpusti používají pro vedení vody tělesem hráze uzavřený profil – nejčastěji potrubí. [11] Každá výpust malých vodních nádrží by měla být osazena uzávěrem. Naopak pro výpust suché nádrže není uzávěr vyžadován. [3] Uzávěr u trubní výpusti se umisťuje nejčastěji na návodní straně, ale může se umístit i na vzdušní straně hráze. Podle typu uzávěru se dělí trubní výpusti na lopatové a šikmé stavidlové uzávěry na návodní straně, čepové uzávěry, šoupátkové uzávěry, stavidlové uzávěry a plochá kanalizační šoupátka, segmentové uzávěry a požerákové výpusti. Výběr uzávěru ovlivňuje konstrukci výpustného zařízení. [15] [11]

Podle uspořádání vtokového objektu výpusti se dělí trubní výpusti na výpust s ponořeným vtokovým objektem a výpust s věžovým vtokovým objektem. [5] Vtokový objekt zajišťuje vtok vody z nádrže do výpustného zařízení. [2] Slovem vtokový objekt se souhrnně popisují prvky na vtoku do výpusti. Toto rozdělení výpusti lze aplikovat pro výpust suché nádrže, ale i pro malé vodní nádrže.

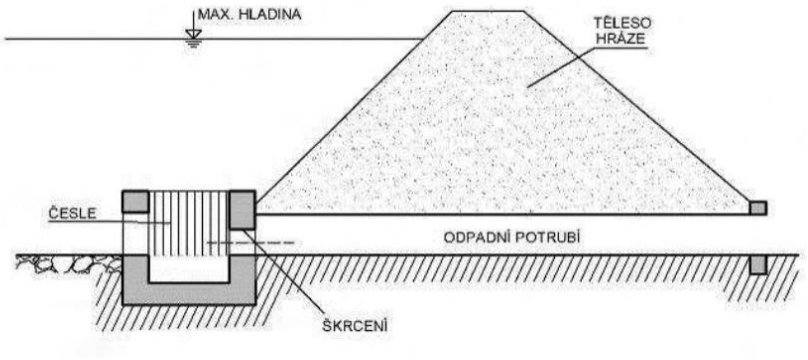
Pro ponořený vtokový objekt je charakteristické, že při stoupání hladiny vody v nádrži se dostává od určité úrovně hladiny v nádrži pod hladinu. [2] Obrázek 9 zachycuje ponořený vtokový objekt. Obrázek 10 zobrazuje podélný řez výpustí suché nádrže s ponořeným vtokovým objektem. Spodní výpust se skládá z předsazeného česlového rámu, ze vtoku s ostrou hranou umístěném ve svislé stěně, ze škrtícího otvoru, z odpadního potrubí a z objektů pro tlumení kinetické energie. [5] Naopak obrázek 11 zobrazuje podélný řez výpustí malé vodní nádrže se stálým nadržením s ponořeným vtokovým objektem a s uzávěrem i odběrem na vzdušní straně hráze.

Naopak pro věžový vtokový objekt je charakteristické, že na vtoku do výpusti se nachází svislé těleso ve tvaru věže – šachta věžového objektu. Věžový objekt může být předsazený před těleso (v nádrži mimo těleso hráze) nebo umístěný v tělese hráze. [2] [5] Obrázek 12 zobrazuje podélný řez výpustí suché nádrže s věžovým vtokovým objektem a pohled na šachtu věžového vtokového objektu. Naopak obrázek 13 zachycuje podélný řez výpustí malé vodní

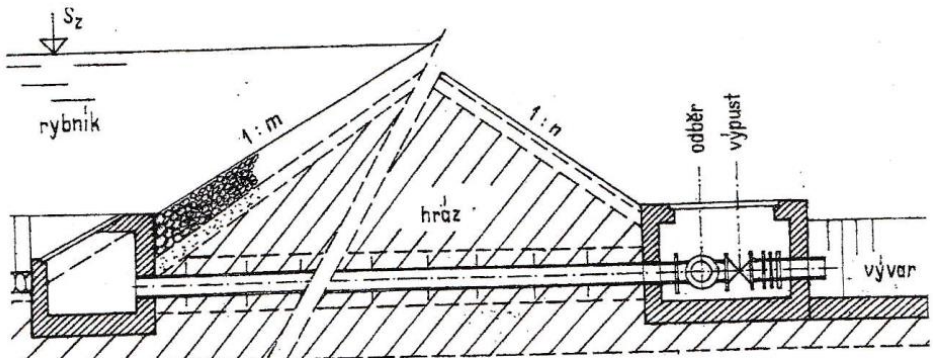
nádrže se stálým nadržením a s věžovým vtokovým objektem. Výpusti se skládají z věžového objektu (česle, drážky pro provizorní hrazení, zavzdušnění, uzávěr, škrcení), z odpadního potrubí a z objektu pro tlumení kinetické energie.

Podtypem věžového vtokového objektu je požerákový objekt. Požerákový vtokový objekt se může u suchých nádrží použít jako zařízení pro stálé nadržení. Vtokový objekt nemusí být na celou výšku hráze. [5] Požerákové výpusti jsou nejčastěji používaným výpustným zařízením pro malé vodní nádrže určené pro stálou akumulaci vody. [11] Na obrázku 14 je zachycen podélný řez výpustí suché nádrže s požerákovým vtokovým objektem včetně popisu prvků výpusti.

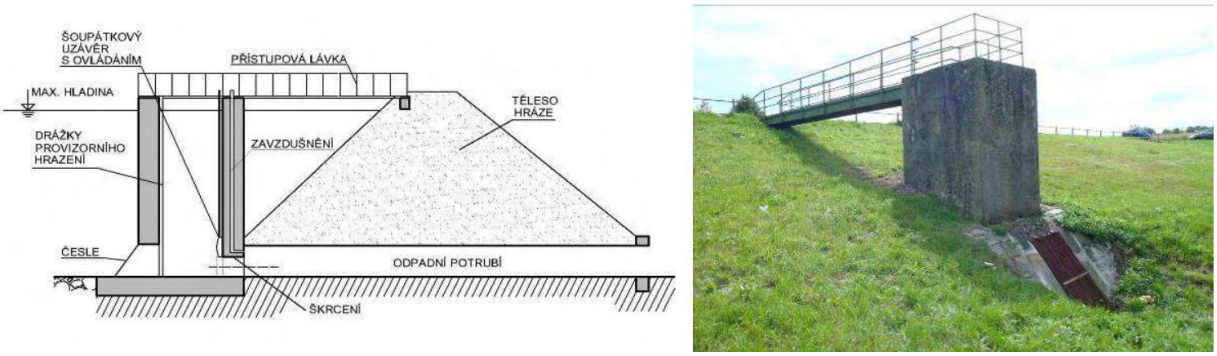
Obr. 9 – Výpust s ponořeným vtokovým objektem u suché nádrže Březinka [16] (pozn. obrázek zmenšen)



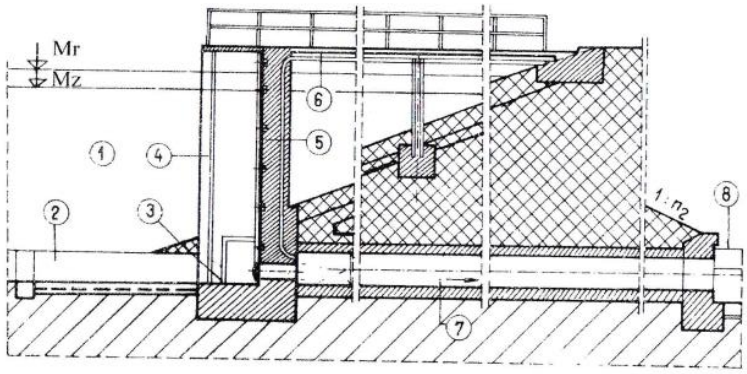
Obr. 10 – Podélný řez výpustí suché nádrže s ponořených vtokovým objektem [5, pp. 33 - část a)]



Obr. 11 – Podélný řez výpustí malé vodní nádrže se stálým nadržením s uzávěrem a s odběrem na vzdušní straně hráze [1, p. 39]

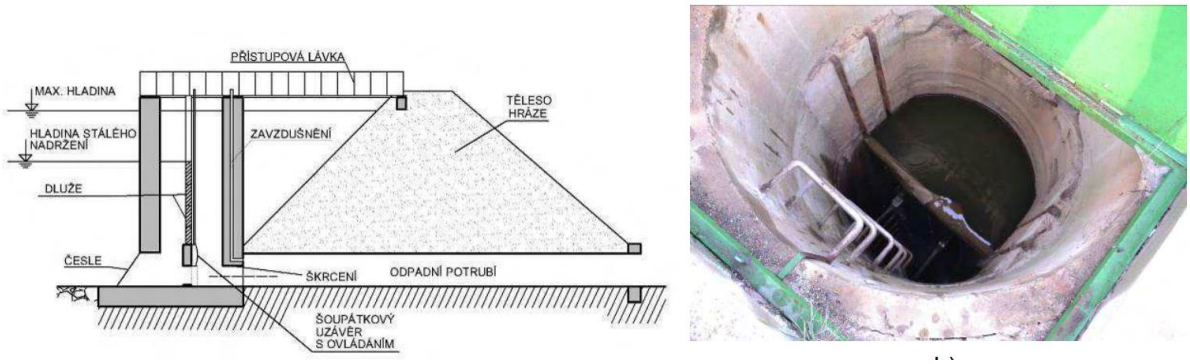


Obr. 12 – Podélný řez výpusti suché nádrže se spodní výpustí s věžovým vtokovým objektem a pohled na věžový vtokový objekt [5, p. 33]



Legenda
1 – nádrž,
2 – rybniční stoka,
3 – česle,
4 – drážky pro provizorní hrazení,
5 –výpustný objekt,
6 – lávka,
7 – výpustné potrubí,
8 – vývar

Obr. 13 – Trubní výpust se šoupátkovým uzávěrem [13, p. 47]



Obr. 14 – Podélný řez výpusti suché nádrže s požerákovým vtokovým objektem a pohled do šachty požeráku [5, p. 35]

2.3.3 Sdružený objekt

U malých vodních i suchých nádrží je možné se v praxi setkat s funkčním objektem typu sdružený objekt. Sdružený objekt slučuje minimálně dvě různá funkční zařízení do jednoho objektu. Sloučení odlišných funkčních zařízení do jednoho objektu je mnohdy efektivní, ať už z pohledu technického, ekonomického nebo provozního. U malých vodních nádrží sdružený objekt plní obecně funkci přelivného zařízení, výpustného zařízení nebo odběrného zařízení. [1] [2] Sdružený objekt u suchých nádrží plní především funkci přelivného a výpustného zařízení. [5] Funkční objekt se skládá z vtokové části, z přepadové části, z hrázové části a z části pro tlumení kinetické energie. [12]

Sloučení funkčních zařízení sebou nese řadu výhod i nevýhod. Výhody a nevýhody sdruženého objektu závisí na konstrukčním řešení objektu jako celku, ale i na konstrukčním řešení jednotlivých částí. Mezi výhody sdruženého objektu obecně například patří koncentrace stavebních prací do jednoho prostoru (uspoření objemu základových prací, usnadnění dopravního spojení, zmenšení zastavěné plochy apod.), výstavba společného vývaru nebo společného odpadu, snížení kubatury použitého materiálu, využití objektu pro převedení vody za stavby, snížení vynaložených investičních nákladů na výstavbu jednoho funkčního objektu než na výstavbu samostatných jednotlivých objektů apod. [17] [10] Naopak mezi nevýhody sdruženého objektu například patří vytvoření složitějších hydraulických poměrů ve společných částech sdruženého objektu (spadiště, odpad, vývar), vzájemné ovlivnění kapacity dílčích částí funkčního objektu, napojení těsnícího prvku na konstrukci sdruženého objektu, narušení celistvosti (kontinua) tělesa hráze, vytvoření podmínek pro nerovnoměrné sedání tělesa hráze s rizikem vzniku trhlin (pozn. oproti tělesu hráze je konstrukce tuhým prvkem) nebo vytvoření vhodných podmínek pro komínový efekt. U komínového efektu může zemina tělesa hráze nasycená vodou promrznout od kontaktu s konstrukcí, kterou ochlazuje průvan mrazivého vzduchu. Další nevýhodou je u některých vodních děl i estetické začlenění funkčního objektu do krajiny. Například u suchých nádrží je funkční objekt po většinu doby životnosti vodního díla v prázdné nádrži zcela viditelný. [5] [10] [17]

Sdružené objekty je možné rozdělit podle konstrukčního uspořádání do tří kategorií – sdružené objekty s přepadem do spadiště (sdružené objekty se žlabovým přelivem), sdružené objekty s šachtovým přelivem (věžové sdružené objekty) a ostatní sdružené objekty. [12] [10] Pokud se u suchých nádrží používá sdružený objekt, pak spíše se šachtovým nebo kašnovým (žlabový) přelivem, do jehož kolena nebo čelní stěny je zaústěna nehrazená výpust. [5]

U sdruženého objektu s přepadem do spadiště (sdruženého objektu se žlabovým přelivem) se používá bezpečnostní přeliv, u něhož mnohdy dominuje délkový rozměr nad ostatními rozměry. [(n.1)] Bezpečnostní přeliv může být nejen žlabový, ale i kašnový či jiný. Podle výškového uspořádání se dělí sdružený objekt na jednopatrový, dvoupatrový nebo třípatrový (třípatrový objekt se používá pro výšku hráze nad 10 m). Sdružený objekt se skládá ze čtyř částí – vtokové části, přepadové části, hrázové části a části pro tlumení kinetické energie. Vtoková část sdruženého objektu zahrnuje výpust, případně odběr nebo u vícepatrových sdružených objektů i šachtu uzávěrů. Obvykle se nachází před návodní patou hráze. Přepadová část u jednopatrového sdruženého objektu se skládá z přelivné hrany a ze společného spadiště pro výpust i bezpečnostní přeliv. Výpust se zaúsťuje do čelní stěny přelivu. U ostatních typů sdruženého objektu jsou bezpečnostní přeliv a výpust odděleny. Přepadová část dvoupatrového funkčního objektu zahrnuje oddělenou přelivnou sekci (přelivná hrana, spadiště) a samostatný odpad od výpusti. U třípatrových objektů je navíc komunikační chodba. Hrázová část představuje úsek sdruženého objektu mezi koncem spadiště po začátek zařízení pro tlumení kinetické energie. Hrázovou část tvoří odpad od přelivu, jenž se navrhuje jako otevřený (otevřený žlab – skluz) nebo uzavřený netlakový (štola, chodba). U jednopatrového sdruženého objektu je odpad společný pro bezpečnostní přeliv i pro výpust. Naopak u dvou a třípatrového

Poznámka: n.1 – Diplomová práce z podkladů tuto informaci vyvodila.

sdruženého objektu je odpad většinou oddělený. Zařízení pro tlumení energie, jak jeho název napovídá, slouží k tlumení kinetické energie od vody odtékající výpusti a přepadající přes přeliv. Zařízení je společné pro přeliv i výpust. [12]

Příkladem jednopatrového sdruženého objektu u malé vodní nádrže nebo suché nádrže je suchá nádrž Čihadlo (viz Obr. 19), suchá nádrž na Bílském potoce (viz Obr. 17 a 18), suchá nádrž Vlatislav (viz Obr. 15 a 16), suchá nádrž Dolní Chrástě nebo malá vodní nádrž Neškaredice. Na obrázku 7 lze vidět uspořádání jednopatrového sdruženého funkčního objektu pro vtokovou část, přelivnou část a kratšího úseku hrázové části. Schéma dvoupatrového funkčního objektu je zobrazen na obrázku 20. Příkladem dvoupatrového sdruženého objektu je malá vodní nádrž Rouchovany. [18]

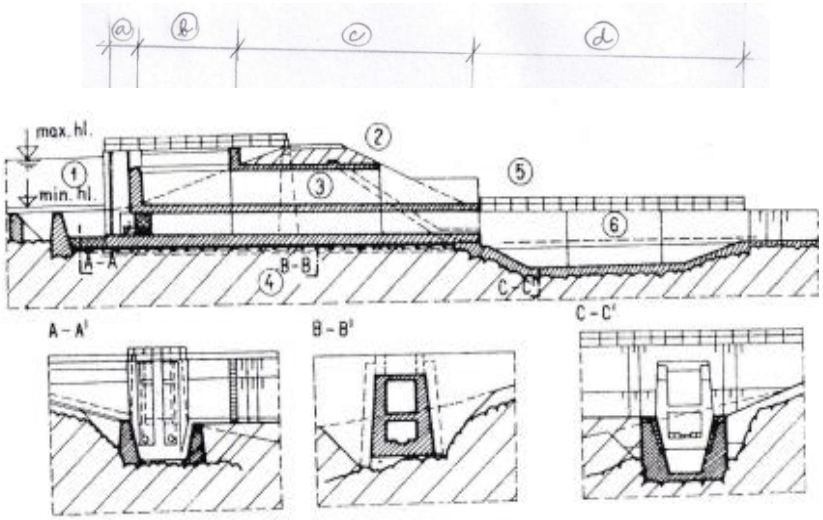
Obr. 15 – Suchá nádrž Vlastislav – jednopatrový sdružený objekt s bezpečnostním přelivem, s výpustí zaústěnou do čelní stěny a s uzavřeným odpadem od přelivu (autor Ing. P. Balvín, Phd.)

Obr. 16 – Suchá nádrž Vlatislav – pohled na výpust sdruženého objektu a pohled odpadní chodbu směrem do spadiště (autor Ing. P. Balvín, Phd.)

Obr. 17 – Suchá nádrž na Bílském potoce – jednopatrový sdružený objekt s bezpečnostním přelivem, s výpustí zaústěnou do čelní stěny a s otevřeným odpadem od přelivu (autor Veronika Táboříková)

Obr. 18 – Suchá nádrž na Bílském potoce – pohled na výpust sdruženého objektu a pohled skluzem (otevřeným žlabem) směrem do spadiště (autor Veronika Táboříková)

Obr. 19 – Suchá nádrž Čihadlo – jednopatrový sdružený objekt se žlabovým bezpečnostním přelivem s oboustranným nátokem o více přelivných polí, s výpustí zaústěnou do čelní stěny a s uzavřeným odpadem od přelivu (autor Veronika Táboříková)



Legenda
1 – nádrž, koryto, výpust a odběr, 2 – hráz,
3 – přeliv a odpad,
4 – výpustná štola,
5 – výtok, 6 – vývar,
a – vtoková část,
b – přelivná část,
c – hrázová část,
d – zařízení pro tlumení energie

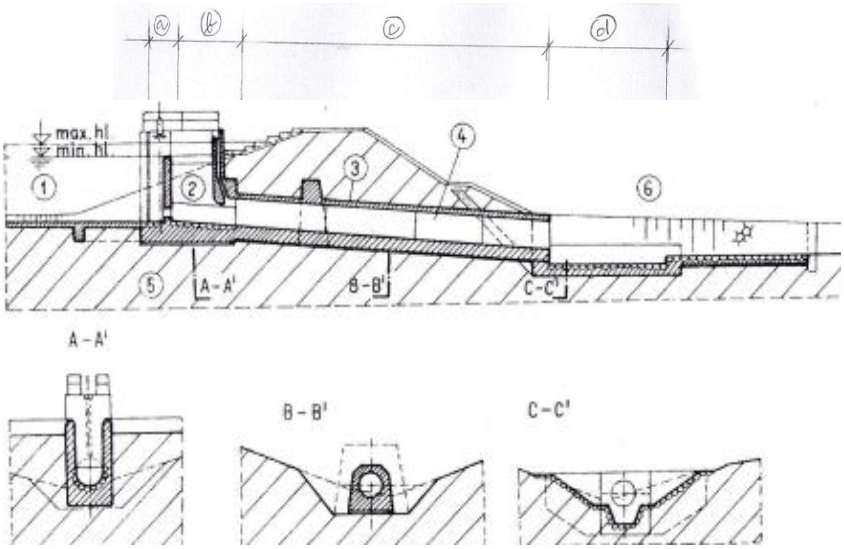
Obr. 20 – Schéma dvoupatrového sdruženého funkčního objektu [13, p. 63] s dodanou popiskou částí (a,b,c,d)

U sdruženého objektu s šachtovým přelivem (věžový sdružený objekt) dominuje u bezpečnostního přelivu mnohdy výškový rozměr nad ostatními rozměry. (n.2) Šachtový bezpečnostní přeliv může se dělit na pravoúhlý nebo nálevkovitý. [12] Do čela nebo do kolene přelivu je zaústěna výpust. [5] Přepadající voda přes přeliv a voda proudící výpustí jsou odvedeny společnou netlakovou odpadní chodbou (štolou) do společného zařízení pro tlumení kinetické energie. Šachta se nachází obvykle při patě návodního svahu hráze, ale není vyloučeno její umístění i v tělese hráze. Sdružený objekt se může zkombinovat i s odběrem. Jako u předešlého typu sdruženého objektu, i tento typ se může rozdělit na sekci vtokovou, přepadovou, hrázovou a tlumící. [12]

Sdružený objekt s šachtovým přelivem se vyskytuje například u suché nádrže na Klapovském potoce (viz Obr. 1 a Obr. 21) nebo u suché nádrže Jelení (Obr. 2). Schéma sdruženého objektu s šachtovým přelivem je znázorněno na obrázku 5 a obrázku 22.

Obr. 21 – Suchá nádrž na Klapovském potoce – sdružený objekt se šachtovým přelivem (autor Ing. P. Balvín, Phd.)

Poznámka: n.2 – Diplomová práce z podkladů tuto informaci vyvodila. V podkladech není přímo napsáno.



Legenda
1 – nádrž (koryto),
2 – přeliv, 3 – štola,
4 – hráz, 5 – únosné podloží, 6 – vývar (s navazujícím odpadním korytem),
a – vtoková část,
b – přelivná část,
c – hrázová část,
d – zařízení pro tlumení energie

Obr. 22 – Schéma jednopatrového sdruženého funkčního objektu se šachtovým přelivem [13, p. 63] s dodanou popiskou částí (a,b,c,d)

Kromě zmíněných typů sdružených objektů mohou být i jiné typy sdruženého objektu, které nespadají do výše uvedených. Příkladem je sdružený objekt kombinující přímý bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí. Tento typ sdruženého objektu se nachází například v sousedním státě Spolková republika Německo u suchých retenčních nádrží, kterými jsou Hochwasserrückhaltebecken Gorrisried nebo Hochwasserrückhaltebecken Dirlewang. V České republice reprezentuje tento typ sdruženého objektu například plánovaná suchá nádrž Mělčany (viz Obr. 23), jež kombinuje přímý bezpečnostní přeliv, výpust a migrační propust. [19]

Obr. 23 – Sdružený objekt u navrhované suché nádrže Mělčany [20]

3. Fyzikální model sdruženého objektu

3.1 Definice fyzikálního modelování

V literatuře *Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice* od autorů Jaroslava Čábelky a Pavla Gabriela se uvádí, že modelování umožňuje matematickými nebo fyzikálními prostředky zobrazit objekty a jevy skutečného světa a zkoumat je. Poznatky a výsledky nabyté bádáním na modelu se dle známých vztahů podobnosti extrapolují do skutečnosti. [21, p. 23]

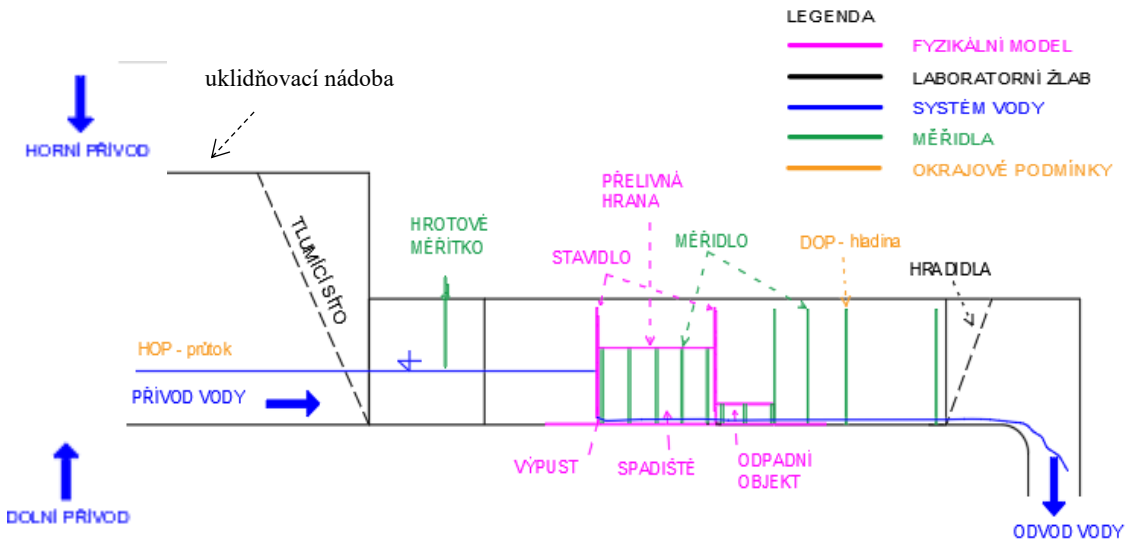
Fyzikální modelování se zakládá na podobnosti mezi dvěma reálnými systémy – skutečností (prototypem) a jeho reprodukovaným obrazem (modelem). Modelování zprostředkovává zkoumání jevů v prostoru a v čase obvykle v laboratorních podmínkách za použití zmenšených fyzikálních modelů, jež představují reprodukovaný zmenšený skutečný systém dle zvolené podobnosti. Naopak matematické modelování se zakládá na podobnosti mezi dvěma systémy – skutečným systémem a abstraktním systémem. Matematické modelování umožňuje zkoumání skutečných systémů pomocí abstraktních systémů dle stanovené podobnosti s využitím matematických modelů. Při matematickém modelování jsou jev i jeho prostředí popsány matematickými prostředky. [21, pp. 23,25]

3.2 Cíle fyzikálního modelování

Fyzikální model představuje jednopatrový sdružený objekt s bezpečnostním přelivem, s výpustí zaústěnou v čelní stěně a se zkráceným uzavřeným odpadem. Vzájemnou interakcí proudění výpustí a přepadu přes bezpečnostní přeliv se ovlivňuje nejen průběh hladiny ve sdruženém objektu, ale i kapacita sdruženého objektu. Kapacitu funkčního objektu limituje jednak kapacita výpusti a kapacita bezpečnostního přelivu, ale případně i kapacita spadiště, kapacita odpadu nebo podmínky na výtoku pod hrází. Při proudění vody ve společné části sdruženého objektu se vytváří složité hydraulické poměry. Cílem fyzikálního modelování je analyzovat hydraulické řešení sdruženého objektu s využitím dat změřených na fyzikálním modelu a doporučit vhodné výpočetní postupy pro inženýrskou praxi. Hydraulické postupy jsou uvedené v kapitole s názvem *Hydraulické postupy*.

3.3 Fyzikální model sdruženého objektu

Pro účely fyzikálního modelování se zkonstruoval zjednodušený fyzikální model sdruženého objektu. Model nepředstavuje prototyp skutečného vodního díla, je prototypem sám o sobě. Konstrukce fyzikálního modelu vyplývá z požadavků bádání hydraulických jevů na modelu, z podmínek mechanické podobnosti, z parametrů laboratorního žlabu a ze zkušeností vedoucího diplomové práce. Fyzikální model sdruženého objektu se nacházel v laboratorním žlabu ve vodohospodářské hale Fakulty stavební ČVUT v Praze. Stručné schéma laboratorního žlabu zobrazuje obrázek 24.



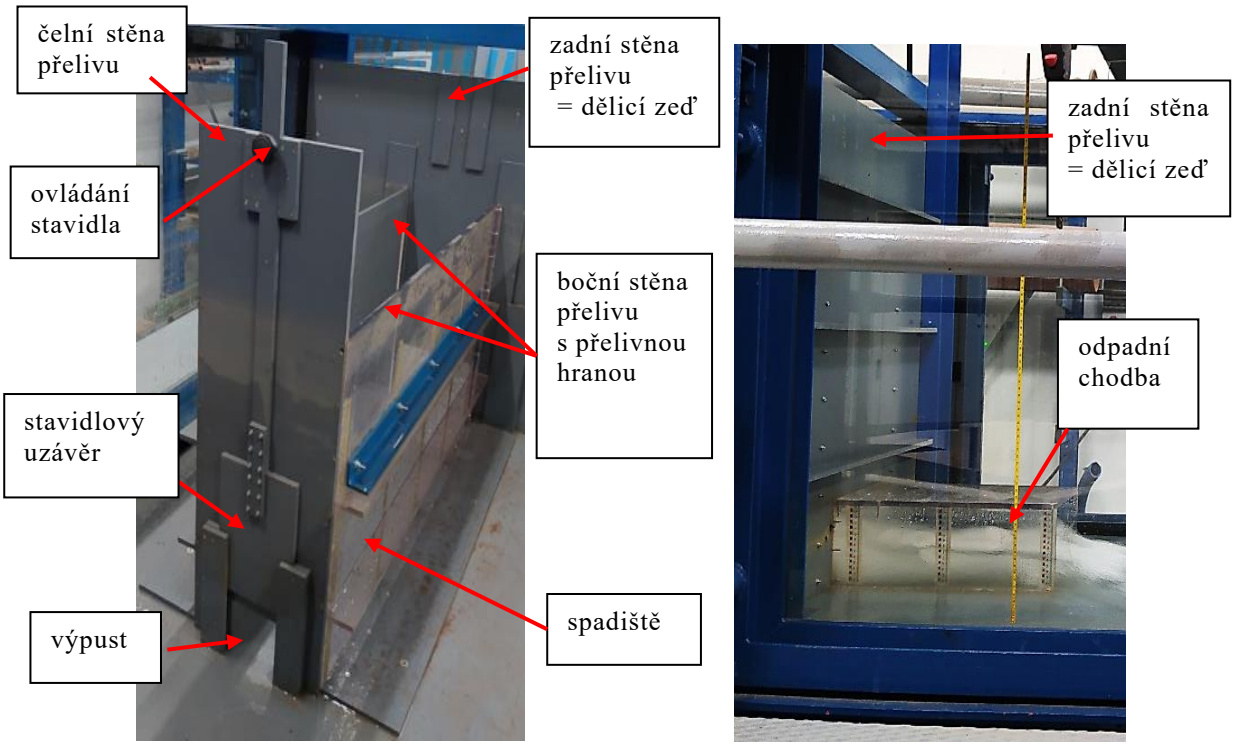
Obr. 24 – Schéma s popisem některých prvků fyzikálního modelu, prvků laboratorního žlabu a vybraných měřidel

Do laboratorního žlabu se voda přivádí z rozvodné sítě vodohospodářské haly horním přívodem nebo dolním přívodem. Horním přívodem voda proudí přívodním potrubím do prostoru s Thomsonovým měrným přelivem (pozn. pro měření průtoku se nepoužíval) a dále do uklidňovací nádoby. Celková kapacita přívodního potrubí činí cca 80 l/s. Průtok v přívodním potrubím se nastavuje dvěma šoupaty s kapacitou 20 l/s a 60 l/s, kdy každé šoupě je situováno na samostatné větvi potrubí. Na obou větvích potrubí se měří průtok samostatným průtokoměrem. Dolním přívodem se přivádí voda přívodním potrubím přímo do uklidňovací nádoby. Průtok dolním přívodem se ovlivňuje otevřením šoupěte na přívodním potrubí a jeho hodnota se stanovuje experimentálně na fyzikálním modelu. Hodnota požadovaného průtoku dolním přívodem se pokaždé stanovuje na modelu pro stav přepadu přes bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí (tj. experiment „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“), kdy se jeho hodnota pro příslušnou horní hladinu extrapoluje z naměřené konzumční křivky pro tento experiment. Vzhledem ke způsobu stanovení hodnoty průtoku se při dolním přívodu šoupě otevřelo do jedné polohy (tj. na jednu konkrétní hodnotu průtoku) a průtok se poté navyšoval horním přívodem. Z uklidňovací nádoby voda přitéká do prostoru laboratorního žlabu přes tlumící síto, které jednak pomáhá utlumovat přitékající vodu a zajišťuje rovnoměrný nátok do žlabu. Obrázky 43 až 56 (viz Příloha 1) zobrazují vybrané zmíněné prvky.

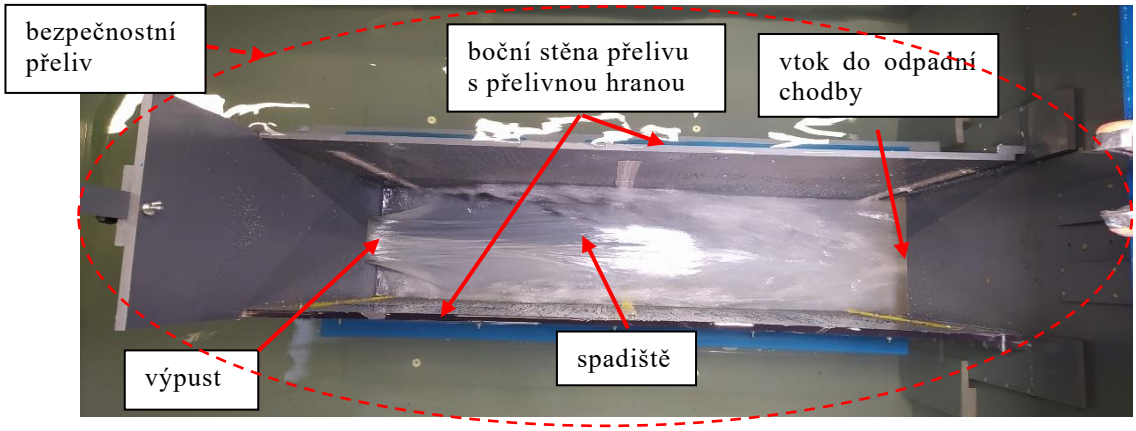
Fyzikální model sdruženého objektu se v laboratorním žlabu upevnil na podkladovou desku vysokou 0,01 m. Fyzikální model sdruženého objektu kombinuje výpustné zařízení a bezpečnostní přeliv. Výpust tvoří čtvercový otvor o rozměrech 0,1 m x 0,1 m situovaný v čelní stěně přelivu tlusté 0,01 m. Stavidlový uzávěr na vtoku výpusti reguluje výšku otevření výpusti. Bezpečnostní přeliv se řeší jako přeliv s oboustranným přepadem přes přelivnou hranu. U bezpečnostního přelivu dominuje délkový rozměr nad výškovým rozměrem, však ani výškový rozměr není zanedbatelný. Proto se diplomová práce přiklání k tomu, že bezpečnostní přeliv bude spíše žlabový bezpečnostní přeliv než šachtový bezpečnostní přeliv. Prostor spadiště obdélníkového půdorysu širokého 0,25 m a dlouhého 1,01 m je vymezen čelní stěnou, dvěma bočními stěnami s přelivnými hranami a zadní stěnou. Přelivná hrana se nachází

v konstantní výšce 0,6 m nade dnem spadiště. Tloušťka přelivné hrany činí 0,01 m. Celková délka přelivné hrany je 2,02 m. Čelní stěna je vytažena dostatečně vysoko nad úroveň hladiny, aby přes ni nemohla přepadat voda. Na společné spadiště pro výpust i bezpečnostní přeliv navazuje i společný odpad – odpadní chodba. Pro účely diplomové práce se zavádí pro označení společného odpadu kromě sousloví „odpadní chodba“ pojem „odpadní objekt“. Odpadní chodbu tvoří obdélníkový uzavřený průřez rámové propusti (Benešovy rámy) o šířce 0,25 m, výšce 0,15 m a délce 0,51 m. Vtok odpadního objektu se nachází v zadní stěně přelivu. Odpadní chodba se zkrátila s ohledem na délku laboratorního žlabu. Obrázek 24 zobrazuje schéma laboratorního žlabu s fyzikálním modelem včetně popisu vybraných částí. Obrázky 25 a 26 zachycují fyzikální model sdruženého objektu včetně popisu.

Prostor laboratorního žlabu mezi nátokem a sdruženým objektem simuluje prostor nádrže. Dělicí stěna představuje těleso hráze, rozděluje laboratorní žlab na dvě části a slouží jako opora pro fyzikální model. Pro simulaci podmínek pod hrází se ponechala část prostoru v laboratorním žlabu mezi výtokem z odpadu a odtokem ze žlabu. Odtékající voda ze žlabu se vrací zpět do systému rozvodné sítě vodohospodářské haly. Na fyzikálním modelu sdruženého objektu se zvolil nulový sklon dna z technických důvodů, z organizačních důvodů a pro zavedení konstantního parametru. Sklon dna ovlivňuje proudění ve sdruženém objektu. Z uklidňovací nádoby se voda vypouští jalovou výpustí. Příloha 1 *Fyzikální model sdruženého objektu* obsahuje fotodokumentaci laboratorního žlabu s fyzikálním modelem a podklady fyzikálního modelu.



Obr. 25 – Fyzikální model sdruženého objektu



Obr. 26 – Fyzikální model sdruženého objektu

Měření na fyzikálním modelu probíhalo podle připraveného měřicího plánu. Před každým měřením na fyzikálním modelu se ověřilo uzavření jalové výpusti žlabu, jelikož při odtoku vody výpustí z uklidňovací nádoby by byl experiment znehodnocen. Poté se stavidlovým uzávěrem otevřela výpust sdruženého objektu na požadovanou výšku otevření výpusti. Otevřením šoupat na přívodních potrubích se do žlabu pustil požadovaný průtok. Zatarasením výtoku žlabu hradidly se nastavila dolní okrajová podmínka – hladina dolní vody ke srovnávací rovině. Po ustálení modelu se zaznamenaly měřené veličiny – průtok, horní hladina, hladina ve spadišti, hladina v odpadní chodbě a hladina dolní vody.

Za horní okrajovou podmínku se volí průtok na fyzikálním modelu. Pro každý průtok nastává na fyzikálním modelu specifická úroveň horní hladiny. Hodnota průtoku se pro horní přívod měřila průtokoměrem a pro dolní přívod se stanovila experimentálně. Dolní okrajová podmínka simuluje takové podmínky na výtoku pod hrází, kdy zpětné vzdutí dolní vody ovlivní nebo neovlivní proudění ve sdruženém objektu. Dolní okrajová podmínka představuje hladinu dolní vody ke srovnávací rovině. Srovnávací rovina se volí v úrovni dna spadiště a odpadní chodby. Hodnota hladiny se odečítá z měřidla (měřící metr) umístěného na stěně žlabu (označení viz Obr. 24). Horní hladina před fyzikálním modelem sdruženého objektu („*horní hladina v nádrži*“) se stanovila hrotovým měřítkem. Měřila se v místě, kde by se nemělo projevit snížení hladiny vlivem přepadu vody přes bezpečnostní přeliv nebo prouděním výpustí. Hladina ve spadišti a hladina v odpadní chodbě se odečetla z měřidel (měřících metrů) umístěných na boční straně objektů. Zaznamenaná hladina ve spadišti a v odpadní chodbě představuje průměrnou hladinu u stěny příslušného objektu.

Při řešení průběhu hladiny na fyzikálním modelu sdruženého objektu se používají změřené veličiny. Při fyzikálním modelování by se měly dodržet mezní podmínky mechanické podobnosti, aby šlo výsledky modelování aplikovat bez výrazného zatížení chybou. Mezní podmínky mechanické podobnosti se blíže popisují v odborné literatuře, například v literatuře *Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice*. [21, p. 56 až 62] Pro přepočet parametrů mezi modelem a prototypem by se případně aplikoval Froudův zákon mechanické podobnosti. Zákon vyjadřuje podmínku hydrodynamické podobnosti hydrodynamických jevů

za výhradního působení gravitačních sil. Ostatní působící síly, jako třeba kapilární síly nebo třecí síly, jsou v porovnání s gravitačními sílami zanedbatelné. Froudův zákon vychází z geometrické podobnosti prototypu s modelem. [21, p. 49]

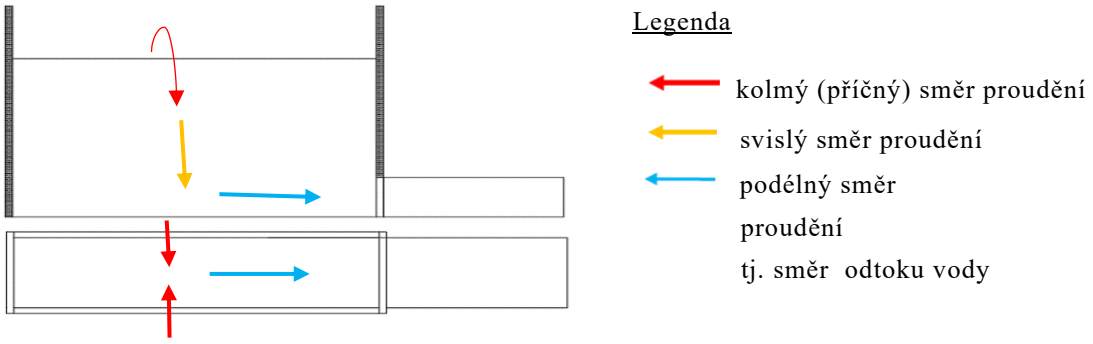
Zaznamenané veličiny na fyzikálním modelu jsou zatíženy chybou měření. Podle způsobu vzniku se dělí chyby na hrubé, soustavné a náhodné. Chyba se zavádí v absolutní i relativní chybě. [22] Příčinou chyb je například volba typu měřících nástrojů, fluktuace hladiny, lidský faktor, přesnost rozměrů dílčích částí sdruženého objektu, preciznost měření na modelu atd. Po zavedení chyb měření se změřené veličiny pohybují v následujícím rozmezí. Horní hladina nabývá hodnot v rozmezí $y_h \pm 1,5$ mm. Průměrná hladina u stěny ve spadišti se pohybuje v rozmezí $y_s \pm 0,02 * y_s$. Chyba nabývá průměrně cca 5,0 mm až 10,0 mm. Průměrná hladina u stěny v odpadní chodbě se stanovuje na hodnotu $y_o \pm 5,0$ mm. Hodnota průtoku pro horní přívod se pohybuje v rozmezí $Q \pm 0,015 * Q$ a hodnota průtoku pro dolní přívod se pohybuje v rozmezí $Q \pm 0,035 * Q$. Chyba průtoku dolním přívodem je odhadována mnohem výše, jelikož průtok dolním přívodem je odvozen z jiných měření už zatížených chybou. Chyby měření jsou pouze orientačně odhadnuty.

3.4 Experimenty na fyzikálním modelu – popis a výsledky

Na fyzikálním modelu sdruženého objektu se měřily dva experimenty – experiment „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“ a experiment „bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí“.

3.4.1 Experiment „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“

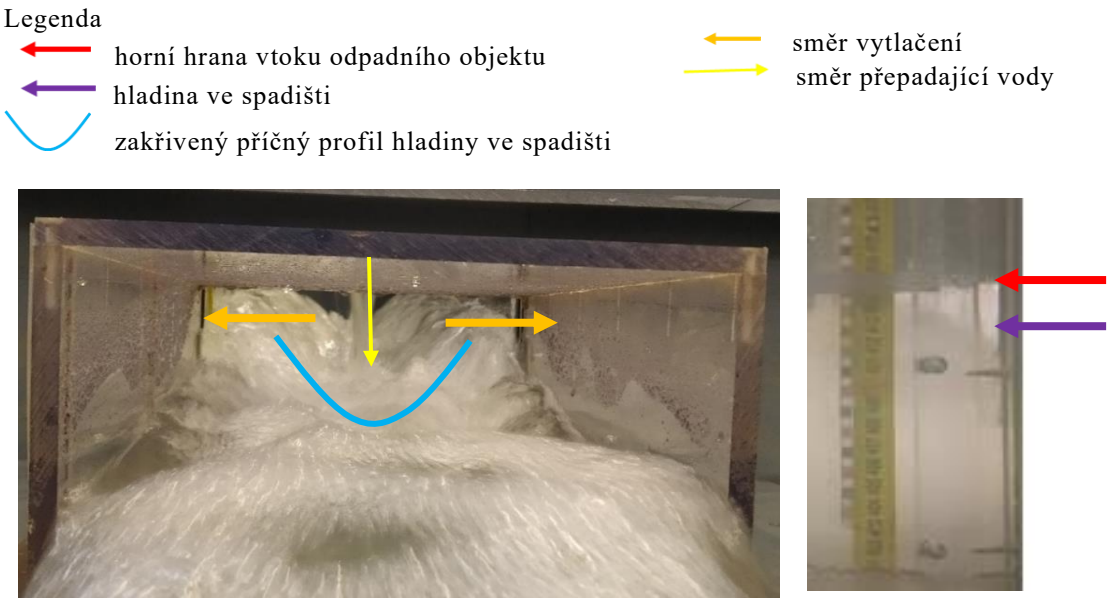
Při provozu sdruženého objektu může v praxi nastat situace, kdy výpust nebude schopná převést průtok, třeba důsledkem svého zanesení, a tak průtok převádí pouze bezpečnostní přeliv. Experiment „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“ právě simuluje tento stav, kdy je u sdruženého objektu v provozu pouze bezpečnostní přeliv s neprovozuschopnou výpustí. Při experimentu přepadá voda přes přelivnou hranu do spadiště ve směru kolmém na proudění odtékající vody. Ve spadišti přepadající voda mění směr proudění z kolmého (příčného) svislého směru do směru proudění odtékající vody. Při přepadu a změně směru proudění voda ztrácí část své energie. Změna směru proudění je patrná z obrázku 27.



Obr. 27 – Popis směru proudění ve sdruženém objektu při experimentu

Horní okrajovou podmínku tvoří série průtoků podle individuálních požadavků vyplývajících z měření experimentu. Dolní okrajovou podmínku hladinu dolní vody ke srovnávací rovině tvoří hladina kritické hloubky $y_d = y_k$. Dolní okrajová podmínka hladina kritické hloubky simuluje takové podmínky výtoku pod hrází, kdy není proudění ve sdruženém objektu ovlivněno zpětným vzdutím dolní vody a na fyzikálním modelu se pak může utvořit kritická hloubka. Na fyzikálním modelu se tento stav aplikoval tak, že se neumístila hradidla na výtok z laboratorního žlabu a ponechalo se proudění volný prostor. Měření se pro stejný průtok neopakovalo. Z naměřených dat vyplývají následující poznatky.

Na fyzikálním modelu se kromě nezahlceného a zahlceného vtoku odpadní chodby rozlišuje i částečně zahlcený vtok odpadní chodby. Nezahlcený vtok nastává, pokud hladina ve spadišti je níže než hrana vtoku. Částečně zahlcený vtok spadá případně pod nezahlcený vtok a představuje přechod mezi nezahlceným a zahlceným vtokem. Částečně zahlcený vtok vzniká důsledkem rozdílné úrovně hladiny u stěny a ve středu spadiště, kdy hladina u stěny spadiště vystoupá nad hranu vtoku odpadní chodby, ale hladina ve středu je stále pod hranou vtoku. U částečně zahlceného vtoku začíná být proudění nepatrně limitováno zadní stěnou. Vtok odpadní chodby se působením proudění od stěn spadiště zatopí, i přestože hladina ve středu spadiště je níže než hrana vtoku. O zahlceném vtoku se hovoří tehdy, pokud se zcela zahltí vtok odpadní chodby.



Obr. 28 – Příčné zakřivení hladiny ve spadišti

Ve spadišti se tvoří nerovnoměrný průběh hladiny v příčném i v podélném směru. Příčné zakřivení hladiny (tj. ve směru kolmém na směr proudění odtékající vody, aneb na šířku spadiště) způsobuje přepadající voda, která má tendenci vytlačovat vodu ze středu ke stěnám spadiště, kde se pak vytváří vyšší úroveň hladiny. Zakřivení hladiny je intenzivnější, pokud přepadající voda disponuje dostatkem energie na vytlačení vody a pokud není ve spadišti dostatečné množství vody pro utlumení energie přepadající vody. Nelze jednoznačně konstatovat, do jaké míry se příčné zakřivení hladiny tvoří po zahlcení vtoku odpadního objektu

z důvodu zhoršených podmínek přístupu do spadiště. Očekává se, že bude docházet k zakřivení hladiny s menší intenzitou. Obrázek 28 názorně zobrazuje vytvoření zakřiveného příčného profilu ve spadišti.

Ve směru proudění odtékající vody (tj. na délku spadiště) se vytváří ve spadišti mírný nerovnoměrný průběh hladiny. Podélný průběh hladiny ve sdruženém objektu pro vybrané průtoky zobrazuje graf 1. Pro nezahlcený vtok odpadní chodby se hladina směrem proti proudu od konce spadiště pozvolna zvyšuje a na začátku spadiště klesá. Snížení hladiny na začátku spadiště způsobuje mimo jiné nulový průtok na začátku přelivné hrany (u čelní stěny přelivu), boční zúžení přepadajícího paprsku vlivem obtékání čelní stěny přelivu a nevýrazný vliv příčného zakřivení. Od začátku spadiště se vlivem přepadu přes přeliv a proudění ve spadišti zvyšuje množství vody i průtok. Na konci spadiště voda odtéká ochotněji než na jeho začátku. Proudící voda si zároveň vytváří sama sobě bariéru v proudění. Na průběh hladiny ve spadišti má vliv příčné zakřivení. Po zahlcení vtoku se začíná ve spadišti akumulovat voda. Zadní stěna vytváří bariéru v proudění a umožňuje odtok vody pouze profilem odpadní chodby. Hladina ve spadišti se srovná do stejné úrovně, až se změní do pozvolně klesajícího průběhu hladiny. Předpokládá se, že nenulový sklon dna by napomohl odtoku vody a zintenzivnil by nerovnoměrný průběh hladiny. Na průběh hladiny ve spadišti působí obecně mnoho faktorů, třeba příčné zakřivení hladiny, zvýšení průtoku po délce spadiště, změna energie přepadající vody, tlakové poměry, nulový sklon dna nebo rozměry sdruženého objektu.

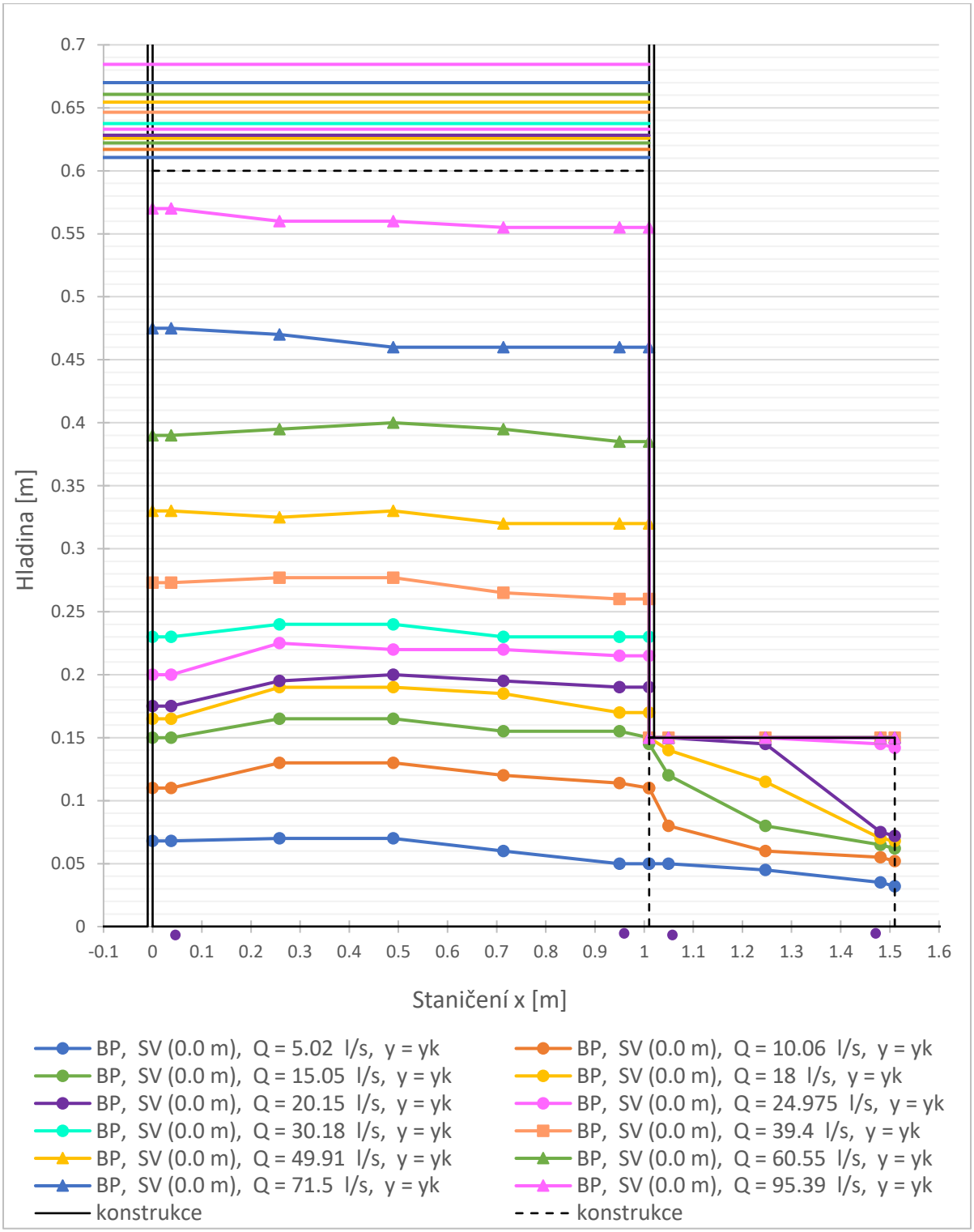
V odpadním objektu se rovněž tvoří nerovnoměrný průběh hladiny, navíc dochází ke změně režimu proudění. Při nezahlceném vtoku odpadní chodby vzniká proudění o volné hladině, kdy hladina od začátku ke konci odpadní chodby klesá. Při přechodu částečně zahlceného vtoku na zahlcený vtok se hladina pozvolně na začátku odpadního objektu přibližuje ke stropu odpadní chodby, až dosáhne jeho stropu a následně se odpadní objekt postupně po své délce zahlcuje. V odpadní chodbě nastává jednak proudění o volné hladině se zahlceným vtokem a jednak i tlakové proudění. Zahlcení vtoku na fyzikálním modelu nastává při průtoku cca 18,5 l/s. Ke vzniku tlakového proudění na začátku odpadního objektu dojde cca při témže průtoku nebo těsně po něm. Při tlakovém proudění se hromadí za vtokem do odpadu vzduch. V příčném směru odpadního objektu (na jeho šířku) nevzniká konstantní průběh hladiny. Odborná literatura uvádí, že při průchodu odpadního objektu tělesem hráze nesmí v objektu vzniknout tlakové proudění. [3] Při tlakovém proudění hrozí negativní rizika spjatá s účinkem proudu nejen pro konstrukci objektu, ale i pro jeho okolí.

Na fyzikálním modelu se rozlišuje dokonalý přepad přes přeliv, přechodová oblast přepadu a zatopený přepad. Dokonalý přepad přes přeliv se utváří při proudění o volné hladině i tlakovém proudění v odpadní chodbě. Při stoupání hladiny ve spadišti se mění dokonalý přepad přes přelivnou hranu na zatopený přepad. Při zatopeném přepadu hladina ve spadišti vystoupá nad přelivnou hranu a dosáhne úrovně blízké horní hladině před sdruženým objektem. Při zatopeném přepadu narůstá horní hladina před sdruženým objektem rychlejším tempem, i když průtok stoupá pomaleji. Zatopený přepad vzniká při tlakovém proudění v odpadním objektu. Graf 2 zobrazuje konzumční křivku bezpečnostního přelivu, tj. zavilost horní hladiny před sdruženým objektem („horní hladina v nádrži“) na průtoku.

Při přepadu přes přelivnou hranu, při dopadu do spadiště i prouděním spadištěm se voda provzdušňuje, což má za účinek utvoření provzdušněného proudění ve spadišti a v odpadní chodbě. Provzdušněný proud (tj. směs vody a vzduchu) má jiné vlastnosti (př. hustotu, rychlost, hloubku, rozložení tlaku). Při vystoupání hladiny blíže k přelivné hraně se snižuje množství vzduchu ve vodě. Při zatopeném přepadu proudí spadištěm a odpadní chodbou voda s občasnými bublinkami strhávaného vzduchu. Implikací obtékání čelní stěny se utváří na hladině víry, které strhávají vzduch. Při přepadu přes přeliv se přepadající paprsky postupně přibližují k sobě, až se navzájem dotknou a do spadiště dopadají do společného místa. Zvýšením přepadové výšky a stoupáním hladiny ve spadišti se paprsky navzájem dotýkají v kratší vzdálenosti od horní hladiny, až se nakonec ztrácí a utváří rovnou hladinu. Mírné odklonění přepadajícího paprsku u zadní stěny přelivu způsobuje konstrukce modelu, kdy se zde ponechala drážka pro stavidlo na vtoku do odpadní chodby (pro jiný fyzikální model). Odklonění paprsku nemá vliv na přepad. U zadní stěny se vytváří prostor pro přívod vzduchu. Intenzita provzdušnění proudění by se lišila možná na skutečném vodním díle.

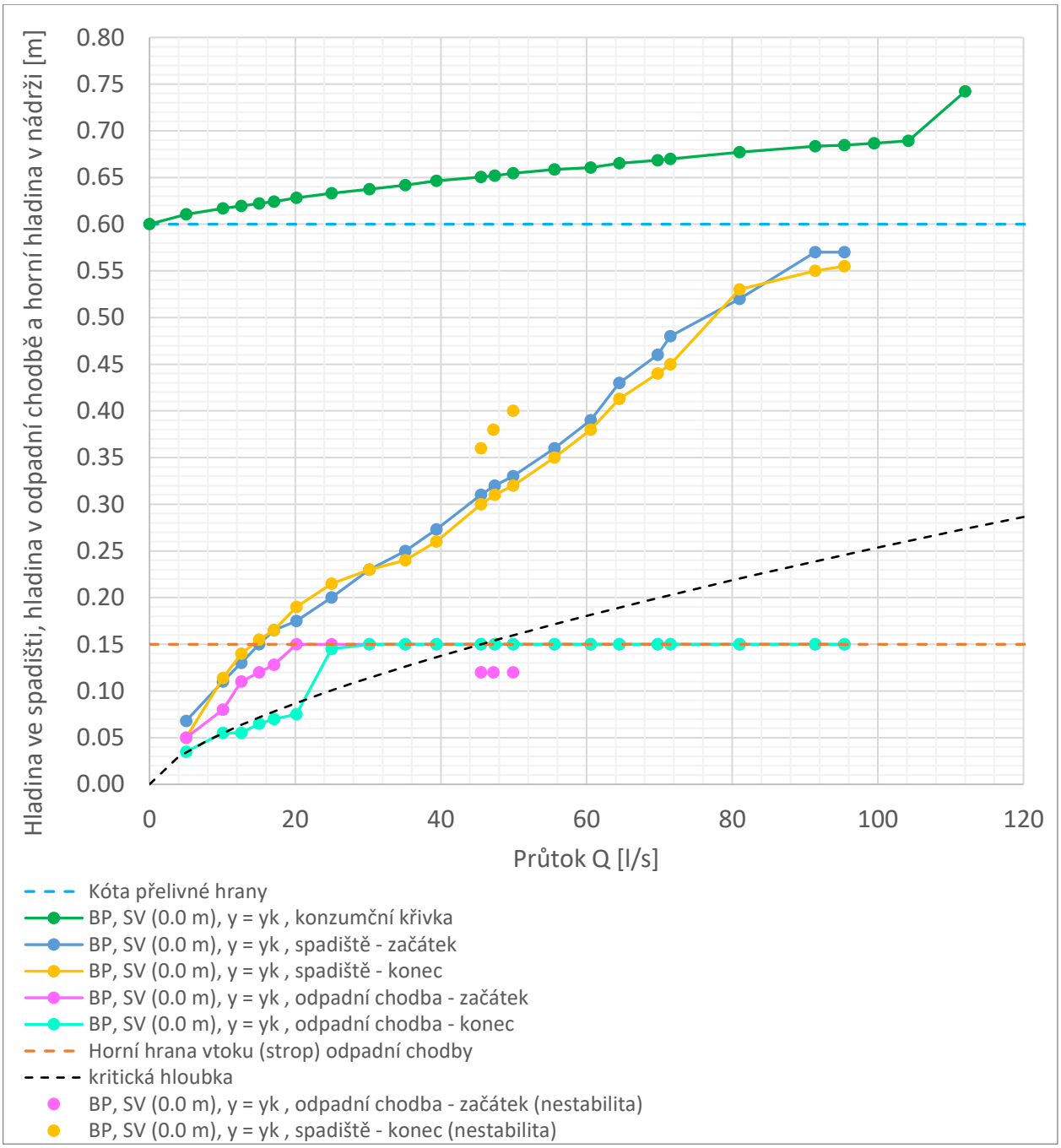
Zajímavostí je, že při ustálení proudění na fyzikálním modelu došlo k nestabilitě proudu pro průtok v rozmezí 45 l/s až 55 l/s. Nestabilita proudu se projevila náhlým poklesem hladiny ve spadišti. Usuzuje se, že tento jev vzniká ustálením fyzikálního modelu a že pokles hladiny demonstruje vytvoření definitivního tlakového proudění v odpadní chodbě. Před nestabilitou proudění se označuje za tlakové proudění i stav, kdy se proudění dotýká stropu odpadní chodby. Provzdušněné proudění má jiné chování. Na fyzikálním modelu pro tento experiment je ve spadišti a v odpadní chodbě říční režim proudění (při proudění o volné hladině). Předpokládá se, že průběh hladiny na fyzikálním modelu je částečně ovlivněn volbou nulového sklonu dna. Průběh hladiny ve sdruženém objektu taktéž ovlivňuje zahlcení odpadní chodby (tlakové proudění) pro již nízké průtoky. Pro experiment „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“ zobrazuje graf 2 závislost průtoku na hladině ve spadišti (začátek a konec) i na hladině v odpadní chodbě (začátek a konec) a dále zobrazuje bodově i ukázku nestabilitu proudění. Grafy zobrazují průměrné hladiny u stěn objektů. Příloha č. 2 *Experiment „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“* obsahuje fotografie z měření, které zachycují průběh hladiny ve spadišti a v odpadní chodbě.

Na fyzikálním modelu se měřila i dolní okrajová podmínka hladina dolní vody ke srovnávací rovině y_d = 0,07 m. Dolní okrajová podmínka y = 0,07 m simuluje takové podmínky na fyzikálním modelu, kdy proudění je ovlivněno zpětným vzdutím dolní vody. Na fyzikálním modelu se tento stav nastavil zahrazením výtoku hradidly tak, aby se utvořila požadovaná hladina dolní vody. Protože byla měřena pouze tato dolní okrajová podmínka, nelze jednoznačně diskutovat vliv zpětného vzdutí dolní vody. Pro dolní okrajovou podmínku y = 0,07 m zpětné vzdutí dolní vody neovlivňuje horní hladinu před sdruženým objektem, ale ovlivňuje hladinu ve spadišti a v odpadní chodbě. Pro nižší průtoky je zvýšení hladiny výraznější. Po zahlcení odpadní chodby zpětné vzdutí neprojevuje vliv. Za výtokem z odpadní chodby se vytváří vodní skok. Očekává se, že zvýšením dolní vody se vytvoří větší zpětné vzdutí, a tím i větší vliv na průběh hladiny. Míru ovlivnění lze pozorovat z grafů uvedených v Příloze 2.



● označení polohy vynesené závislosti hladiny ve spadiště (začátek ve vzdálenosti 0,04 m a konec ve vzdálenosti 0,95 m) a v odpadní chodbě (začátek ve vzdálenosti 1,05 m a konec ve vzdálenosti 1,48 m) na průtoku pro graf 2

Graf 1 – Průběh hladiny ve sdruženém objektu pro dolní okrajovou podmínku y = yk



Graf 2 – Konzumční křivka bezpečnostního přelivu (závislost horní hladiny na průtoku), závislost průtoku na hladině ve spadišti (začátek, konec), závislost průtoku na hladině v odpadní chodbě (začátek, konec) a ukázka nestability proudění ve spadišti a v odpadní chodbě (vyznačení polohy viz Graf 1)

Vysvětlení legendy grafů 1 až 2

BP, SV (0,0 m)	označení experimentu bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí (výška otevření výpusti činí 0,0 m)
Q = 20.15 l/s	křivka zobrazuje průběh hladiny pro průtok 20,15 l/s
$y = y_k$	dolní okrajová podmínka je rovna hladině kritické hloubky $y_d = y_k$
konzumční křivka	označení konzumční křivky bezpečnostního přelivu
spadiště/odpadní chodba	označení pozice ve sdruženém objektu

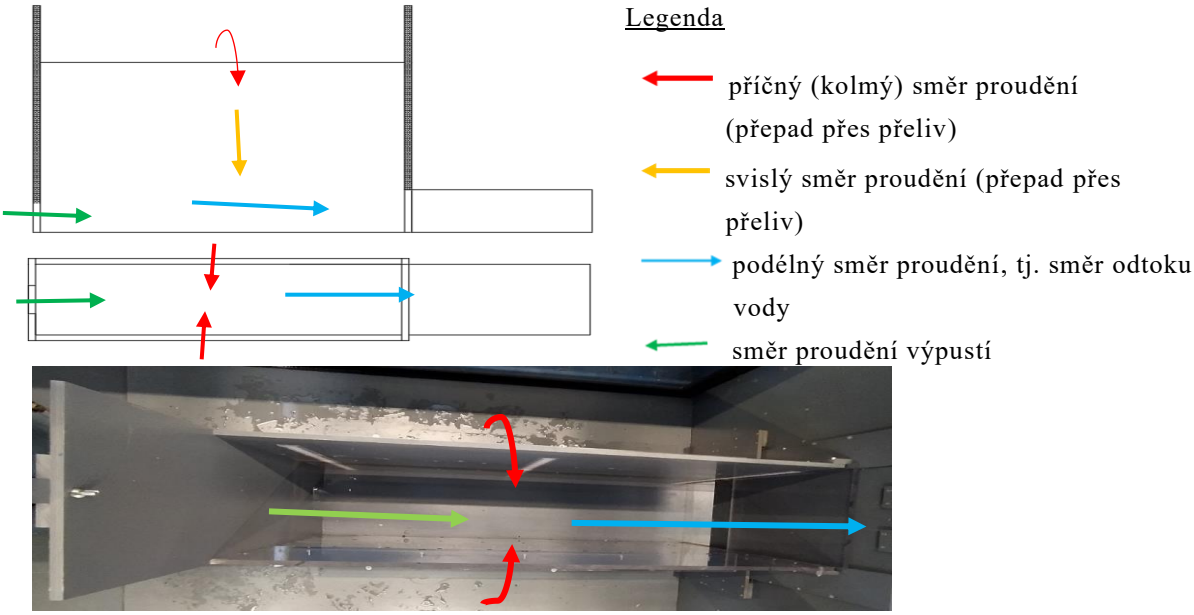
3.4.2 Experiment „bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí“

Experiment „bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí“ představuje situaci, kdy voda proudí nejdříve pouze spodní výpustí a po dosažení horní hladiny úrovně přelivné hrany se přidává zároveň i přepad přes bezpečnostní přeliv.

Pro tento experiment se uvažovalo otevření stavidla na výšku 0,1 m a 0,06 m (dále označeno jako výška otevření výpusti). Horní okrajovou podmínku tvoří série průtoků podle individuálních požadavků vyplývajících z měření experimentu. Pro výšku otevření výpusti 0,1 m tvoří dolní okrajovou podmínku hladina dolní vody ke srovnávací rovině y_d = 0,07 m, hladina dolní vody ke srovnávací rovině y_d = 0,13 m a hladina kritické hloubky $y_d = y_k$. Dolní okrajová podmínka hladina kritické hloubky simuluje takové podmínky výtoku pod hrází, kdy není proudění ve sdruženém objektu ovlivněno zpětným vzdutím dolní vody a na fyzikálním modelu se pak může utvořit kritická hloubka. Na fyzikálním modelu se tento stav aplikoval tak, že se neumístila hradidla na výtoku z laboratorního žlabu a ponechalo se proudění volný prostor. Dolní okrajová podmínka hladina y_d = 0,07 m a y_d = 0,13 m simuluje takové podmínky, kdy proudění je ovlivněno zpětným vzdutím dolní vody. Na fyzikálním modelu se tento stav nastavil zahrazením výtoku hradidly tak, aby se utvořila požadovaná hladina dolní vody. Pro výšku otevření výpusti 0,06 m dolní okrajovou podmínku tvoří hladina kritické hloubky $y_d = y_k$. Jelikož výška otevření výpusti 0,06 m se doměřovala dodatečně, nezměřila se pro ni jiná okrajová podmínka. Měření se pro stejný průtok neopakovalo. Pro dolní okrajovou podmínku $y = y_k$ z naměřených dat vyplývají následující poznatky.

Před vystoupáním horní hladiny nad úroveň přelivné hrany proudí voda pouze výpustí. Při proudění výpustí nastává ve sdruženém objektu nejprve nerovnoměrné proudění o volné hladině bez zahlceného vtoku výpusti. Když vystoupá horní hladina nad horní hranu vtoku výpusti, výpust se zatápí a ve sdruženém objektu nastává nerovnoměrné proudění o volné hladině se zahlceným vtokem výpusti. Ve spadišti a v odpadní chodbě se utváří proudění o volné hladině ve směru proudění odtékající vody. V podélném směru (ve směru proudění) se hladina ve spadišti a v odpadním objektu pozvolna snižuje. Při proudění výpusti se proud po výšce i po šířce zužuje, až se ve spadišti opět po šířce rozšíří a po výšce sníží. Pro zvolené výšky otevření výpusti převládá na fyzikální modelu (ve spadišti a v odpadním objektu) bystřinný režim proudění.

Po vystoupání hladiny nad úroveň přelivné hrany se přidává přepad přes bezpečnostní přeliv. Ve spadišti se vytváří interakce dvou směrů proudění – proudění výpustí a přepadu přes přeliv. Přes přelivnou hranu voda přepadá příčně (kolmo) na směr proudění odtékající vody do spadiště, kde mění směr proudění do směru proudění odtékající vody. Voda výpustí proudí ve směru odtékající vody. Obrázek 29 znázorňuje směry proudění ve sdruženým objektu. Průběh hladiny ve spadišti a v odpadní chodbě se utváří dle vzájemné interakce proudění, přičemž vzájemné působení proudění výpusti a přepadu přes bezpečnostní přeliv závisí na různých parametrech. Například závisí na vlastnostech dílčích částí sdruženého objektu, na horní hladině, na hladině ve spadišti, na podmínkách při výtoku, na výšce otevření výpusti, na provzdušnění vody atd



Obr. 29 – Popis směru proudění při experimentu

Ve spadišti se utváří nerovnoměrný průběh hladiny v příčném i v podélném směru. Podélný průběh hladiny ve sdruženém objektu při experimentu „bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí“ pro vybrané průtoky demonstrují grafy 6 a 7. Přepadající voda má tendenci vytlačovat vodu ve spadišti ze středu ke stěnám, pokud disponuje dostatkem energie nebo pokud není ve spadišti dostatečné množství pro utlumení přepadající vody. Přepadající proud taktéž ovlivňuje vytékající proud výpustí. Kupříkladu přepadající paprsky dělí vytékající paprsek výpustí na boční proud ke stěnám a na hlavní proud ve středu. Kombinací rozdělení proudu i vytlačení přepadající vody dosahuje hladina u stěn spadiště výše než v jeho středu.

Při souběžném provozu výpusti a bezpečnostního přelivu napomáhá výpust zrychlovat proudění vody ve spadišti. Na začátku spadiště proud od výpusti vytéká s nenulovým průtokem a disponuje energií k vyvinutí síly na odtlačení akumulované přepadající vody ve spadišti dále po proudu. Proud výpusti vytlačuje naakumulovanou vodu ze začátku spadiště na vtok odpadního objektu, čímž způsobuje zvýšení hladiny u vtoku odpadu a také napomáhá k odtoku vody ze spadiště. Po zatopení výtoku výpusti se vliv proudění výpustí snižuje, ale stále v určité míře přetrvává. Snížením výšky otevření otvoru výpusti proudí výpustí menší množství vody, sníží se síla na odtlačení vody a vliv proudění se projevuje méně.

Obdobně jako u experimentu „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“ se rozlišuje nezatopený, částečně zatopený a zatopený vtok odpadní chodby. Při nezahlceném vtoku závisí průběh hladiny ve sdruženém objektu na výšce otevření výpustí. Ve spadišti vzniká proudění o volné hladině. Po zahlcení vtoku odpadní chodby je hladina na začátku spadiště níže než na jeho konci. Protože proudění výpustí stále tlačí masu vody před sebou a zároveň zadní stěna s vtokem odpadní chodby vytváří bariéru pro odtékající vodu, začíná se voda postupně ve spadišti od jeho konce akumulovat a výpust se pozvolna zatápí. Hladina na začátku spadiště pozvolna roste, až se hladina ve spadišti vyrovná do podobné úrovně. Zahlcení vtoku odpadní chodby nastává při souběžném provozu výpusti a přelivu.

Proudění v odpadní chodbě se liší pro výšku otevření výpusti 0,1 m a výšku otevření výpusti 0,06 m. Pro výšku otevření výpusti 0,06 m přechází proudění o volné hladině do tlakového proudění v odpadní chodbě pozvolna od vtoku až po její celé délce. Naopak u otevření 0,1 m dochází k náhlé změně proudění z proudění o volné hladině do tlakového proudění v odpadní chodbě. Při změně proudění vzniká, stejně jako u experimentu „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“, taktéž nestabilita proudění. Tehdy se skokově sníží hladina ve spadišti a proudění v odpadu se změní, avšak pro některé průtoky se dočasně i střídá. Nestabilita se v tomto případě přisuzuje ustálení fyzikálního modelu a chování proudění ve sdruženém objektu. Při nestabilitě proudění se mírně ovlivňuje i hladina před sdruženým objektem, řádově cca do 2 mm. Pro výšku otevření 0,06 byla mírně pozorována nestabilita proudění. Přisuzuje se ustálení modelu a vzniku definitivního tlakového proudění v odpadní chodbě.

Jako u předešlého experimentu, na fyzikálním modelu se rozlišuje dokonalý přepad přes přeliv, přechodová oblast přepadu a zatopený přepad. Dokonalý přepad přes přeliv se utváří při proudění o volné hladině i tlakovém proudění v odpadní chodbě. Při zatopeném přepadu hladina ve spadišti vystoupá nad přelivnou hranu a dosáhne úrovně blízké horní hladiny před sdruženým objektem. Při zatopeném přepadu stoupá horní hladina rychlejším tempem, i když průtok narůstá pomaleji. Graf 4 a graf 5 zobrazují konzumční křivku sdruženého objektu (pro exp. „bezpečnostní přeliv. s otevřenou výpustí“) a konzumční křivku bezpečnostního přelivu (pro exp. „bezpečnostní přeliv. se zavřenou výpustí“). Konzumční křivka bezpečnostního přelivu představuje pouze závislost horní hladiny na průtoku při přepadu přes přeliv. Konzumční křivka sdruženého objektu se skládá z konzumční křivky výpusti (pro horní hladinu pod úrovní přelivné hrany, průtok převádí pouze výpust) a z kombinace konzumční křivky výpusti s konzumční křivkou bezpečnostního přelivu (pro horní hladinu nad úrovní přelivné hrany, průtok převádí výpust i bezpečnostní přeliv).

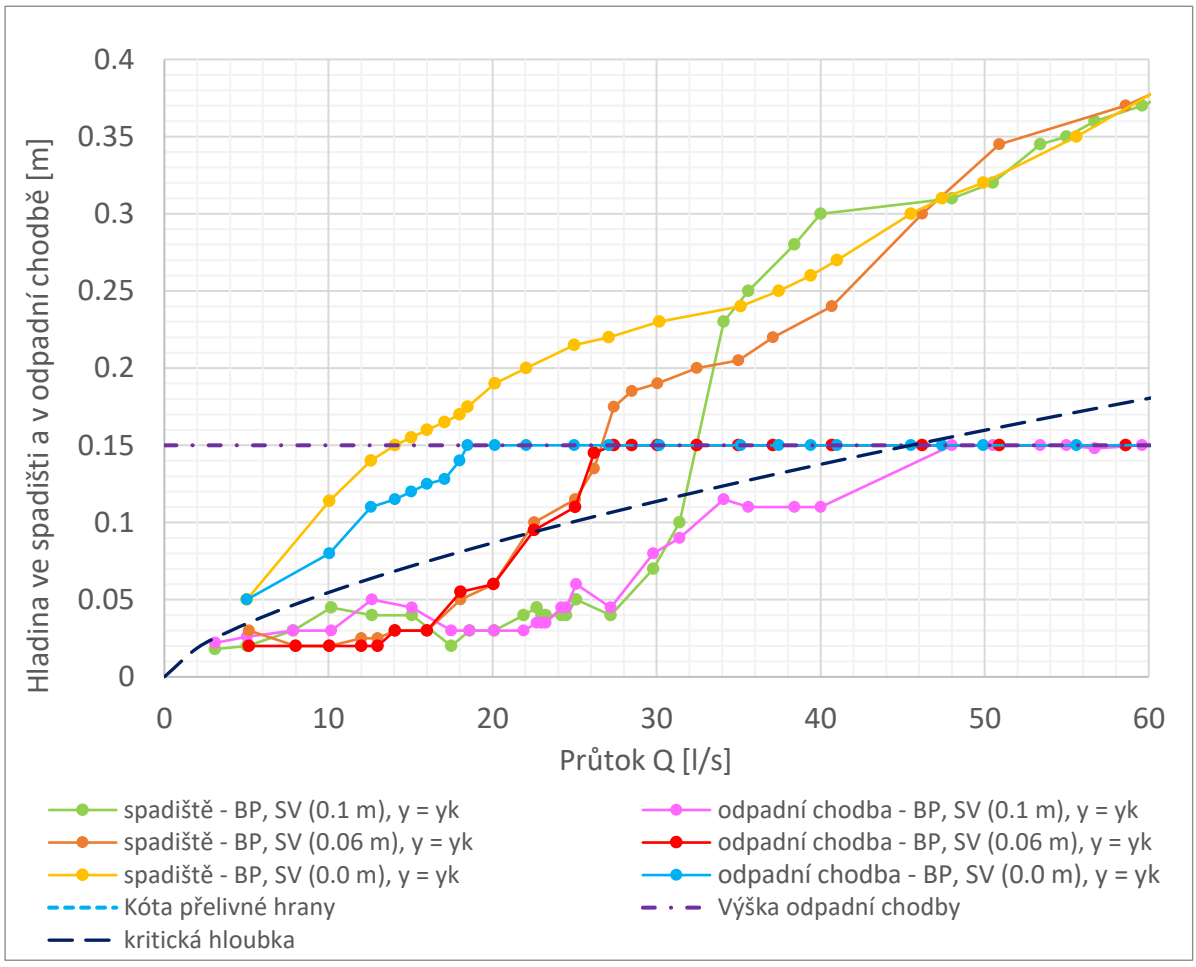
Při přepadu přes přelivnou hranu, dopadu do spadiště i prouděním spadištěm se voda provzdušňuje, což má za účinek utvoření provzdušněného proudění ve spadišti a v odpadní chodbě. Očekává se, že se intenzita provzdušnění proudu bude lišit na skutečném vodním díle. Při proudění výpustí se voda neprovzdušňuje. Při zatopeném přepadu proudí spadištěm a odpadní chodbou voda s občasnými bublinkami strhávaného vzduchu. Implikací obtékání čelní stěny se utváří na hladině víry, které strhávají vzduch. Z důvodu nedostatečného množství naměřených dat pro situaci zatopeného přepadu nelze jednoznačně konstatovat, jak se bude lišit průběh zavilosti horní hladiny na průtoku při experimentu s otevřenou i se zavřenou výpustí. Předpokládá se, že pro zatopený přepad budou mít konzumční křivky sdruženého objektu a konzumční křivka bezpečnostního přelivu obdobný průběh u všech experimentů.

Pro dolní okrajové podmínky y = 0,07 m a y = 0,13 m (pro výšku otevření výpusti 0,1 m) měření na fyzikálním modelu ukázalo, že zpětným vzdutím dolní vody se ovlivňuje horní hladina při proudění výpustí i průběh hladiny ve spadišti a v odpadní chodbě v závislosti na průtoku a na míře zpětného vzdutí. Míru ovlivnění lze pozorovat na grafech uvedených v Příloze 3. Po zahlcení odpadního objektu zpětné vzdutí neprojevuje výrazný vliv. Za výtokem z odpadní chodby se vytváří vodní skok. Očekává se, že zvýšením dolní vody se vytvoří větší zpětné vzdutí, a tím i větší vliv na průběh hladiny.

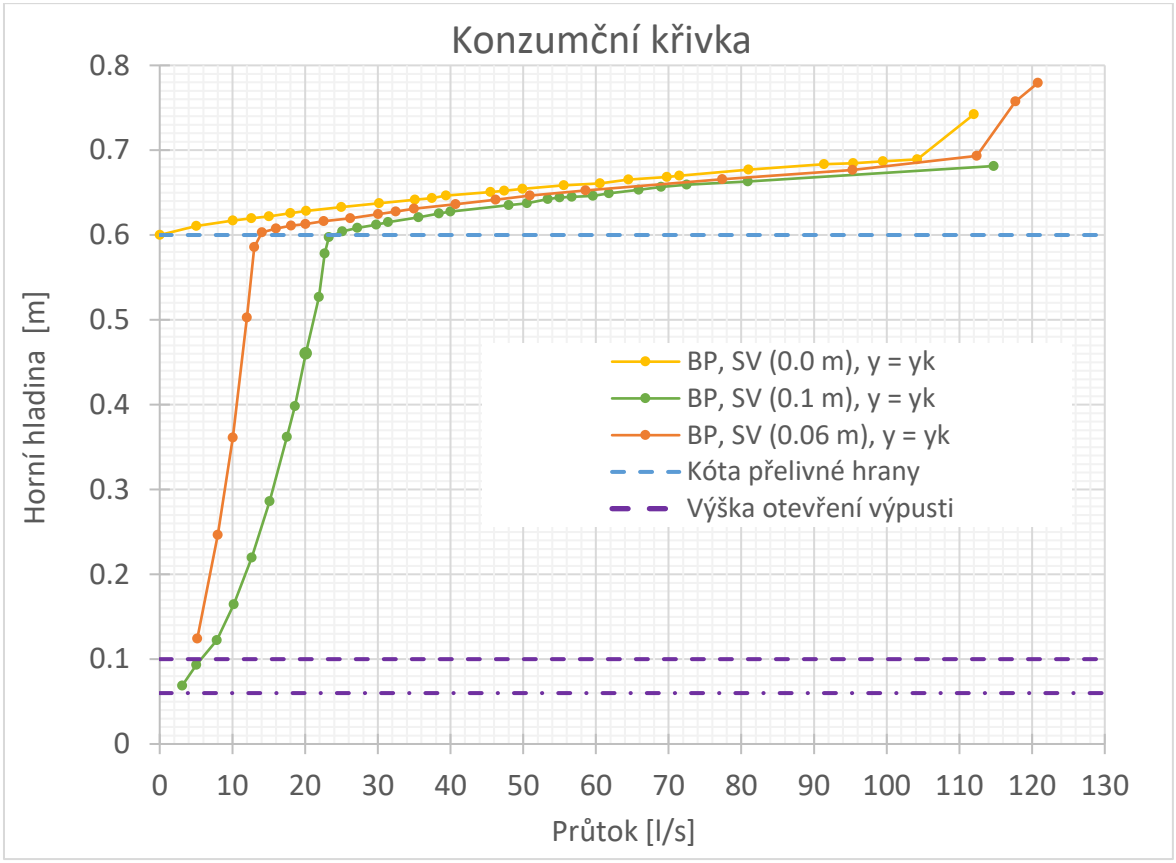
Graf 3 zobrazuje závislost průtoku na hladině ve spadišti (konec spadiště) a na hladině v odpadní chodbě (začátek odpadu) při experimentu „bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí“ (pro výšku otevření výpusti 0,1 m a 0,06 m) a při experimentu „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“ (pro výšku otevření výpusti 0,0 m) pro dolní okrajovou podmínku $y = yk$. V příloze 3 *Experiment „bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí“* se nacházejí fotografie zachycující průběh hladiny ve sdruženém objektu pro vybrané průtoky a dále další grafy.

Vysvětlení legendy grafů 3 až 7

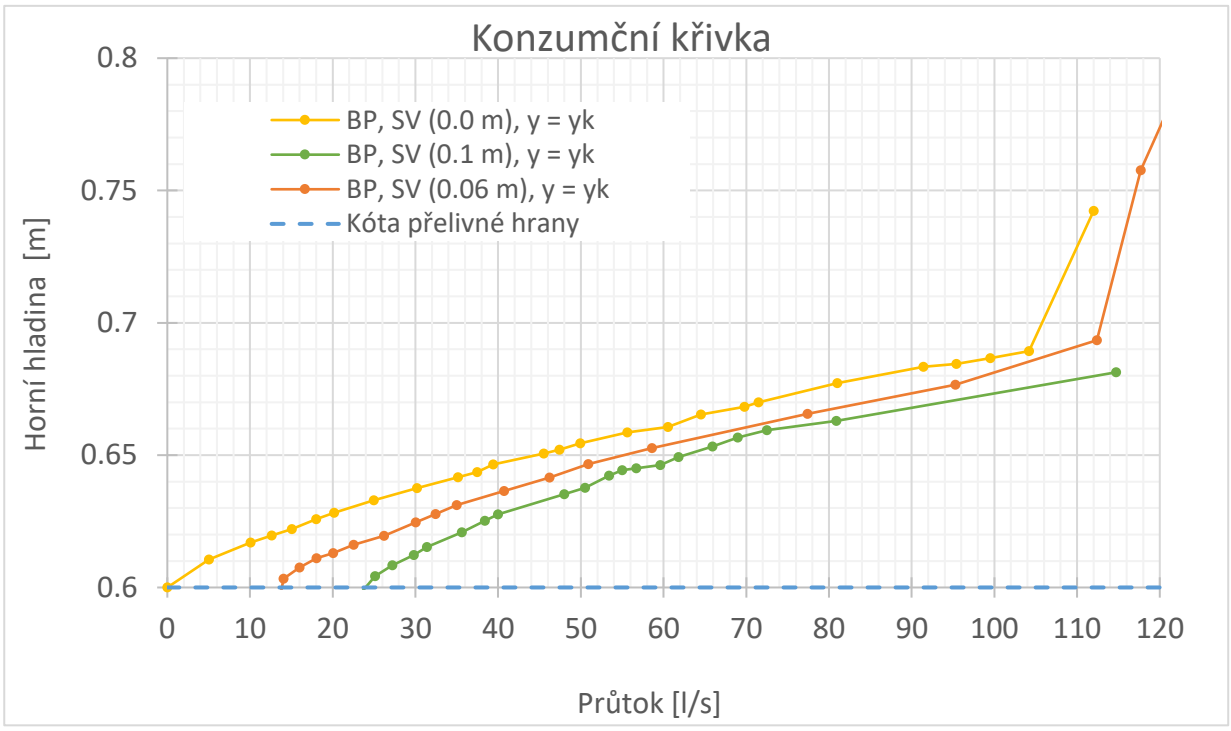
BP, SV (0,0 m)	označení experimentu bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí (výška otevření výpusti činí 0,0 m) nebo otevřenou výpustí (výška otevření výpusti činí 0,1 m nebo 0,06 m)
Q = 20.15 l/s	křivka zobrazuje průběh hladiny pro průtok 20,15 l/s
$y = y_k$	dolní okrajová podmínka je rovna hladině kritické hloubky $y = y_k$
spadiště – konec/odpadní chodba	označení pozice pro vynesení křivky



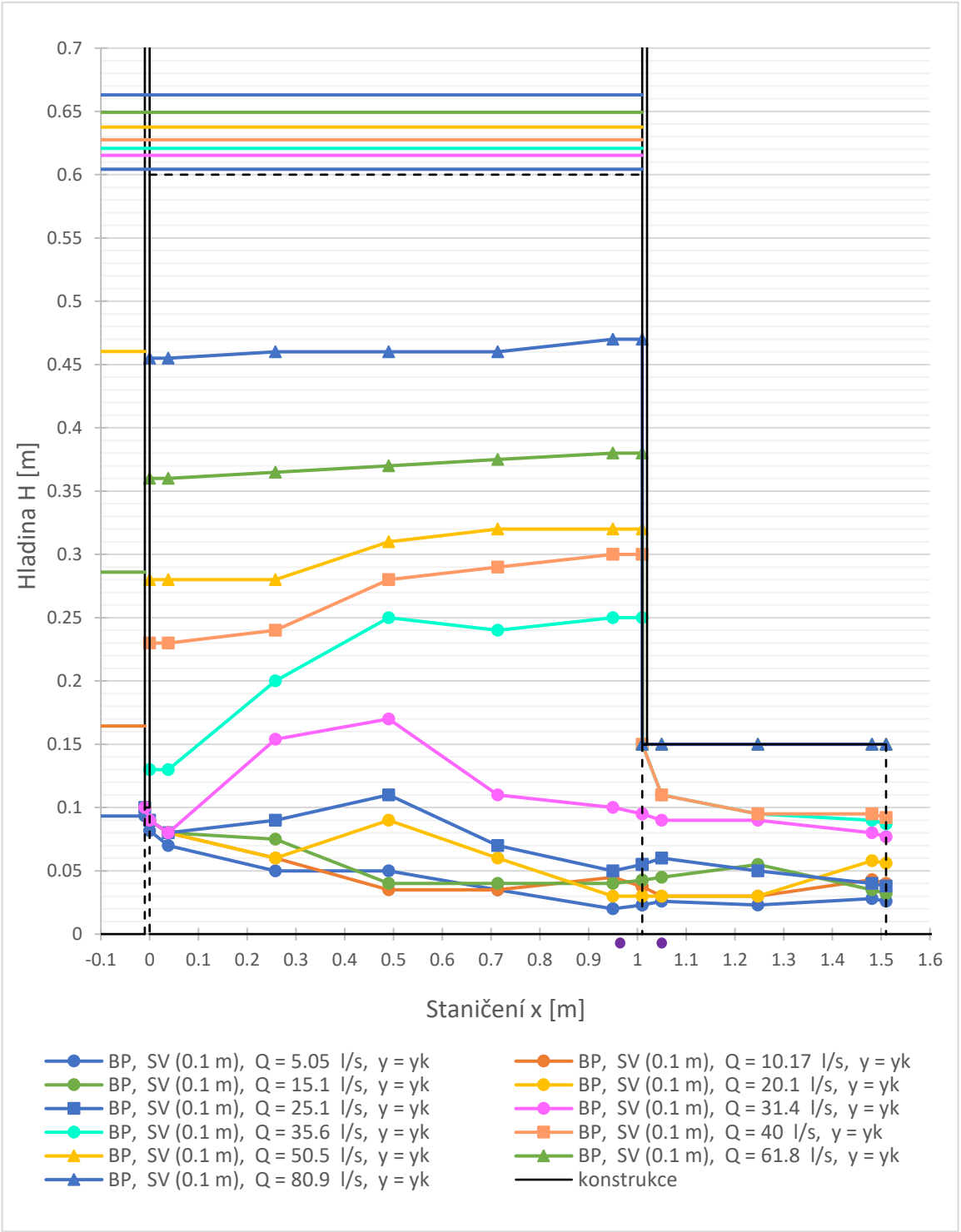
Graf 3 – Závislost průběhu hladiny ve spadišti (konec) a hladiny v odpadní chodbě (začátek) na průtoku při experimentu „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“ a experiment „bezpečností s otevřenou výpustí“ (výška otevření výpusti 0,1 m a 0,06 m) – detail (označení vynesené polohy viz Graf 6)



Graf 4 – Konzumční křivka bezpečnostního přelivu (exp. bezpečnostní přeliv se zavřenou výpust) a konzumční křivka sdruženého objektu (exp. bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí)

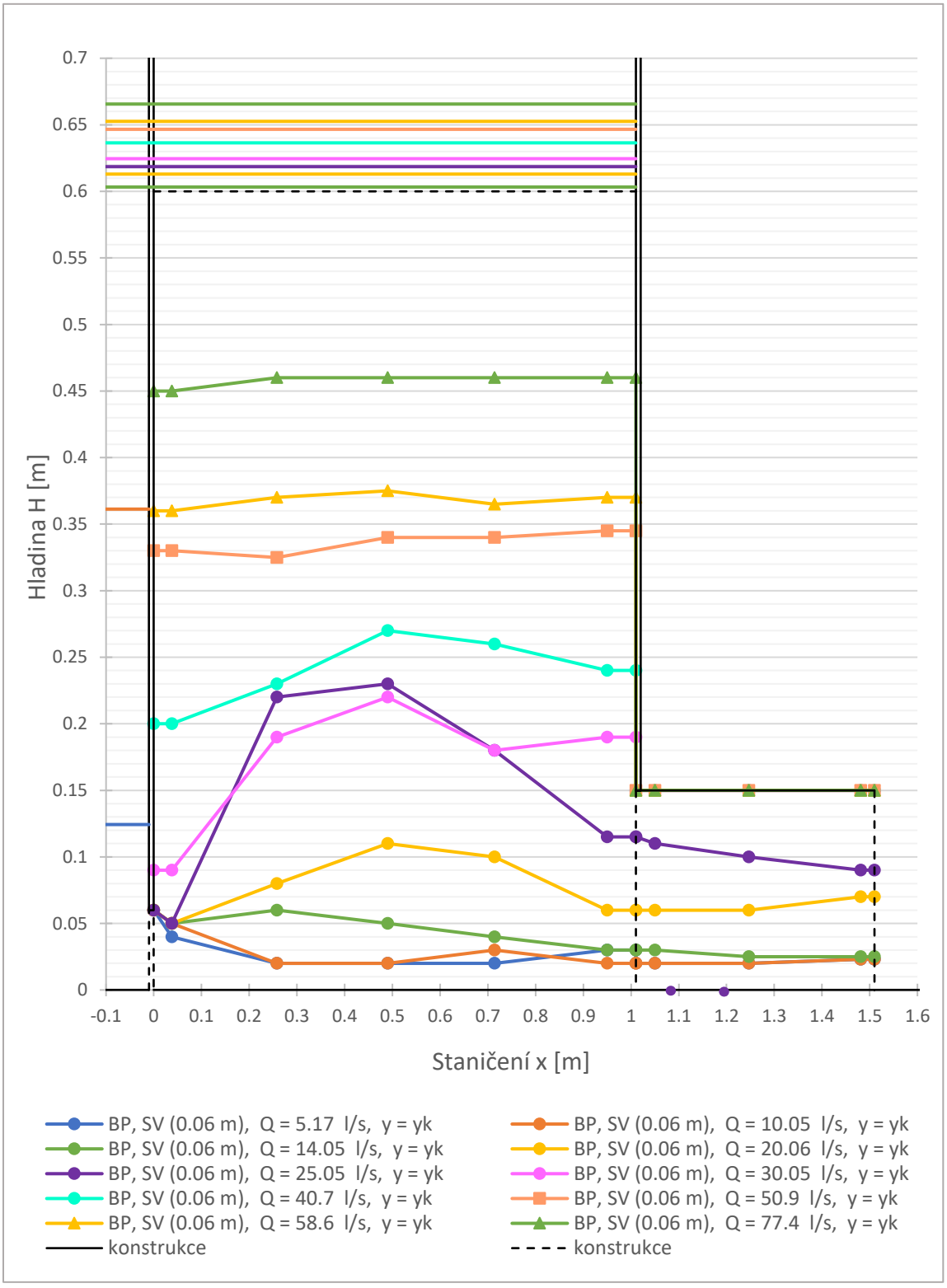


Graf 5 – Detailní konzumční křivka bezpečnostního přelivu (exp. bezpečnostní přeliv se zavřenou výpust) a konzumční křivka sdruženého objektu (exp. bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí)



● označení polohy vynesení závislosti hladiny ve spadišti (konec ve vzdálenosti 1,95 m) a v odpadní chodbě (začátek ve vzdálenosti 1,05m) pro graf 3

Graf 6 – Průběh hladiny ve sdruženém objektu (výška otevření výpusti 0,1 m)

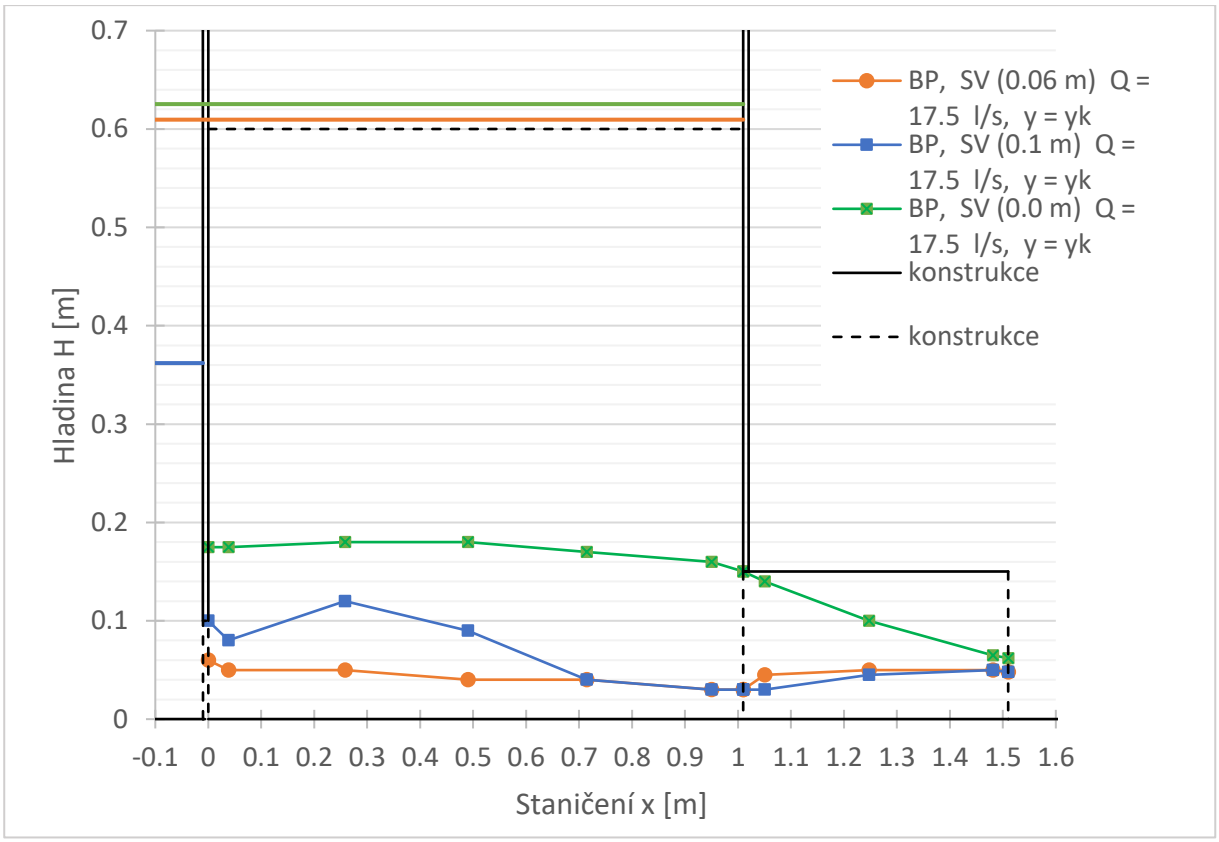


- označení polohy vynesení závislosti hladiny ve spadišti (konec ve vzdálenosti 1,95 m) a v odpadní chodbě (začátek ve vzdálenosti 1,05 m) pro graf 3

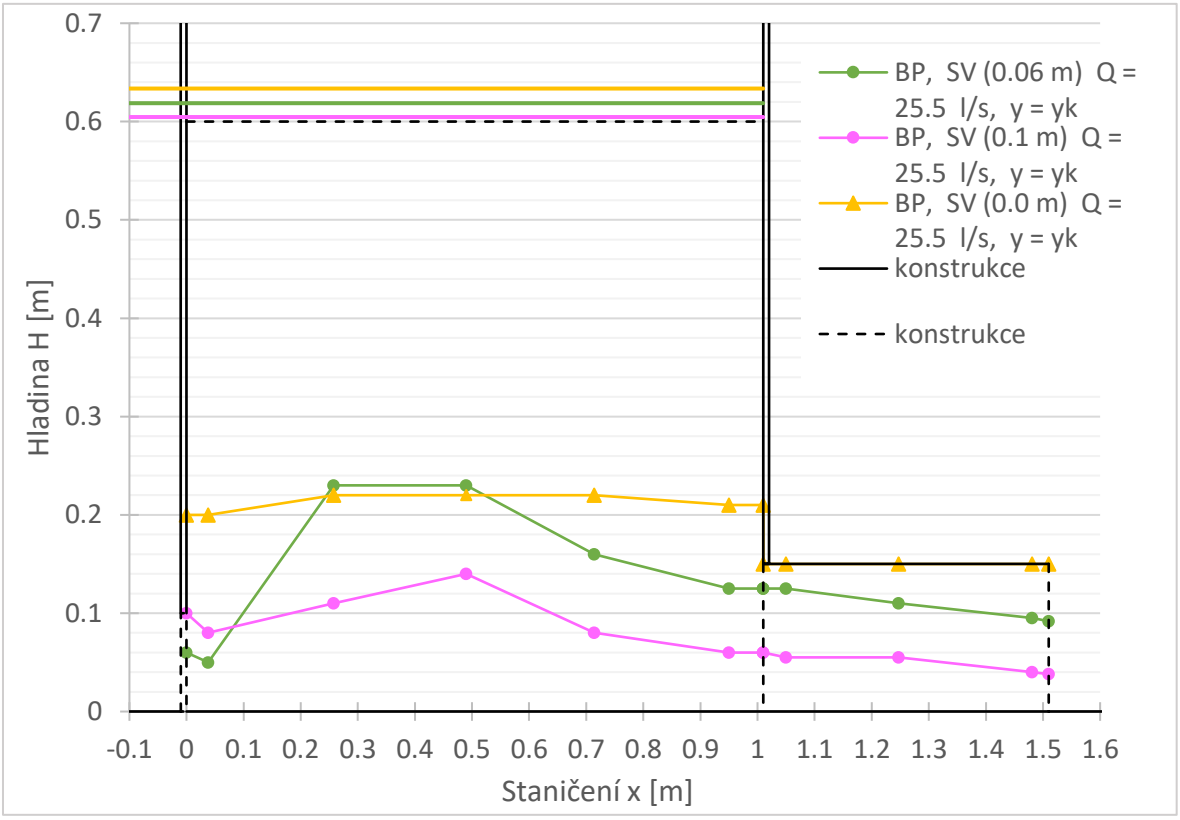
Graf 7 – Průběh hladiny ve sdruženém objektu (výška otevření výpusti 0,06 m)

Pro stejný průtok se při experimentu „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“ ve srovnání s experimentem „bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí“ vytváří vyšší horní hladina. Při experimentu „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“ nepřevádí výpust žádný průtok, a tak průtok přepadá pouze přes bezpečnostní přeliv. I pro stejnou horní hladinu při experimentu „bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí“ proudí vyšší průtok spadištěm a odpadní chodbou než při experimentu „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“, neboť část průtoku přepadá přes přeliv a část průtoku proudí výpustí. Pro stav neprovozuschopné výpusti se při proudění o volné hladině ve spadišti i v odpadní chodbě vytváří pro stejný průtok taktéž vyšší hladina. Při tlakovém proudění po „nestabilitě proudění“ se hladiny ve spadišti pro oba experimenty přibližují, jak vyplývá z grafu 3.

Při experimentu „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“ se vtok odpadní chodby zahltí při průtoku cca 18,5 l/s (pozn. horní hladina cca 0,626 m, přepadová výška cca 0,026 m). Tlakové proudění na začátku odpadního objektu vzniká při témže průtoku, nebo těsně po něm. Při experimentu „bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí“ s výškou otevření výpusti 0,1 m dojde k zahlcení vtoku při průtoku mezi 32 l/s až 34 l/s (pozn. horní hladina 0,619 m, přepadová výška cca 0,019 m), ale ke vzniku tlakového proudění dojde až při průtoku 48 l/s. Pro výšku otevření výpusti 0,06 m vzniká úplné zahlcení vtoku při průtoku cca 28,0 l/s (pozn. horní hladina cca 0,622 m, přepadová výška cca 0,022 m) a ke vzniku tlakového proudění na začátku odpadu dojde při průtoku rovněž cca 28 l/s. Z dat vyplývá, že výpust napomáhá zvyšovat kapacitu odpadního objektu (pro dolní okrajovou podmínku $y = y_k$). Kapacita odpadního objektu představuje maximální průtok, při němž nevzniká tlakový režim proudění v odpadu. Kapacita odpadní chodby bude asi ovlivněna i případně zpětným vzdutím dolní vody. Předpokládá se, že asi čím vyšší bude zpětné vzdutí, tím se pak projeví více snížení kapacity odpadu. Při současné činnosti výpusti a bezpečnostního přelivu se kapacita výpusti (pro dolní okrajovou podmínku $y = y_k$) se zvýšením horní hladiny snižuje, jak vyplývá z tabulky 1 (pozn. předpokládá se, že kapacita bezpečnostního přelivu zůstává neměnná). Snížení kapacity výpusti způsobuje asi snížení spádu mezi horní hladinou a hladinou ve spadišti. Při současném provozu obou funkčních zařízení je horní hladina v nádrži řízená jak přepadem přes bezpečnostní přeliv, tak i prouděním výpustí. I hladina ve spadišti je ovlivněna vzájemnou interakcí proudění výpustí a přepadu přes přeliv. Při současném provozu zařízení se hladina ve spadišti pozvolna zvyšuje. Graf 8 a graf 9 zachycuje průběh hladiny ve sdruženém objektu pro oba experimenty při totožném průtoku.



Graf 8 – Průběh hladiny ve sdruženém objektu při experimentu „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“ a při experimentu“ bezpečností s otevřenou výpustí“ (výška otevření výpusti 0,1 m a 0,06 m) – průtok 17,5 l/s



Graf 9 – Průběh hladiny ve sdruženém objektu při experimentu „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“ a při experimentu“ bezpečností s otevřenou výpustí“ (výška otevření výpusti 0,1 m a 0,06 m) – průtok 25,5 l/s

Tabulka 1 – Porovnání průtoku při experimentu „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“ („konzumční křivka bezpečnostního přelivu) a při experimentu „bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí“(„konzumční křivka sdruženého objektu“) s ohledem na úroveň horní hladiny (dolní okrjaová podmínka y = yk)

Hladina [m]	Průtok [l/s]				
	Experiment „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“	Experiment „bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí“ (výška otevření 0,1 m)	rozdíl průtoku experimentu s otevřenou a se zavřenou výpustí (tj. kapacita spodní výpustě)	Experiment „bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí“ (výška otevření 0,06 m)	rozdíl průtoku experimentu s otevřenou a se zavřenou výpustí (tj. kapacita spodní výpustě)
0,600	0,00	23,69	23,69	13,85	13,85
0,605	2,37	25,46	23,09	14,85	12,48
0,610	4,74	28,27	23,53	17,7	12,96
0,615	8,49	31,24	22,76	21,64	13,16
0,620	13,24	34,60	21,36	26,76	13,51
0,625	17,57	38,27	20,71	30,39	12,82
0,630	21,87	42,49	20,62	34,13	12,25
0,635	27,43	47,69	20,26	39,34	11,91
0,640	33,13	51,98	18,85	44,55	11,42
0,645	38,39	56,70	18,31	49,40	11,01
0,660	58,90	73,90	15,00	69,30	10,40

Pozn. tabulka uvádí číselně část konzumní křivky sdruženého objektu a konzumční křivky bezpečnostního přelivu (viz v grafu 5)

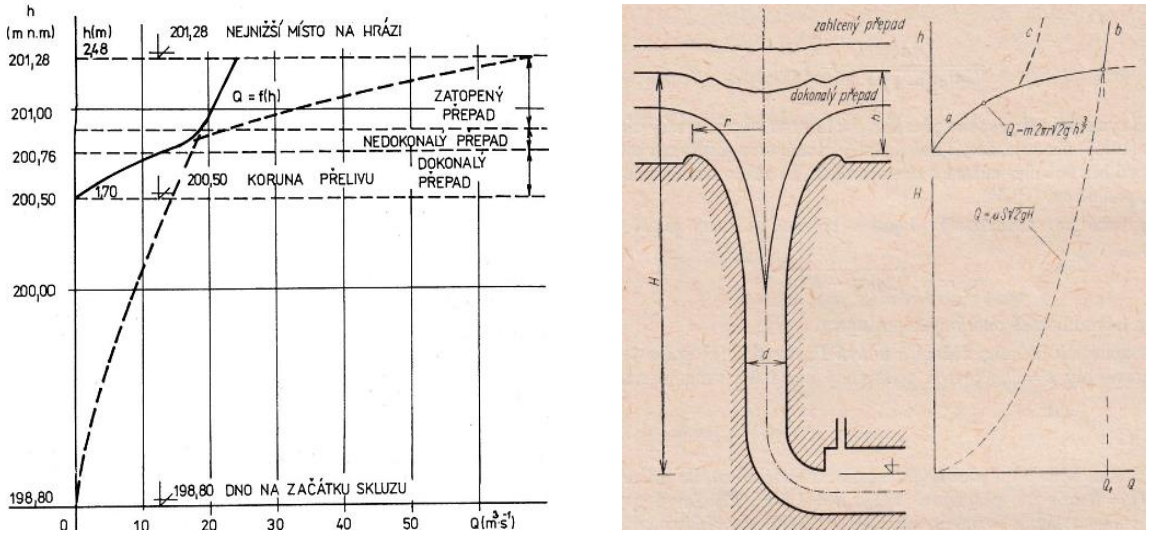
4. Hydraulické výpočty

Než dosáhne horní hladina v nádrži kóty přelivné hrany, proudí voda pouze výpustí. Na výpust malé vodní nebo suché nádrže je mnohdy kladen požadavek, aby před dosažením horní hladiny úrovně přelivné hrany kapacitně převáděla maximálně neškodný průtok. Po vystoupání horní hladiny nad úroveň přelivné hrany se k proudění výpusti přidává i přepad přes přeliv. Ve sdruženém objektu vzniká vzájemná interakce proudění výpustí a přepadu přes bezpečnostní přeliv. Při provozu sdruženého objektu může nastat i situace, kdy průtok převádí pouze bezpečnostní přeliv vlivem neprovozuschopné výpusti. Kapacita sdruženého objektu je dána nejen kapacitou výpusti a bezpečnostního přelivu, ale i kapacitou spadiště, kapacitou odpadu a podmínkami pod hrází.

Kapitola *Hydraulické výpočty* se zabývá stanovením konzumční křivky výpusti, stanovením konzumční křivky bezpečnostního přelivu, stanovením konzumční křivky sdruženého objektu a stanovením průběhu hladiny ve spadišti a v odpadní chodbě. Popis používaných konstant na fyzikálním modelu je uveden v Příloze 4.

4.1 Konzumční křivka bezpečnostního přelivu – teorie

Literatura *Rybníky a účelové nádrže – příklady* [23] zmiňuje, že podle vzájemné úrovně hladin v nádrži a ve spadišti dochází u kašnového bezpečnostního přelivu s otevřeným odpadem k dokonalému přepadu, k přechodové oblasti přepadu a k zatopenému přepadu. Přechodová oblast nedokonalého přepadu vzniká důsledkem plynulého přechodu volného přepadu k zatopenému přepadu. Zatopený přepad ovlivňuje průtočný profil na začátku odpadu přelivu. [23] U šachtového bezpečnostního přelivu vzniká dokonalý přepad, přechodová oblast a nakonec zatopený tlakový přepad. [23] Obrázek 30 zobrazuje konzumční křivku kašnového přelivu s otevřeným odpadem a zobrazuje konzumční křivku šachtového přelivu. Očekává se, že se bezpečnostní přeliv na fyzikálním modelu bude chovat obdobně, tj. nastane dokonalý přepad, přechodová oblast přepadu a zatopený přepad.



Obr. 30 – Konzumční křivka kašnového přelivu [23, p. 75] a šachtového přelivu [24, p. 238]

Podle tloušťky přelivné hrany t a přepadové výšky h se rozlišuje přepad přes ostrou hranou přelivu ($t < 0{,}67\ h$), přepad přes širokou korunu ($t > 2h$), přepad přes jezovou konstrukci ($0{,}67\ h < t < 2\ h$) a zvláštní typy přelivů (př. šachtový, boční, násoskový). [25] [24] Přepad přes přeliv se stanoví podle rovnice: [26]

v Du Buatově tvaru $Q = \sigma * \frac{2}{3} * \mu * b_o * \sqrt{2g} * h_o^{3/2}$ (1.1)

v Bazinově tvaru $Q = \sigma * m * b_o * \sqrt{2g} * h_o^{3/2}$ (1.2)

kde

Q	průtok	[m^3/s]
σ	součinitel zatopení	[-]
μ, m	součinitel přepadu	[-]
b_o	účinná šířka přelivu $b_o = b - 0{,}1 * \xi * n * h_o$	[m]
ξ	součinitel tvaru pilířů	[-]
n	počet míst zúžení	[-]
b	součet světlé šířky přelivu nebo-li délka přelivné hrany b = B_p= L_p	[m]
h_o	energetická výška přepadu $h_o = h + \frac{\alpha\, v_h^2}{2g}$	[m]
h	přepadová výška $h = y_h - s_h$	[m]
y_h	horní hladina	[m]
s_h	výška konstrukce přelivu	[m]
v_h	přítoková rychlost $v = \frac{Q}{S_ž}$	[m/s]
$S_ž$	průtočná plocha na začátku laboratorního žlabu $S_ž = b_ž * y_{hh}$	[m^2]
$b_ž$	šířka žlabu	[m]
y_{hh}	horní hloubka	[m]
α	Coriolisovo číslo	[-]
g	gravitační zrychlení	[m/s^2]

Přepad se označuje za dokonalý (nezatopený), pokud hladina ve spadišti nemá vliv na průtočnost přelivu (tj. neovlivní průtok a horní hladina). V opačném případě se jedná o nedokonalý přepad. Nedokonalý přepad u jezové konstrukce či ostrohranného přelivu nastává při rozdílu hloubky dolní vody (hladiny ve spadišti) a výšky přelivu větším než nula (tj. $h_\sigma = y_d - s_d > 0$) a splnění podmínek mezních hodnot (např. Pavlovskijho grafu). [26] V některých případech může dojít ke snížení součinitele zatopení už při hladině ve spadišti pod úrovní přelivné hrany, například u podtlakových přelivných ploch. [5] Typizační směrnice *Navrhování sdružených objektů zemních hrází do výšky 15 m* doporučuje stanovit kapacitu bezpečnostního přelivu z rovnice přepadu přes přeliv v Dubuatově tvaru (vztah 1.1) se zanedbáním přítokové rychlosti a s uvažováním účinné šířky přelivu. [12] Mělo by být snahou převést průtok dokonalým přepadem přes přeliv (součinitel zatopení je roven σ = 1,0). [5, p. 40]

Konstrukce fyzikálního modelu odpovídá podle poměru tloušťky přelivné hrany a přepadové výšky spíše ostrohranné konstrukci přelivu typu Bazinova. Poněvadž při přepadu přes přeliv vzniká boční zúžení při obtékání čelní a zadní stěny přelivu, zavádí se účinná šířka přelivu. Pro ostrohranný přeliv se součinitel přepadu stanoví podle vztahu s podmínkami platnosti přepadové výšky v rozmezí 0,1 m < h < 0,6 m, šířky přelivu v rozmezí 0,5 m < b < 2,0 m a výšky konstrukce přelivu v rozmezí 0,2 m < s_h < 2,0 m: [26]

$$m = \left(0{,}405 + \frac{0{,}003}{h}\right) * \left(1 + 0{,}55 * \left(\frac{h}{h+s_h}\right)^2\right) \tag{1.3}$$

Součinitel zatopení pro dokonalý přepad nabývá hodnoty 1,0. Pro nedokonalý přepad se součinitel zatopení σ pro ostrohranný přeliv typy Bazinův odvodí z parametrů hloubky dolní vody y_d (tj. hladiny ve spadišti), přepadající výšky h a výšky konstrukce směrem od dolní vody s_d podle vztahu: [26]

$$\sigma = 1{,}05 * \left(1 + 0{,}2 * \frac{y_d - s_d}{s_d}\right) * \left(\frac{h - y_d - s_d}{h}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{1.4}$$

I přestože konstrukce fyzikálního modelu odpovídá spíše konstrukci ostrohranného přelivu, zavádí se pro ukázku i výpočet pro jezovou konstrukci. Do výpočtu se zavádí účinná šířka přelivu z důvodu vytvoření bočního zúžení při obtékání čelní a zadní stěny přelivu. Pro jez obdélníkového průřezu závisí součinitel přepadu na poměru výšky přepadajícího paprsku ku tloušťce přelivné hrany. Při tloušťce t nižší než 0,67násobek přepadové výšky h nastává riziko odlepení paprsku od koruny přelivu a vzniká de facto přepad přes ostrohrannou konstrukci. Při tloušťce t vyšší než dvojnásobek přepadové výšky h, dochází naopak k přepadu přes širokou korunu. [24] Součinitel přepadu μ se stanoví podle následující tabulky: [26]

Tabulka 2 – Součinitel přepadu μ [26, p. 156]

h/t	0,1	0,33	0,5	1	1,5	2
μ	0,45	0,48	0,495	0,555	0,61	0,63

Součinitel zatopení závisí na míře zatopení jezové konstrukce dolní vodou pod přelivem, na tvaru přelivu a na způsobu přechodu paprsků do dolní vody. [26] Součinitel zatopení σ pro dokonalý přepad nabývá hodnoty 1,0. Pro nedokonalý přepad se součinitel zatopení σ pro jezovou konstrukci odvodí z poměru míry vzdutí h_σ a energetické přepadající výšky h_o podle následující tabulky: [26]

Tabulka 3 – Součinitel zatopení σ [26, p. 160]

h_σ/h_o	[-]	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45
σ	[-]	1	0,996	0,991	0,986	0,981	0,976	0,97	0,963	0,956	0,948
h_σ/ho	[-]	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95
σ	[-]	0,937	0,923	0,904	0,886	0,856	0,821	0,778	0,709	0,621	0,438

Kapacita bezpečnostního přelivu je při zatopeném přepadu dána průtočným profilem na začátku odpadní chodby. Z hydraulického hlediska se zatopený přepad podobá proudění propustkem nebo výtoku otvorem s navazujícím uzavřeným profilem odpadu. Protože na fyzikálním modelu nastává v odpadním objektu tlakové proudění, zatopený tlakový přepad se řeší jako výtok krátkým potrubím. Kombinací Bernoulliho rovnice s rovnicí kontinuity se získá vztah pro průtok: [26]

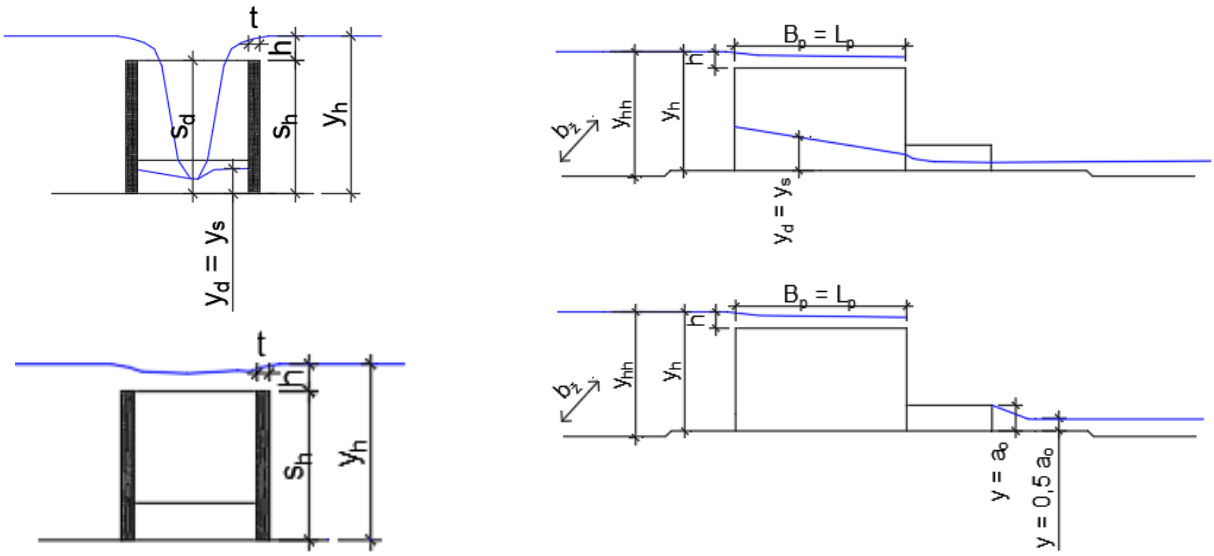
$$Q = \mu * S * \sqrt{2g * H} \qquad (1.5)$$

kde	Q	průtok	[m^3/s]
	μ	výtokový součinitel	[-]
	S	výtoková průtočná plocha (tj. průtočná plocha odpadní chodby)	
		$S = b_{od} * a_{od}$	[m^2]
	b_{od}	šířka odpadní chodby	[m]
	a_{od}	výška odpadní chodby	[m]
	H	tlaková výška, spád v hladinách	[m]
		$H = y_h - y + \frac{\Delta p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g}$	
	y_h	horní hladina	[m]
	y	hladina v profilu	[m]
	v_h	přítoková rychlost	[m/s]
	α	Coriolisovo číslo	[-]
	g	gravitační zrychlení	[m/s^2]
	$\frac{\Delta p}{\rho g}$	rozdíl tlakové výšky (zde roven nule)	[m]

Výtokový součinitel zahrnuje veškeré ztráty, které vznikají při proudění vody. Stanoví se podle vztahu: [26]

$$\mu = \frac{\varepsilon}{\sqrt{\alpha + \Sigma\xi_m + \xi_t}} \qquad (1.6)$$

kde	μ	celkový součinitel výtoku		[-]
	α	Coriolisovo číslo		[-]
	ξ_m	suma součinitele místních ztrát		[-]
	ξ_t	součinitel ztráty třením	$\xi_t = \lambda * \frac{L}{4R}$	[-]
	λ	součinitel tření		[-]
	L	délka úseku		[m]
	R	hydraulický poloměr $R = \frac{S}{O}$		[m]
	O	omočený obvod		[m]
	S	průtočná plocha		[m^2]
	ε	součinitel zúžení		[-]



Obr. 31 – Popis veličin pro rovnici dokonalého přepadu a zatopeného přepadu

4.2 Konzumční křivka bezpečnostního přelivu – výsledky

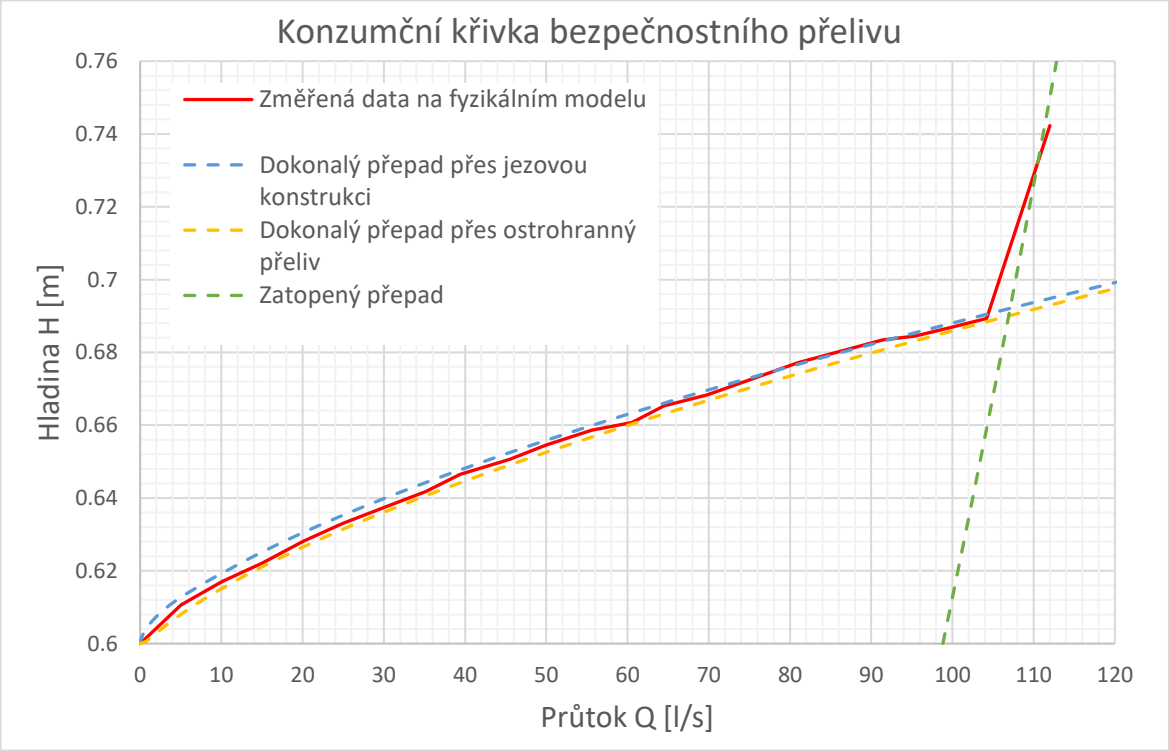
Při provozu sdruženého objektu může nastat situace, kdy výpust nebude schopná převést průtok a kdy průtok převádí pouze bezpečnostní přeliv. Z měření na fyzikálním modelu mimo jiné vyplývá, že při této situaci se snižuje kapacita odpadní chodby, že i celkově sdružený objekt převádí o něco menší průtok (při stejné horní hladině) nebo že se třeba vytváří o něco vyšší horní hladina. Z těchto důvodu by se při návrhu bezpečnostního přelivu měl spíše uvažovat tento méně příznivý stav. Stanovení konzumční křivky bezpečnostního přelivu se zabývá touto situací, kdy se průtok převádí pouze přepadem přes bezpečnostní přeliv.

Do vztahu dokonalého přepadu přes přeliv se dosazuje součinitel zatopení pro dokonalý přepad σ = 1, světlá šířka přelivu (délka přelivné hrany) b = 2,02 m, součinitel tvaru pilířů ξ = 1, počet míst zúžení n = 4, výška konstrukce přelivu $s_h = s_d$ = 0,6 m, šířka žlabu $b_ž$ = 1 m, Coriolisovo číslo $\alpha = 1$ a gravitační zrychlení g = 9,81 m/s^2. Graf 10 zobrazuje průběh konzumční křivky bezpečnostního přelivu. Tabulka 4 porovnává změřená data na modelu s vypočtenými daty pro dokonalý přepad přes jezovou konstrukci se zanedbáním a bez zanedbání přítokové rychlosti, dokonalý přepad přes ostrohranný přeliv typu Bazinův se zanedbáním přítokový rychlosti, bez zanedbáním přítokové rychlosti, se zanedbáním účinné šířky přelivu a bez zanedbání účinné šířky přelivu. Z tabulky vyplývá, že při stejné přepadové výšce nabývá průtok pro přepad přes jezovou konstrukci nižších hodnot než pro přepad přes ostrohranný přeliv. Neboť hodnoty průtoků při zanedbání a bez zanedbání přítokové rychlosti se liší zanedbatelně, usuzuje se, že při stanovení dokonalého přepadu se může zanedbat přítoková rychlost v nádrži. Diplomová práce zavádí volbu postupu pro dokonalý přepad z důvodu aplikace rovnice přepadu přes přeliv pro další výpočty. Používá se vztah pro dokonalý přepad přes ostrohranný přeliv typu Bazinův se zanedbáním přítokové rychlosti a bez zanedbání účinné šířky přelivu. Fyzikální model se podobá svými rozměry ostrohrannému přelivu. Při dokonalém

přepadu přes přeliv se na fyzikálním modelu v odpadní chodbě utváří proudění o volné hladině i tlakové proudění. Na skutečném vodním díle se aplikuje dokonalý přepad přes přeliv se zanedbáním přítokové rychlosti a bez zanedbání účinné šířky přelivu. Součinitel přepadu se stanoví v zavilosti na tvaru přelivné plochy.

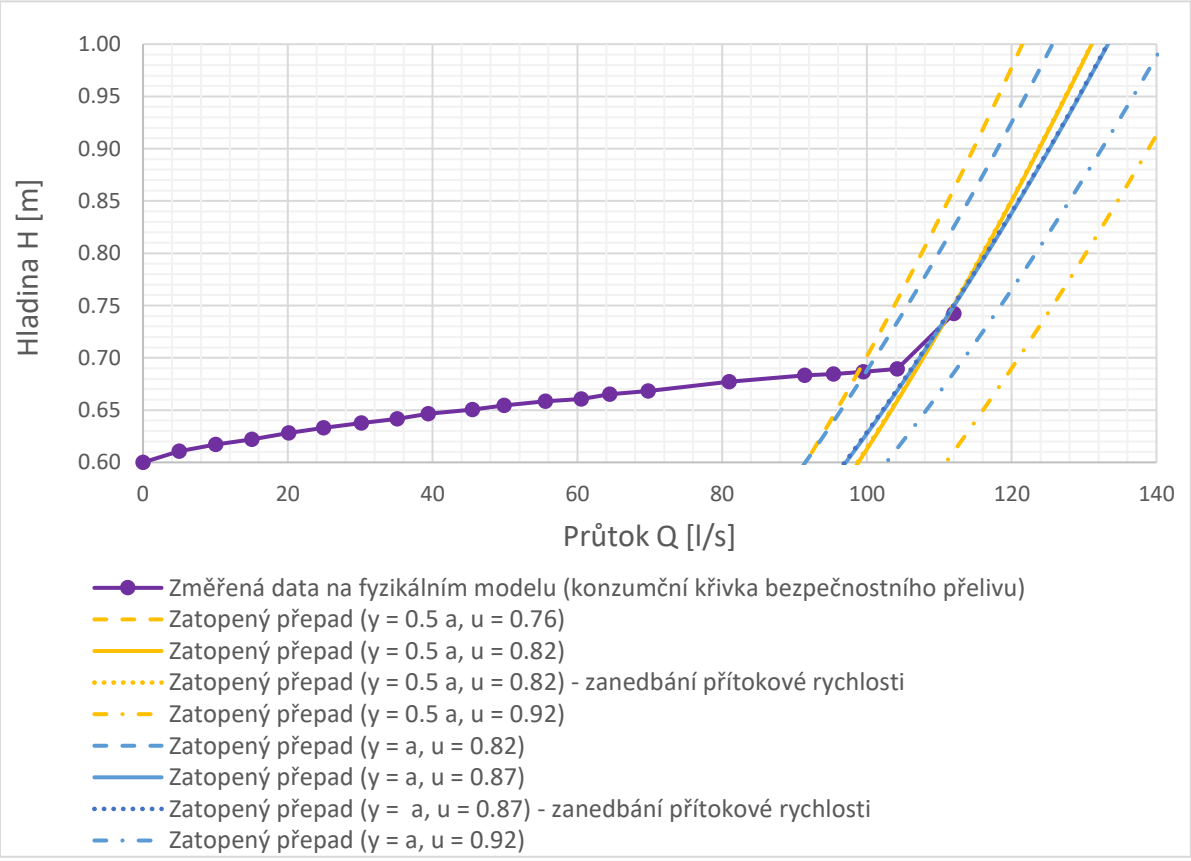
Tabulka 4 – Změřené hodnoty průtoku na modelu a teoretické průtoky stanovenými rovnicemi dokonalého přepadu

Typ přepadu	Horní hladina [m]	0,60	0,61	0,62	0,63	0,64	0,66
Dokonalý přepad přes jezovou konstrukci	Průtok [l/s]	0,0	3,3	10,6	19,6	30,8	55,7
Dokonalý přepad přes jezovou konstrukci se zanedbáním přítokové rychlosti	Průtok [l/s]	0,0	3,3	10,6	19,5	30,6	55,2
Dokonalý přepad přes ostrohranný přeliv typu Bazinův bez zanedbání účinné šířky a přítokové rychlosti	Průtok [l/s]	0,0	6,3	14,0	23,5	34,5	60,3
Dokonalý přepad přes ostrohranný přeliv typu Bazinův se zanedbáním účinné šířky	Průtok [l/s]	0,0	6,3	14,1	23,6	34,6	60,7
Dokonalý přepad přes ostrohranný přeliv typu Bazinův se zanedbáním přítokové rychlosti	Průtok [l/s]	0,0	6,3	14,0	23,4	34,3	59,7
Dokonalý přepad přes ostrohranný přeliv typu Bazinův se zanedbáním přítokové rychlosti a účinné šířky	Průtok [l/s]	0,0	6,3	14,1	23,5	34,4	60,1
Změřená data na modelu	Průtok [l/s]	0,0	4,7	13,2	21,9	33,1	58,9



Graf 10 – Konzumční křivka bezpečnostního přelivu

Do vztahu zatopeného přepadu se dosazuje za hladinu v profilu *y* hodnota výšky otvoru odpadní chodby $y = a_o = 0{,}15\ m$, nebo hodnota osy výtokového otvoru odpadu $y = 0{,}5\ a_o = 0{,}075\ m$. Při proudění sdruženým objektem vzniká ztráta místní na vtoku, ztráta místní na výtoku a ztráta třením. Hodnota součinitele tření λ se stanoví vztahem Frenkel (viz Příloha 4). Ztráta místní na výtoku se vzhledem k nezatopenému výtoku zanedbává ($\xi = 0$). Místní ztráta na vtoku se uvažuje různými hodnotami $\xi = 0{,}5$ (výtokový součinitel $\mu = 0{,}82$), $\xi = 0{,}2$ (výtokový součinitel $\mu = 0{,}92$), $\xi = 0{,}3$ (výtokový součinitel $\mu = 0{,}87$) a $\xi = 0{,}7$ (výtokový součinitel $\mu = 0{,}76$). Do vztahu zatopeného přepadu se dosazuje součinitel zúžení $\varepsilon = 1$, Coriolisovo číslo $\alpha = 1$, gravitační zrychlení $g = 9{,}81\ m/s^2$ a šířka odpadní chodby $b_o = 0{,}25$ m. Přítoková rychlost představuje rychlost před sdruženým objektem. Graf 11 zobrazuje průběh změřené konzumční křivky bezpečnostního přelivu a průběh křivky zatopeného přepadu pro hladinu v profilu rovné ose výtokové otvoru odpadní chodby k srovnávací rovině (tj. $y = 0{,}5\ a_o$) pro výtokový součinitel s hodnotou $\mu = 0{,}76$, $\mu = 0{,}82$ a $\mu = 0{,}92$. Dále graf zobrazuje průběh křivky zatopeného přepadu pro hladinu v profilu rovné výšce výtokové otvoru odpadní chodby (tj. $y = a_o$) pro výtokový součinitel s hodnotou $\mu = 0{,}82$, $\mu = 0{,}87$ a $\mu = 0{,}92$. Z grafu vyplývá, že záleží na volbě hladiny v profilu a na volbě výtokového součinitele, neboť jejich kombinací se získá jiný průběh křivky. Diplomová práce se přiklání spíše k průběhu křivky pro hladinu v profilu rovné výšce výtokového otvoru odpadní chodby $y = a_o$. Jelikož vytékající paprsek nevytéká do volna a je ze spodu limitován dnem, za výtokem se utváří hloubka. Přítoková rychlost se může zanedbat.



Graf 11 – Konzumční křivka bezpečnostního přelivu (zatopený přepad) pro změřená data a pro výpočtená data

Kapacita zatopeného přepadu je dána průtočným profilem odpadního objektu. Se zvýšením horní hladiny v nádrži roste průtok mnohem pomaleji než při dokonalém přepadu. Zanedbání přítokové rychlosti způsobí přiměřeně malý rozdíl hodnoty průtoku. Pro zatopený přepad nelze jednoznačně interpretovat postup stanovení kapacity bezpečnostního přelivu vzhledem k nedostatečnému množství změřených dat. Zatopený přepad se utváří na fyzikálním modelu při tlakovém proudění v odpadní chodbě a při vystoupání hladiny ve spadišti nad přelivnou hranu blízko úrovně horní hladiny. Mezi dokonalým a zatopeným přepadem vzniká přechodová oblast. Vzhledem k nedostatečnému množství naměřených dat, nelze jednoznačně konstatovat, zda se může průběh křivky v přechodové oblasti stanovit vztahy nedokonalého přepadu přes přeliv. Kdyby se počítal nedokonalý přepad přes přeliv, pak by se průtok stanovil pro konkrétní horní hladinu a k ní příslušnou hladinu ve spadišti, jež je závislá na průtoku.

4.3 Konzumční křivka výpusti – teorie

Stanovení konzumční křivky výpusti se rozděluje na dvě části – proudění výpustí před a po dosažení horní hladiny úrovně přelivné hrany. Výpust tvoří čtvercový otvor široký 0,1 m a vysoký 0,1 m umístěný v čelní stěně přelivu s tloušťkou 0,01 m. Výška otevření výpusti se reguluje stavidlovým uzávěrem.

4.3.1 Proudění výpustí před dosažením horní hladiny úrovně přelivné hrany

S ohledem na rozměry výpusti se na fyzikálním modelu neproměřil zcela stav nezahlceného vtoku výpusti a přechodu výpusti z nezahlceného vtoku do zahlceného vtoku. Před zahlcením vtoku výpusti proudí voda ve sdruženém objektu nerovnoměrným ustáleným prouděním o volné hladině. Proudění výpustí připomíná situaci převedení vody za stavby, kdy se objekt řeší jako propustek [12], anebo i výpust představuje změnu tvaru koryta. Po zahlcení vtoku výpusti proudí voda ve sdruženém objektu nerovnoměrným prouděním o volné hladině se zahlceným vtokem výpusti. Proudění výpustí připomíná hydraulický jev výtok otvorem pod hradící konstrukcí. Vytékající paprsek v porovnání s volným paprskem je veden dnem a na spodní vrstvě působí přetlak. [26] Vlivem nulového sklonu dna se na modelu sdruženého objektu nevytvoří rovnoměrné proudění.

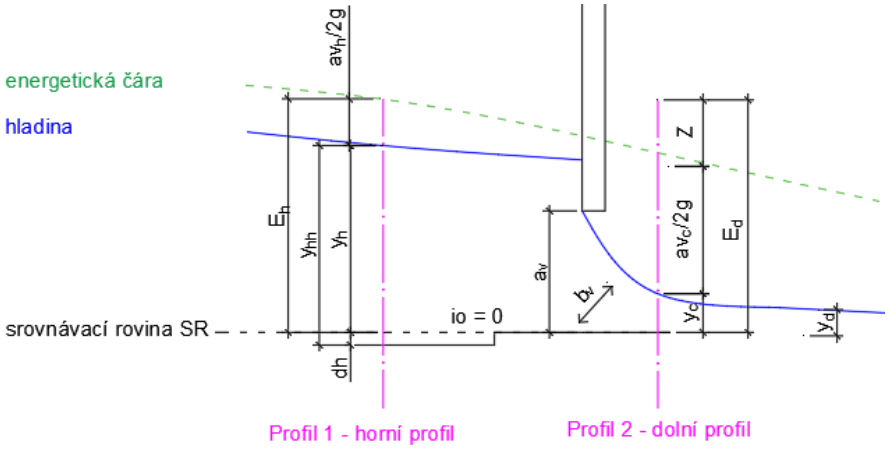
Výtok pod hradící konstrukcí se rozlišuje na dokonalý (nezatopený) a nedokonalý (zatopený). Dokonalý výtok nastává za podmínky, že druhá vzájemná hloubka vodního skoku y_2 k první vzájemné hloubce $y_1 = y_c$ je menší než hloubka dolní vody y_d, tj. $y_d < y_2$ (viz Příloha 4). Dolní voda neovlivňuje horní hladinu v nádrži, ani průtok. Při dokonalém výtoku se za výpustí vytváří zúžená hloubka $y_c = \varepsilon * a$. [26] Pro nulový sklon dna se průtok stanoví kombinací Bernoulliho rovnice se zavedením ztrát mechanické energie a rovnice kontinuity ze vztahu: [26]

energetická bilance $$E = y_h + \frac{\alpha v_h^2}{2g} + \frac{p_h}{\rho g} = y_c + \frac{\alpha v_c^2}{2g} + \frac{p_c}{\rho g} + Z_t + Z_m \quad (1.7)$$

rovnice kontinuity $$Q = S_c * v_c = \varepsilon * \mathrm{S} * v_c \quad (1.8)$$

průtok $$Q = \mu * S * \sqrt{2g} * \left(y_h + \frac{\alpha v_h^2}{2g} - y_c\right)^{1/2} \quad (1.9)$$

kde	E	energetická výška	[m]
	Z_t	ztráty třením $Z = \xi_t \frac{\alpha v_c^2}{2g}$	[m]
	Z_m	ztráty místní $Z = \xi_m \frac{\alpha v_c^2}{2g}$	[m]
	Q	průtok	[m^3/s]
	y_h , y_c	horní hladina, zúžená hladina (hloubka)	[m]
	v_h , v_c	přítoková rychlost, rychlost v zúžené hloubce	[m]
	S	průtočná plocha výtokového otvoru S = b_v * a_v	[m^2]
	b_v	šířka otvoru	[m]
	a_v	výška otvoru	[m]
	α	Coriolisovo číslo	[-]
	g	gravitační zrychlení	[m/s^2]
	μ	výtokový součinitel (viz vztah 1.6)	[-]
	ξ_m	součinitel ztráty místní	[-]
	ξ_t	součinitel ztráty třením	[-]
	S_c	průtočná plocha v zúžené hloubce	[m^2]
	ε	součinitel výškového zúžení	[-]
	$\frac{p_h}{\rho g}, \frac{p_c}{\rho g}$	tlaková výška (nabývá zde nule)	[m]



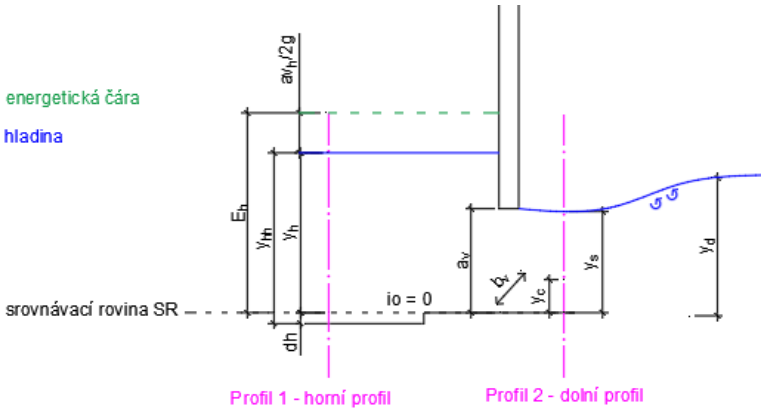
Obr. 32 – Dokonalý výtok pod konstrukcí

Nedokonalý výtok pod konstrukcí nastává při splnění podmínky, že druhá vzájemná hloubka vodního skoku y_2 je větší než hloubka dolní vody y_d, tj. $y_d > y_2$. Protože se u nedokonalého výtoku zatápí výpust dolní vodou, je potřeba vyvinout větší síla k převedení stejného průtoku výpustí jako u dokonalého výtoku. Toho se dosáhne navýšením horní hladiny. [26] U nedokonalého výtoku pod stavidlem se rozlišuje malé a velké vzdutí. Velké vzdutí nastává mnohdy za podmínky, kdy hloubka dolní vody je větší než 2,5 násobek výšky otvoru výpusti, tj. $y_d > 2{,}5\ a_v$, a kdy výška otvoru výpusti je vyšší než 0,2 násobek energetické výšky, tj. $a_v > 0{,}2\ E_h$. [27] Vlivem větší míry vzdutí se tvoří za výtokem skoro vodorovná hladina. [26] Průtok nedokonalým výtokem pod konstrukcí pro velké vzdutí se stanoví ze vztahu 1.9

s dosazenou zúženou hloubkou rovnající se hloubce dolní vody, tj. $y_c = y_d$. [27] Nedokonalý výtok pro malé vzdutí se po zavedení společné hloubky y_s, jež se utvoří za výtokem z výpusti, spočítá z kombinace věty hybnosti a Bernoulliho rovnice ze vztahů: [27]

$$y_s = \sqrt{y_d^2 + \frac{2*Q^2}{g*b_v^2} * \left(\frac{1}{y_d} - \frac{1}{\varepsilon * a_v}\right)} \tag{1.10}$$

$$Q = \mu * S * \sqrt{2g} * \left(y_h + \frac{\alpha v_h^2}{2g} - y_s\right)^{1/2} \tag{1.11}$$



Obr. 33 – Nedokonalý výtok pod stavidlem pro malé vzdutí

Výše uvedené vztahy jsou odvozeny pro výtok malým otvorem. Výtok malým otvorem nastává při vzdálenosti těžiště plochy výtokového otvoru od horní hladiny vyšší než desetinásobek výšky otvoru tj. $z_t = (y_h - 0{,}5\ a) >= 10\ a$. [27] Je otázkou, od jaké horní hladiny se vztahy uplatní a zdali se nemusí zavést i výtok velkým otvorem. Pro nedokonalý výtok velkým otvorem při velkém vzdutí se používá vztah 1.9 s dosazením $y_c = y_d$. Průtok výtoku velkým otvorem do volna pro obdélníkový profil se stanoví dle vztahu: [26]

$$Q = \frac{2}{3} * \mu * \sqrt{2g} * \left[\left(z_2 + \frac{\alpha v_h^2}{2g}\right)^{\frac{3}{2}} - \left(z_1 + \frac{\alpha v_h^2}{2g}\right)^{\frac{3}{2}}\right] \tag{1.12}$$

Typizační směrnice doporučuje kapacitu výpusti stanovit jako nezatopený výtok malým otvorem s krátkým potrubím (vztah 1.9) se zanedbáním přítokové rychlosti a s dosazením osy výtokového otvoru výpusti k srovnávací rovině, tj. $y_c = 0{,}5\ a_v$. V případě pouze otvoru výpusti nastává obdobná situace jako pro převedení vody za stavby, kdy se řeší proudění jako výpočet propustkem. [12]

Rovnoměrné proudění se na fyzikálním modelu vlivem nulové sklonu dna nevytvoří. Průběh hladiny na fyzikálním modelu sdruženého objektu (tj. spadiště, odpad) se stanoví metodami nerovnoměrného proudění. Nerovnoměrné proudění se pro prizmatická koryta řeší přímou integrací (např postup Bachmetěva, Pavlovského nebo Ven te Chowa) nebo numerickou integrací (př. metoda délek, metoda po úsecích). U proudění o volné hladině se rozlišuje nadkritický (bystřinný), kritický a podkritický (říční) režim proudění (viz Příloha 4). [26] [12] Pro neprizmatická koryta se řeší nerovnoměrné proudění často obecnou metodou po úsecích. Metoda po úsecích vychází z Bernoulliho rovnice se zavedením příslušných ztrát

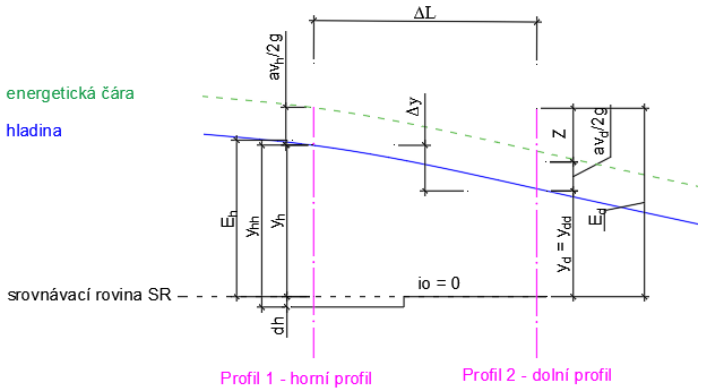
mechanické energie mezi dvěma profily (průřezy) na úseku o délce ΔL. Metoda po úsecích opakovaně iteruje, dokud zvolené převýšení hladin $\Delta y = y_h - y_d$ se nerovná stanovenému převýšení hladin Δy. Při říčním proudění se postupuje ve směru proti proudění, naopak při bystřinném proudění se postupuje ve směru proudění. [26] V případě výskytu vodního skoku se použijí příslušné rovnice. Převýšení hladin Δy se stanoví pro nulový sklon dna ze vztahu: [26]

energetická bilance $$E = y_h + \frac{\alpha v_h^2}{2g} + \frac{p_h}{\rho g} = y_d + \frac{\alpha v_d^2}{2g} + \frac{p_d}{\rho g} + Z_t + Z_m \quad (1.13)$$

rovnice kontinuity $$Q = S * v \quad (1.14)$$

převýšení hladin $$\Delta y = \frac{\alpha Q^2}{2g}\left(\frac{1}{S_d^2} - \frac{1}{s_h^2}\right) + \frac{Q^2}{K^2} * \Delta L + \xi_m * \left|\alpha * \frac{v_d^2 - v_h^2}{2g}\right| \quad (1.15)$$

kde	E	energetická výška		[m]
	Z_t	ztráty třením $Z_t = \frac{Q^2}{K^2} * \Delta L$		[m]
	Z_m	ztráty místní $Z_m = \xi_m * \left\|\alpha * \frac{v_d^2 - v_h^2}{2g}\right\|$		[m]
	Δy	převýšení hladin		[m]
	Q	průtok		[m^3/s]
	y_h , y_d	hladina v horním / dolním profilu		[m]
	v_h , v_d	rychlost v horním / dolním profilu		[m]
	S_h, S_d	průtočná plocha v horním / dolním profilu	S = b * y	[m^2]
	y	hloubka v příslušném profilu tj. y = y_{dd} nebo y_{hh}		[m]
	b	šířka v příslušném profilu		[m]
	ΔL	délka úseku		[m]
	ξ_m	součinitel ztráty místní změnou průřezu		[-]
	α	Coriolisovo číslo		[-]
	K	modul průtoku	$K = S * C * R^{\frac{1}{2}}$ (viz Příloha 4)	[m/s^3]
	g	gravitační zrychlení		[m/s^2]
	$\frac{p_h}{\rho g}, \frac{p_d}{\rho g}$	tlaková výška (zde nulová)		[m]



Obr. 34 – Nerovnoměrné proudění v otevřeném korytě s nulovou tlakovou výškou a s nulovým sklonem dna

4.3.2 Proudění výpusti po dosažení horní hladiny úrovně přelivné hrany

Po dosažení horní hladiny úrovně přelivné hrany se přidává k proudění výpusti i přepad přes bezpečnostní přeliv. Pro stanovení konzumční křivky výpusti by bylo nutné vypočítat průběh hladiny ve spadišti. Popsat teoretický průběh hladiny ve spadišti pomocí rovnic není snadné vzhledem k vzájemné interakci proudění výpusti a přepadu přes bezpečnostní přeliv. Pro stanovení konzumční křivky se zavádí náhradní řešení. Další postup je uveden v kapitole *Konzumční křivka sdruženého objektu*.

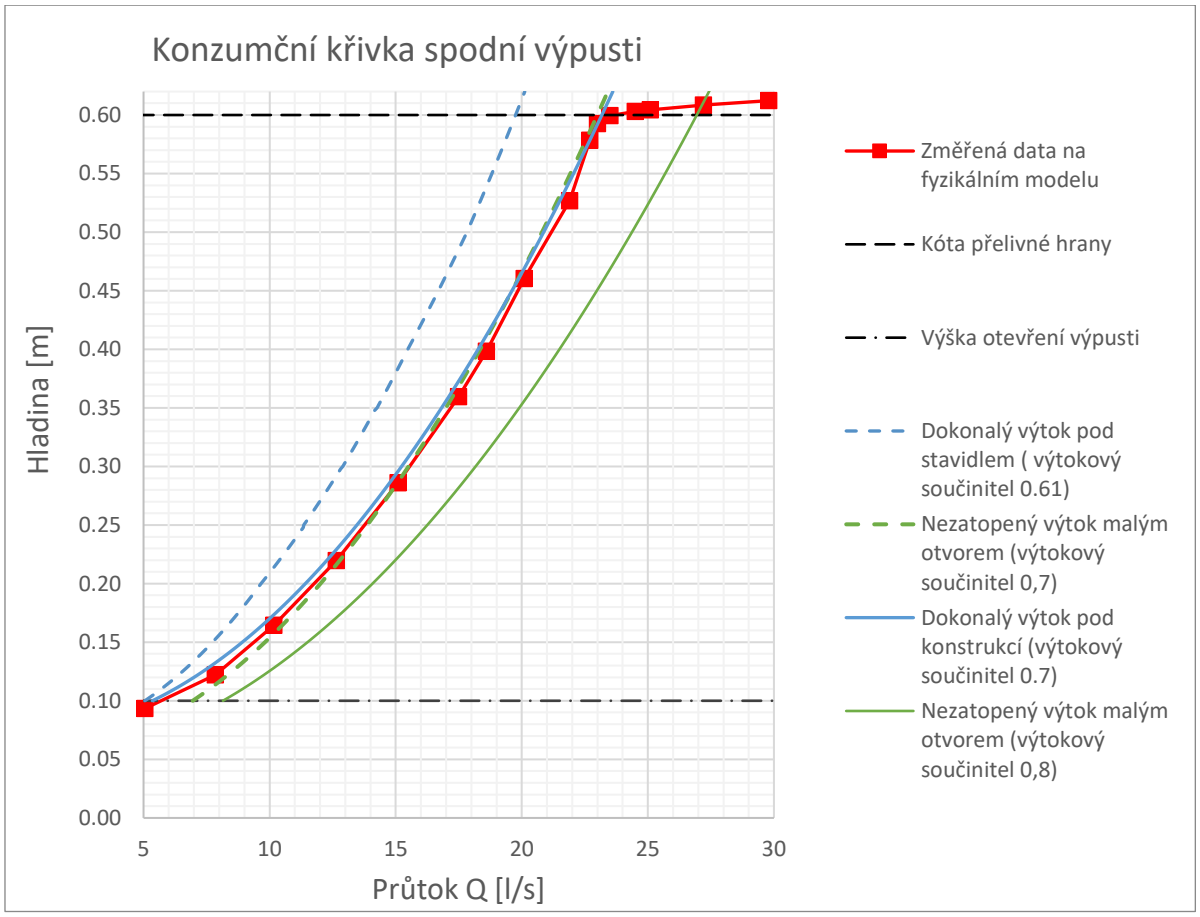
4.4 Konzumční křivka výpusti – výsledky

S ohledem na rozměry výpusti se neproměřil zcela stav nezahlceného vtoku výpusti a přechodu výpusti z nezahlceného vtoku do zahlceného vtoku výpusti. Diplomová práce se tímto stavem nezabývá a zaměřuje se na stanovení konzumční křivky výpusti pro stav zahlcené výpusti, kdy se uvažovaly dvě možnosti – dokonalý výtok pod konstrukcí a dokonalý výtok malým otvorem. Volbou dolní okrajové podmínky $y = y_{k,}$ nevzniká na modelu vliv zpětného vzdutí, tj. výtok nebude ovlivněn dolní vodou.

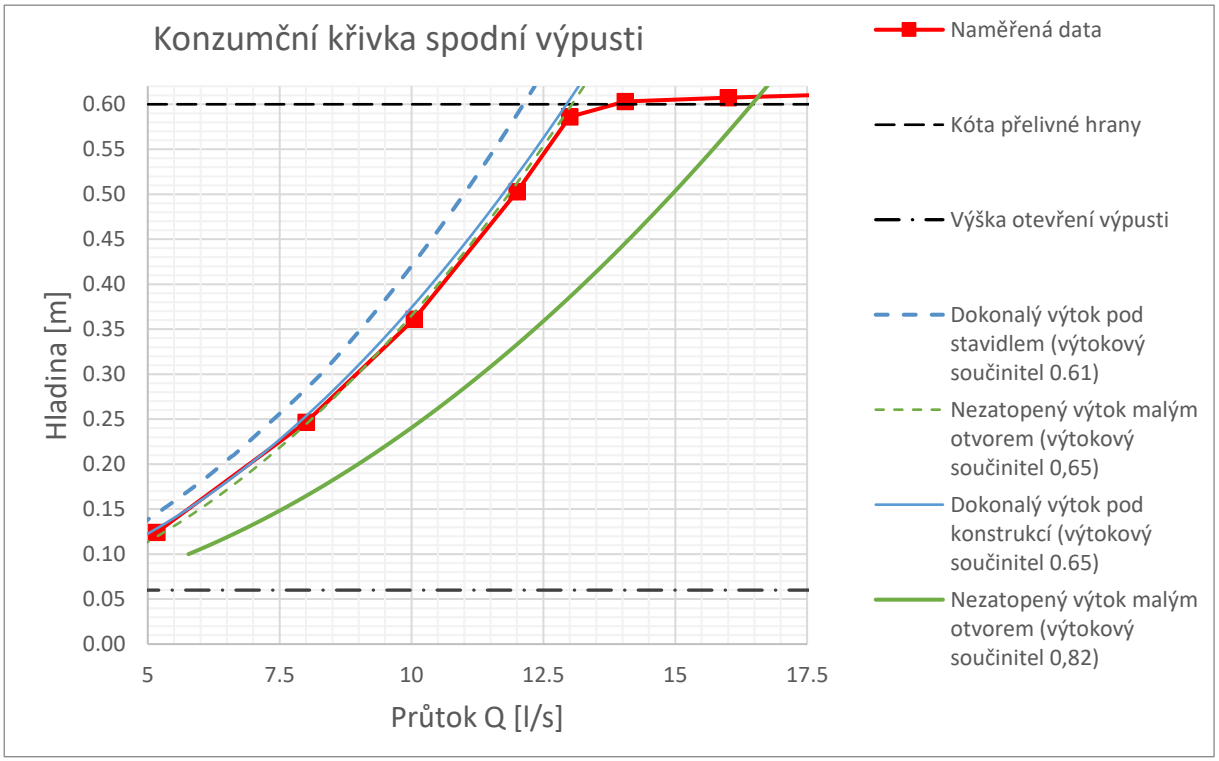
Ztráta třením se na fyzikálním modelu zanedbává s ohledem na tloušťku čelní stěny. Ztráta místní se skládá ze ztráty na vtoku. Volba součinitelů pro dokonalý výtok pod konstrukcí se inspirovala součiniteli pro dokonalý výtok pod stavidlem. Hodnoty součinitelů nenabývají konstantní hodnoty, mění se v závislosti na vlastnosti proudění (př. poměr horní hladiny ku výšce otevření, Reynoldsovo číslo). [25] Pro teoretické výpočty se uvažovaly nejdříve konstantní hodnoty součinitelů $\varepsilon = 0{,}62$, $\mu = 0{,}61$ a $\xi_m = 0{,}03$. Avšak průběh křivky nekorespondoval s průběhem změřených dat (viz Graf 12 a Graf 13), tak se uměle zvýšily hodnoty součinitelů na hodnoty $\varepsilon = 0{,}7$ a $\mu = 0{,}7$ (výška otevření výpusti 0,1 m) a dále $\varepsilon = 0{,}65$ a $\mu = 0{,}65$ (výška otevření výpusti 0,06 m) dle inspirace v literatuře [25, p. 205]. Pro nezatopený výtok malým otvorem s krátkým potrubím se uvažovaly nejdříve hodnoty $\varepsilon = 1{,}0$, $\mu = 0{,}82$ a $\xi_m = 0{,}5$. Protože průběh křivky nekorespondoval s průběhem změřených dat (viz Graf 12 a Graf 13), snížila se hodnota výtokové součinitele na hodnotu $\mu = 0{,}7$ (výška otevření 0,1 m) a $\mu = 0{,}65$ (výška otevření výpusti 0,06 m). Coriolisovo číslo se uvažuje hodnotou $\alpha = 1$, gravitační zrychlení nabývá hodnoty $g = 9{,}81\ m/s^2$, šířka otvoru výpusti činí $b_v = 0{,}1$ m a výška otevření výpusti nabývá $a_v = 0{,}1$ m nebo $a_v = 0{,}06$ m.

Výtokový součinitel asi ovlivňuje úprava vtoku výpusti na fyzikálním modelu, a možná i rozšíření proudu za výtokem výpusti. Stanovení hodnot součinitelů je pouze teoretické. Z výpočtů vyplynulo, že se přítoková rychlost může rovněž zanedbat. Předpokládá se, že výpust na fyzikálním modelu se bude chovat spíše jako výtok pod konstrukcí. Pro další výpočty se uvažuje konzumční křivka výpusti stanovená postupem dokonalého výtoku pod konstrukcí se zanedbáním přítokové rychlosti.

Z měření pro výšku otevření výpusti 0,1 m vyplývá, že zároveň je nutné brát i v úvahu vliv zpětného vzdutí dolní vody. Pro protlačení stejného průtoku je nutné vyvinout větší sílu, čím se též navýší i horní hladina. Míra ovlivnění záleží na konstrukčním řešení sdruženého objektu, neboť se mohou ovlivnit pouze nižší průtoky nebo se nemusí vůbec ovlivnění projevit.



Graf 12 – Konzumční křivky výpusti (výška otevření výpusti 0,1 m)



Graf 13 -Konzumční křivky výpusti (výška otevření výpusti 0,06 m)

4.5 Konzumční křivka sdruženého objektu – teorie

Než vystoupá horní hladina nad úroveň přelivné hrany, převádí průtok pouze výpust. Když dosáhne horní hladina úrovně přelivné hrany, přidává se k proudění výpusti i přepad přes bezpečnostní přeliv. Vzájemná interakce proudění výpustí a přepadu přes bezpečnostní přeliv ovlivňuje nejen průběh hladiny ve sdruženém objektu, ale i kapacitu sdruženého objektu. Vzájemné působení ovlivňuje mimo jiné například kapacitu výpusti, kapacitu odpadní chodby, horní hladinu nebo hladinu ve spadišti. Protože při souběžné činnosti obou funkčních zařízení není snadné stanovit průběh hladiny ve sdruženém objektu a zároveň diplomové práce se touto problematikou nezabývá, zavedly se pro stanovení konzumční křivky sdruženého objektu určité předpoklady.

Před dosažením horní hladiny úrovně přelivné hrany se konzumční křivky sdruženého objektu rovná konzumční křivce výpusti. Po dosažení horní hladiny úrovně přelivné hrany se stanoví konzumční křivka sdruženého objektu jako součet konzumční křivky bezpečnostního přelivu a konzumční křivky výpusti. Pro stanovení konzumční křivky sdruženého objektu se nabízí několik možností k jejímu sestrojení. Například konzumční křivka sdruženého objektu se může sestrojit tak, že se sečte hodnota průtoku převedeného výpustí Q_s a hodnota průtoku převedeného bezpečnostním přelivem Q_p, tj. $Q = Q_p + Q_s$, pro příslušnou horní hladinu takto:

a) Uvažuje se konstantní hodnota průtoku převedeného výpustí Q_s pro horní hladinu y_h = 0,6 m a proměnlivá hodnota průtoku převedeného přes přeliv Q_p pro příslušnou horní hladinu (přepad přes přeliv je odvozen pro stav neprovozuschopné výpusti).

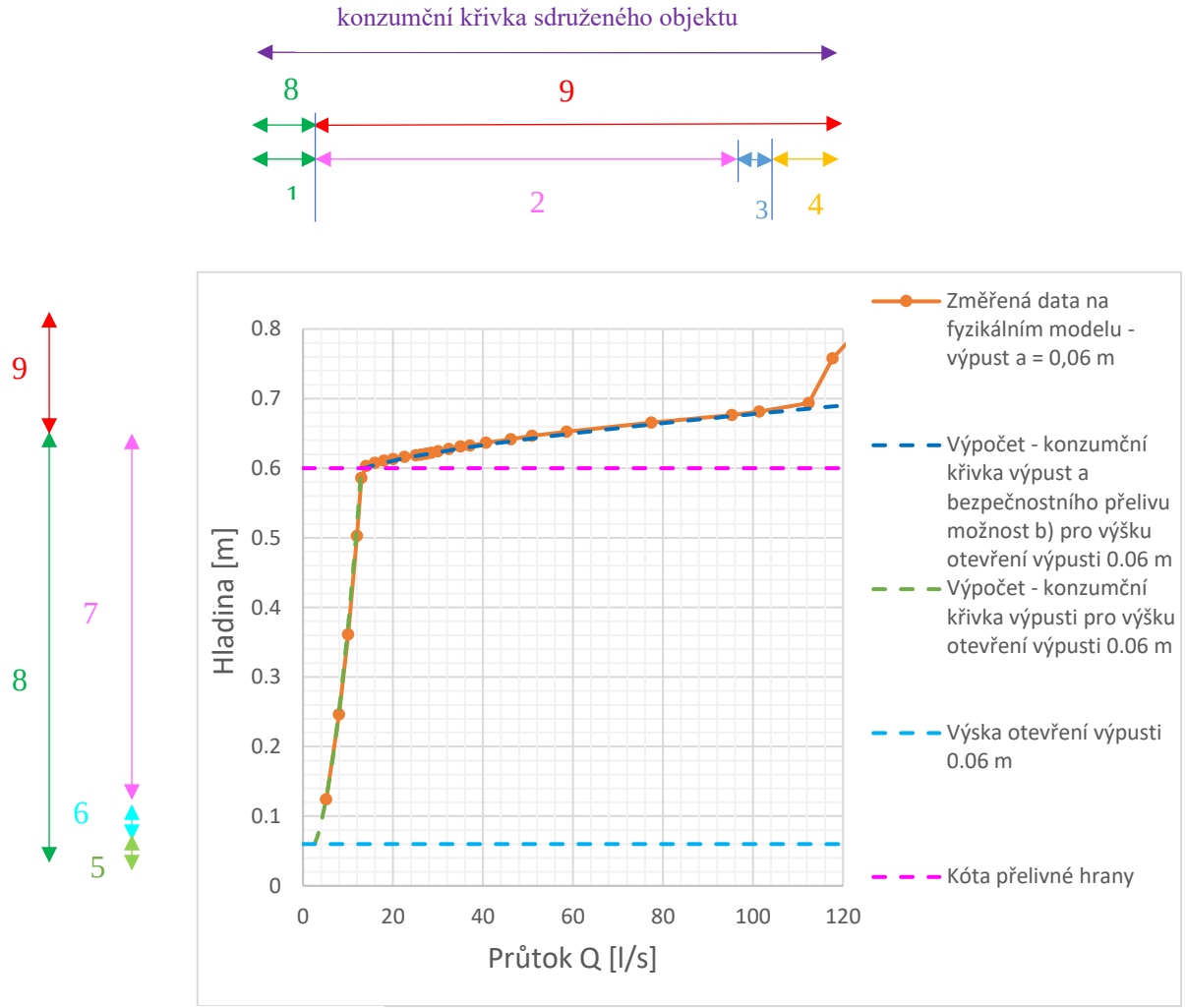
b) Uvažuje se proměnlivá hodnota průtoku převedeného výpusti Q_s pro příslušnou horní hladinu bez vlivu hladiny ve spadišti a proměnlivá hodnota průtoku převedeného přes přeliv Q_p pro příslušnou horní hladinu (přepad přes přeliv je odvozen pro stav neprovozuschopné výpusti).

c) Uvažuje se proměnlivá hodnota průtoku převedeného výpustí Q_s pro příslušnou horní hladinu, kdy se uvažuje vliv hladiny ve spadiště při současném provozu výpusti i přelivu, a proměnlivá hodnota průtoku převedeného přes přeliv Q_p pro příslušnou horní hladinu a hladinu ve spadišti při souběžném provozu výpusti a přelivu.

4.6 Konzumční křivka sdruženého objektu – výsledky

Protože diplomová práce se nezabývá stanovením průběhu hladiny ve sdruženém objektu při současném provozu výpusti a bezpečnostního přelivu, nemohla se stanovit konzumční křivky sdruženého objektu pro možnost c), a tudíž se uvažovaly pouze možnosti a) a b). Při stanovení konzumční křivky sdruženého objektu se nepočítá zatopený přepad přes přeliv. Průtok převedený přepadem přes bezpečnostní přeliv se stanoví vztahem pro dokonalý přepad přes přeliv $Q = \frac{2}{3} * \mu * b_o * \sqrt{2g} * h_o^{3/2}$. Konstantní hodnota průtoku převedeného výpustí se uvažuje pro výšku otevření výpusti 0,1m hodnotou 22,99 l/s a pro výšku otevření výpusti 0,06 m hodnotou 13,04 l/s. Proměnlivá hodnota průtoku převedeného výpustí je dána vztahem dokonalého výtoku pod konstrukcí $Q = \mu * S * \sqrt{2g} * \left(y_h + \frac{\alpha v_h^2}{2g} - y_c\right)^{1/2}$.

Z tabulky 5 a z tabulky 6 vyplývá, že se hodnoty vypočtených konzumčních křivek pro možnost a) i možnost b) se od sebe pro nižší přepadové výšky příliš neliší (např. pro uvedenou přepadovou výšku h = 0,06 m činí rozdíl cca 5 %). Neodlišnost průtoků je dána průběhem konzumční křivky výpusti, kdy horní hladina roste rychlejší tempem, než přibývá průtok. Pokud se uváží chyby měření, i přesto nastává na fyzikálním modelu jev, že se kapacita výpusti snižuje. Pokud by se teoreticky uvažovala možnost b), vznikla by zde menší rezerva na straně bezpečnosti, kdyby ve sdruženém objektu proudil o něco menší průtok než teoreticky stanovený průtok. Na straně druhé by se vlivem rozdílu nižšího skutečného průtoku a teoretického průtoku zvýšila horní hladina. Graf 14 a graf 15 zobrazuje konzumční křivku sdruženého objektu pro výšku otevření 0,06 m pro výpočet a pro změřená data. Obrázek 35 popisuje rozdělení konzumční křivky sdruženého objektu.



Legenda

1 proudění výpustí
2 dokonalý přepad přes přeliv, proudění výpustí
3 přechodová oblast přepadu přes přeliv, proudění výpustí
4 zatopený přepad přes přeliv, proudění výpustí
5 proudění výpustí – nezahlcený vtok
6 proudění výpustí – přechod
7 proudění výpustí – zahlcený vtok
8 proudění výpustí
9 proudění výpustí a přepad přes bezpečnostní přeliv

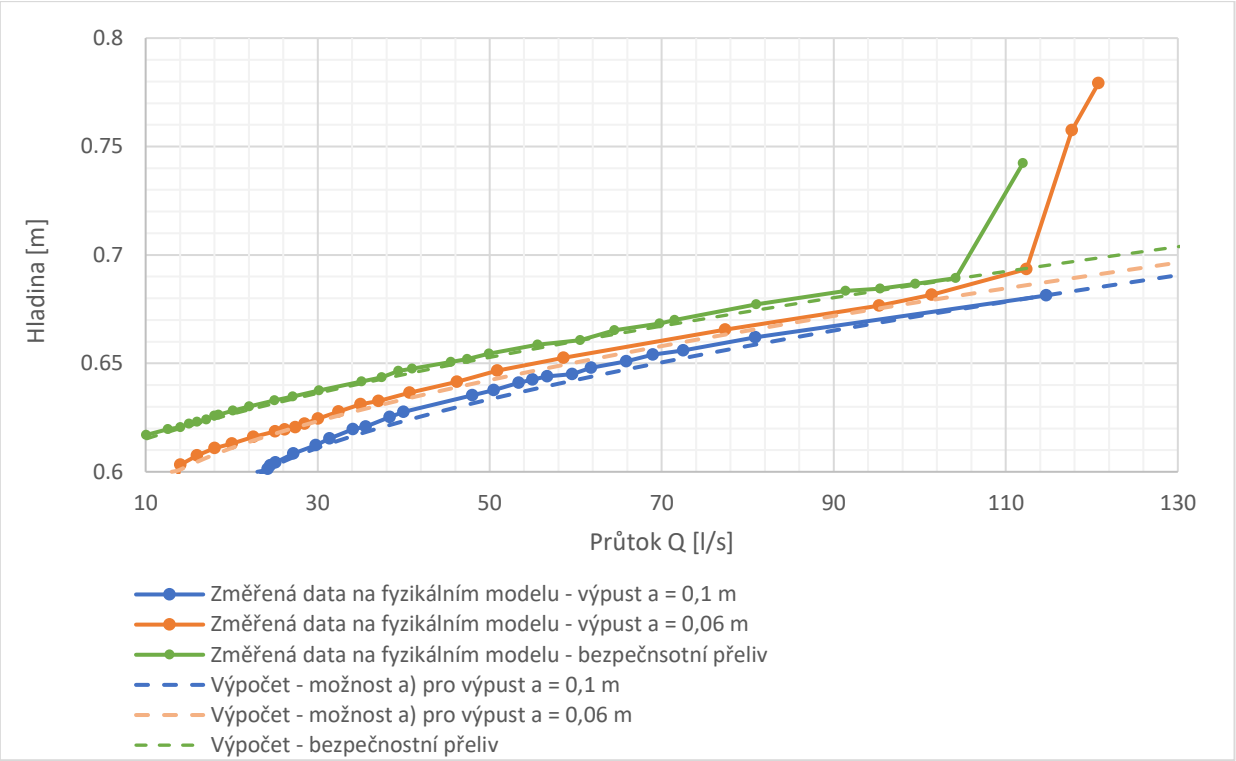
Obr. 35 – Konzumční křivka sdruženého objektu (výška otevření výpusti a = 0.06 m)

Tabulka 5 – Konzumční křivka možnost a) a možnost b) pro výšku otevření výpusti 0,1 m

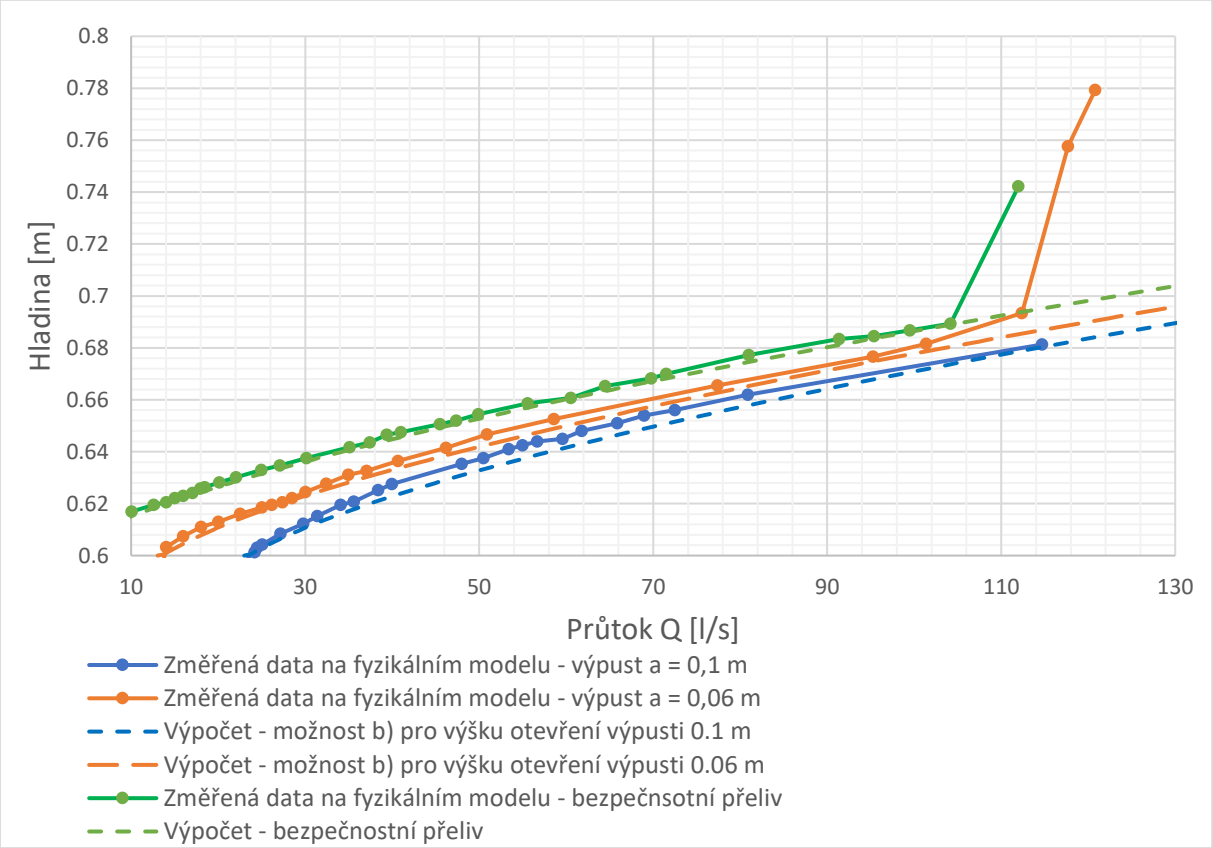
Horní hladina			[m]	0.6	0.61	0.62	0.63	0.64	0.65	0.66
možnost a)	výška otevření výpusti a = 0.1 m	Konstantní průtok výpustí (a = 0.1 m)	[l/s]	22.99	22.99	22.99	22.99	22.99	22.99	22.99
		Průtok přepadem přes přeliv	[l/s]	0	6.3	14.03	23.44	34.3	46.44	59.75
		Konzumční křivka sdruženého objektu	[l/s]	22.99	29.29	37.02	46.43	57.29	69.43	82.74
		Konzumční křivka pro změřená data na fyzikálním modelu	[l/s]	23.69	28.27	34.6	42.49	51.98	61.9	73.9
		Rozdíl dat	[l/s]	0.7	1.02	2.42	3.94	5.31	7.53	8.84
		Procentuální rozdíl dat	[%]	2.95	3.61	6.99	9.27	10.22	12.16	11.96
možnost b)	výška otevření výpusti a = 0.1 m	Proměnlivý průtok výpustí (a = 0.1 m)	[l/s]	23	23.2	23.41	23.62	23.82	24.02	24.22
		Průtok přepadem přes přeliv	[l/s]	0	6.3	14.03	23.44	34.3	46.44	59.75
		Konzumční křivka sdruženého objektu	[l/s]	23	29.51	37.44	47.05	58.11	70.46	83.97
		Konzumční křivka pro změřená data na fyzikálním modelu	[l/s]	23.69	28.27	34.6	42.49	51.98	61.9	73.9
		Rozdíl dat	[l/s]	0.69	1.24	2.84	4.56	6.13	8.56	10.07
		Procentuální rozdíl dat	[%]	2.91	4.39	8.21	10.73	11.79	13.83	13.63

Tabulka 6 – Konzumční křivka možnost a) a možnost b) pro výšku otevření výpusti 0,06 m

Horní hladina			[m]	0.6	0.61	0.62	0.63	0.64	0.65	0.66
možnost a)	výška otevření výpusti a = 0.06 m	Konstantní průtok výpustí (a = 0.06 m)	[l/s]	13.04	13.04	13.04	13.04	13.04	13.04	13.04
		Průtok přepadem přes přeliv	[l/s]	0	6.3	14.03	23.44	34.3	46.44	59.75
		Konzumční křivka sdruženého objektu	[l/s]	13.04	19.34	27.07	36.48	47.34	59.48	72.79
		Konzumční křivka pro změřená data na fyzikálním modelu	[l/s]	13.85	17.7	26.76	34.13	44.55	56.03	69.3
		Rozdíl dat	[l/s]	0.81	1.64	0.31	2.35	2.79	3.45	3.49
		Procentuální rozdíl dat	[%]	5.85	9.27	1.16	6.89	6.26	6.16	5.04
možnost b)	výška otevření výpusti a = 0.06 m	Proměnlivý průtok výpustí (a = 0.06 m)	[l/s]	13.04	13.16	13.27	13.38	13.49	13.6	13.71
		Průtok přepadem přes přeliv	[l/s]	0	6.3	14.03	23.44	34.3	46.44	59.75
		Konzumční křivka sdruženého objektu	[l/s]	13.04	19.46	27.3	36.82	47.79	60.04	73.46
		Konzumční křivka pro změřená data na fyzikálním modelu	[l/s]	13.85	17.7	26.76	34.13	44.55	56.03	69.3
		Rozdíl dat	[l/s]	0.81	1.76	0.54	2.69	3.24	4.01	4.16
		Procentuální rozdíl dat	[%]	5.85	9.94	2.02	7.88	7.27	7.16	6.00



Graf 14 – Změřená konzumční křivka sdruženého objektu a teoreticky stanovená konzumční křivka sdruženého objektu pro možnost a), dále konzumční křivka bezpečnostního přelivu změřená a vypočtená



Graf 15 – Změřená konzumční křivka sdruženého objektu a teoreticky stanovená konzumční křivka sdruženého objektu pro možnost b), dále konzumční křivka bezpečnostního přelivu změřená a vypočtená

4.7 Průběh hladiny ve spadišti a v odpadní chodbě – teorie

4.7.1 Literatura – doporučení pro průběh hladiny a návrh spadiště i odpadu

Na základě fyzikálních modelových výzkumů vodních děl s funkčním sdruženým objektem vznikla v 80. letech 20. století typizační směrnici *Navrhování sdružených objektů zemních hrází do výšky 15 m.* [12] Typizační směrnice doporučuje stanovit průběh hladiny ve spadišti pomocí postupu Hindse nebo postupu Kiselova. [12] Odborná literatura [5] doporučuje stanovit průběh hladiny ve spadišti pro boční přelivy postupem Komory nebo složitějším postupem Hindse či Favreho. Při výpočtu teoretického průběhu hladiny ve spadišti u bočního přelivu se vychází z hloubky v profilu napojení odpadu na spadiště (rozmezí spadiště a odpadu). Při optimálních podmínkách se na rozmezí vytvoří kritická hloubka, když ve spadišti bude říční proudění a v odpadu bystřinné proudění. V opačném případě se vychází z dopočítané hloubky z průběhu hladiny v odpadní chodbě. [5]

Je vhodné při návrhu sdruženého objektu zavést specifické bezpečnostní rezervy, protože teoretický průběh hladiny vykazuje určité odchylky od skutečného průběhu hladiny. V typizační směrnici je uvedeno pro sdružený objekt se žlabovým přelivem, že důsledkem charakteru proudění ve spadišti nenabývá Coriolisovo číslo hodnoty $\alpha = 1$, ale klidně až hodnot vyšších než 2. [12] Taktéž na rozmezí spadiště a odpadu se tvoří hloubka vyšší než hloubka kritická nebo hloubka teoreticky stanovená v tomto profilu (vysvětlení viz [12]). Typizační směrnice doporučuje pro sdružený objekt se žlabovým přelivem navrhnout hloubku spadiště v místě napojení skluzu na spadiště odpovídající minimálně dvojnásobku kritické hloubky pro návrhový průtok ($\alpha = 1{,}0$) a maximální 2,2násobku kritické hloubky. Dále doporučuje světlou výšku vtokového profilu skluzu (odpadní chodby) uvažovat minimálně 1,8násobek kritické hloubky ($\alpha = 1{,}0$). Také měrný průtok ve spadišti by měl nabývat hodnoty do 12,0 m^2/s, ojediněle do 15,0 m^2/s. Šířka spadiště by měla být větší než 2,0 m a větší než čtyřnásobek přepadové výšky pro návrhový průtok. Délka spadiště se doporučuje minimálně dvojnásobek šířky spadiště. Sklon dna spadiště ideálně nabývá hodnoty větší než kritický sklon, nejméně však 2 %. [12] Spadiště se vůči přelivu umístí výškově tak, aby byl vždy přepad dokonalý. [10] U sdruženého objektu s šachtovým přelivem doporučuje směrnice navrhnout zúžený profil v rozmezí napojení šachty přelivu na odpadní štolu (chodbu). Pro pravoúhlou štolu (chodbu) by světlá výška výtokového otvoru měla splňovat podmínku, že je menší než ¾ světlé výšky odpadní štoly (chodby) nebo že je o 0,5 m menší než světlá výška štoly (chodby). Šířka výtokového otvoru se volí s ohledem na požadavek převedení dvojnásobného návrhového průtoku a s ohledem na požadavky pro měrný průtok. [12] Bezpečnostní přeliv se mnohdy navrhuje na přepadovou výšku 0,3 m až 0,6 m. [11]

Průběh hladiny v odpadu se stanovuje metodami pro nerovnoměrné proudění. [12] Tlakový odpad se při průchodu tělesem hráze nepřipouští. [3] Mezi hladinou a stropem odpadu se zavádí převýšení, jež zohledňuje provzdušnění a bezpečnostní rezervu (obvykle 0,6 m). [5] Vyhláška 590/2002 uvádí, že minimální vzdálenost pro uzavřené profily mezi stropem a hladinou činí 0,5 m. [28] Typizační směrnice doporučuje pro sdružený objekt se žlabovým přelivem pro návrh odpadu zvolit stejný sklon i šířku jako pro spadiště. Zároveň podélný sklon

je vhodné zvolit tak, aby ve spadišti vzniklo říční proudění a v odpadu bystřinné proudění, protože by voda lépe odtékala. [12] Hloubka na skluzu (odpadu) se ideálně pohybuje mezi hloubkou kritickou až hloubka rovnoměrného proudění. [12] Odpad při průchodu hrází by měl podle literatury [29] převést bezpečně dvojnásobek návrhového průtoku o volné hladině. [29] Taktéž odpad by měl převést průtok za stavby o volné hladině. [12] Pro primární velice hrubou představu lze teoreticky odhadnout si rozměry odpadní chodby pomocí rovnice rovnoměrného proudění. Avšak samotný návrh by se měl provést v souladu s doporučeními.

4.7.2 Spadiště

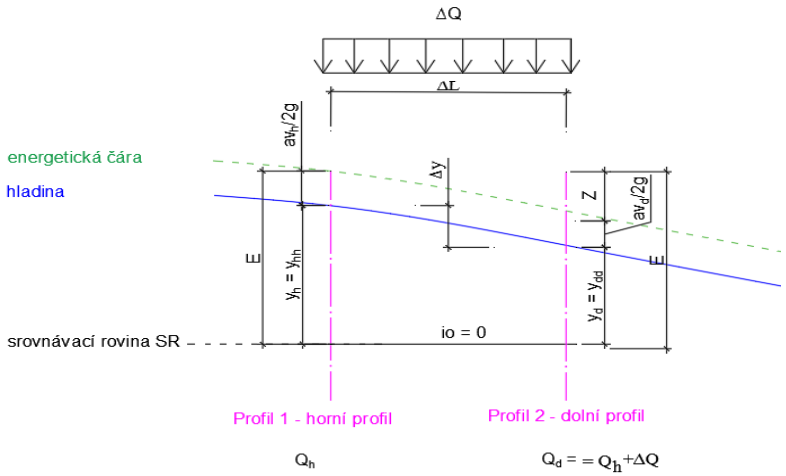
Diplomová práce se zabývá stanovením průběhu hladiny ve spadišti a v odpadní chodbě pro méně příznivý stav, kdy je v provozu pouze bezpečnostní přeliv s neprovozuschopnou výpustí. Diplomová práce aplikuje pro stanovení průběhu hladiny ve spadišti metody založené na větě o hybnosti i postupy založené na energetické bilanci. Energetická bilance vychází z rozšířené Bernoulliho rovnice s uvažováním ztráty mechanické energie, kdy se zanedbávají ztráty místní. Změna hladiny $\Delta y = y_h - y_d$ se stanoví pro nulový sklon dna podle vztahu: [26]

energetická bilance $$E = y_h + \frac{\alpha v_h^2}{2g} + \frac{p_h}{\rho g} = y_d + \frac{\alpha v_d^2}{2g} + \frac{p_d}{\rho g} + Z_t + Z_m \quad (1.16)$$

rovnice kontinuity $$Q = S * v \quad (1.17)$$

změna hladiny $$\Delta y = y_h - y_d = \frac{\alpha Q_d^2}{2g * S_d^2} - \frac{\alpha Q_h^2}{2g * S_h^2} + \frac{{Q_p}^2}{K^2} * \Delta L \quad (1.18)$$

kde	E	energetická výška	[m]
	Z_t	ztráty třením $Z_t = \frac{Q^2}{K^2} * \Delta L$	[m]
	Z_m	ztráty místní $Z_m = 0$	[m]
	Δy	změna hladiny	[m]
	y_h, y_d	hladina v horním/dolním profilu	[m]
	v_h, v_d	rychlost v horním/dolním profilu	[m/s]
	Q_p	průměrný průtok $Q_p = \frac{Q_h + Q_d}{2}$	[m^3/s]
	Q_h	průtok v horním profilu	[m^3/s]
	Q_d	průtok v dolním profilu $Q_d = Q_h + \Delta Q$	[m^3/s]
	ΔQ	změna průtoku tj. přírůstek průtoku přepadem přes přeliv na délce úseku (vztah 1.1)	[m^3/s]
	ΔL	délka úseku	[m]
	K	průtokový modul $K = S * C * R^{\frac{1}{2}}$ (viz Příloha 4)	[m^3/s]
	g	gravitační zrychlení	[m/s^2]
	α	Coriolisovo číslo	[-]
	$\frac{p_h}{\rho g}, \frac{p_d}{\rho g}$	tlaková výška (nabývá zde nule)	[m]



Obr. 36 – Energetická bilance („modifikace metody po úsecích“)

Věta o hybnosti říká, že „*přírůstek úhrnné hybnosti ve směru proudění je roven impulsu vnějších sil v daném směru*“. [26, p. 56] Vnějšími silami jsou objemové síly (působí na hmotnost tělesa, př. gravitační síla) a povrchové síly (působí na plochu tělesa, př. tlaková síla, třecí síla). [30] Příkladem postupu věty o hybnosti je například postup Ven te Chow. Změna hybnosti se vyjadřuje bilanční rovnicí: [31]

$$\frac{dM}{dt} = F_1 - F_2 + G + F_f \tag{1.19}$$

kde změna hybnosti $\frac{dM}{dt} = \alpha * \rho * (Q * dv + (v + dv) * dQ)$

gravitační síla $G = m * g = \rho * V * g = \rho * S * i_o * dL * g$

tlaková síla $F = S * p = S * \rho * y * g$

třecí síla $F_f = \rho * g * S * i_f * dx$

Změna hladiny $\Delta y'$ se stanoví podle vztahu: [31]

$$\Delta y = -\frac{\alpha}{g} * Q_1 * \frac{(v_1+v_2)}{(Q_1+Q_2)} * \left(\Delta v + v_2 * \frac{\Delta Q}{Q_2}\right) + io * \Delta L + i_f * \Delta L = -\Delta y' + io * \Delta L \tag{1.20}$$

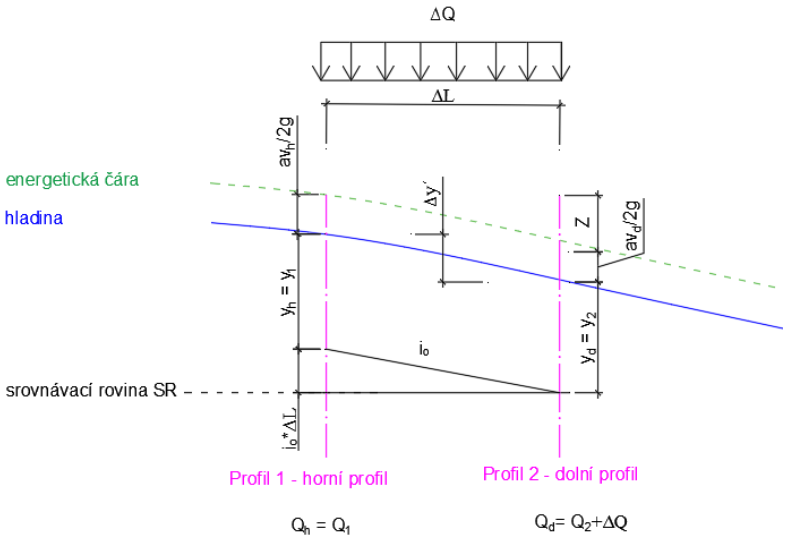
$$\Delta y' = \frac{\alpha}{g} * Q_1 * \frac{(v_1+v_2)}{(Q_1+Q_2)} * \left(\Delta v + v_2 * \frac{\Delta Q}{Q_2}\right) + i_f * \Delta \tag{1.21}$$

kde	Δy	změna hloubky	$\Delta y = y_2 - y_1 = y_d - y_h$	[m]
	Δy´	změna hladiny (rozdíl hladin)		[m]
	v_1, v_2 = v_h,v_d	rychlost v horním/dolním profilu		[m/s]
	Q_1, Q_2 = Q_h, Q_d	průtok v horním/dolním profilu		[m^3/s]
	Δv	změna rychlosti	$\Delta v = v_2 - v_1 = v_d - v_h$	[m/s]
	ΔQ	změna průtoku	$\Delta Q = Q_2 - Q_1 = Q_d - Q_h$	[m^3/s]
	i_o	sklon dna		[-]
	ΔL	délka úseku		[m]
	α	Coriolisovo číslo		[-]
	i_f	součinitel tření		[-]
	g	gravitační zrychlení		[m/s^2]

Přírůstek průtoku ΔQ se stanoví rovnicí přepadu přes přeliv (vztah 1.1 nebo 1.2). Součinitel tření se vyjádří z Maningovy rovnice: [26]

$$i_f = \frac{Q^2 * n^2}{S^2 * R^{\frac{4}{3}}} \qquad (1.22)$$

kde Q průtok [m^3/s]
S průtočná plocha [m/s]
R omočený obvod [m^3/s]
n drsnostní součinitel [-]
i_f součinitel tření [-]



Obr. 37 – Popis proměnných pro postup Ven te Chow

Metoda energetické bilance i metoda věty o hybnosti jsou iterační metodou, kdy se volí změna hladiny Δy a změna hladiny Δy´ tak dlouho, dokud se volená proměnná neshoduje s vypočtenou proměnnou. Kromě postupu Ven te Chow je založen na větě o hybnosti i například postup Hindse (viz [32]). Důvodem nulového sklonu dna nelze na fyzikálním modelu aplikovat postup Komorova.

4.7.3 Odpadní chodba

Při proudění odpadní chodbou vzniká nejdříve proudění o volné hladině bez zahlceného vtoku odpadní chodby, poté proudění o volné hladině se zahlceným vtokem odpadní chodby a nakonec tlakové proudění, kdy se odpadní chodba zahltí postupně nebo najednou po celé své délce.

Proudění v odpadní chodbě bez zahlceného vtoku

Vlivem nulového sklonu dna se rovnoměrné proudění na fyzikálním modelu nevytvoří. Nerovnoměrné proudění se pro prizmatická koryta řeší přímou integrací nebo numerickou integrací. Nerovnoměrné proudění pro neprizmatická koryta se řeší často obecnou metodou po úsecích. Metoda po úsecích opakovaně iteruje, dokud zvolené převýšení hladin $\Delta y = y_h - y_d$ se nerovná stanovenému převýšení hladin Δy. Převýšení hladin Δy se stanoví pro nulový sklon dna ze vztahu: [26]

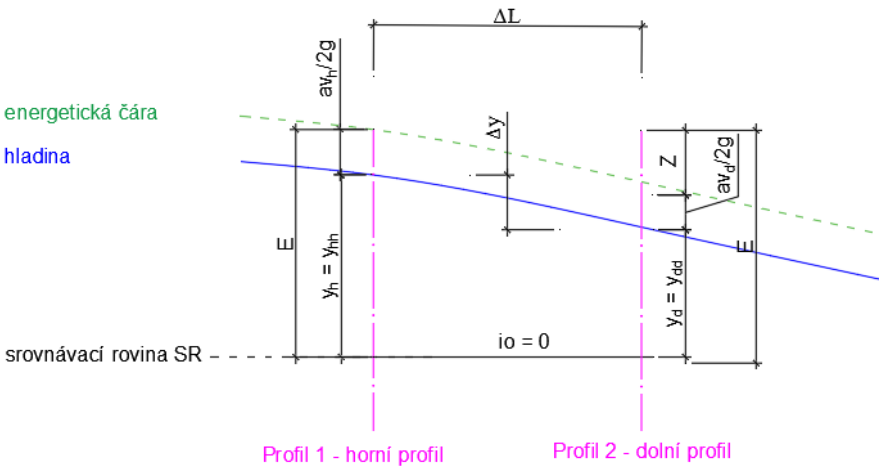
energetická bilance $E = y_h + \frac{\alpha v_h^2}{2g} + \frac{p_h}{\rho g} = y_d + \frac{\alpha v_d^2}{2g} + \frac{p_d}{\rho g} + Z_t + Z_m$ (1.23)

rovnice kontinuity $Q = S * v$ (1.24)

převýšená hladin $\Delta y = \frac{\alpha Q^2}{2g}\left(\frac{1}{S_d^2} - \frac{1}{s_h^2}\right) + \frac{Q^2}{K^2} * \Delta L + \xi_m * \left|\alpha * \frac{v_d^2 - v_h^2}{2g}\right|$ (1.25)

kde	E	energetická výška		[m]
	Z_t	ztráty třením	$Z = \frac{Q^2}{K^2} * \Delta L$	[m]
	Z_m	ztráty místní	$Z = \xi_m * \left\|\alpha * \frac{v_d^2 - v_h^2}{2g}\right\|$	[m]
	Δy	převýšení hladin		[m]
	y_h , y_d	hladina v horním / dolním profilu		[m]
	v_h , v_d	rychlost v horním / dolním profilu		[m]
	S_h , S_d	průtočná plocha v horním / dolním profilu	S = b * y	[m^2]
	y	hloubka v příslušném profilu		[m]
	b	šířka v příslušném profilu		[m]
	Q	průtok		[m^3/s]
	ΔL	délka úseku		[m]
	ξ_m	součinitel ztráty místní změnou průřezu		[-]
	α	Coriollisovo číslo		[-]
	K	modul průtoku	$K = S * C * R^{\frac{1}{2}}$ (viz Příloha 4)	[m/s^3]
	g	gravitační zrychlení		[m/s^2]
	$\frac{p_h}{\rho g}, \frac{p_d}{\rho g}$	tlaková výška (nabývá zde nule)		[m]

Při stanovení průběhu hladiny v odpadní chodbě se zavadí i postupy založené na změně hybnosti. Příkladem postupu založeného na hybnosti je postup Ven te Chow.



Obr. 38 – Nerovnoměrné proudění v otevřeném korytě – metoda po úsecích

Proudění v odpadní chodbě se zahlceným vtokem

Pro zahlcený vtok odpadní chodby mohou nastat dvě situace. Za vtokem odpadní chodby se vytváří snížená hloubka y_c nebo v odpadní chodbě pozvolna vzniká tlakový režim proudění. Průběh hladiny v odpadní chodbě se stanoví podle vztahu: [26]

energetická bilance $E = y_h + \frac{\alpha v_h^2}{2g} + \frac{p_h}{\rho g} = y_c + \frac{\alpha v_c^2}{2g} + \frac{p_c}{\rho g} + Z_t + Z_m$

$$E = y_h + \frac{\alpha v_h^2}{2g} + \frac{p_h}{\rho g} = y_c + \frac{\alpha v_c^2}{2g} + \frac{p_c}{\rho g} + \xi_t * \frac{v_c^2}{2g} + \xi_m * \frac{v_c^2}{2g} \quad (1.26)$$

rovnice kontinuity $Q = S_c * v_c = \varepsilon * S * v_c$ (1.27)

průtok $$Q = \mu * S * \sqrt{2g} * \left(y_h + \frac{\alpha v_h^2}{2g} - y_c\right)^{1/2} \quad (1.28)$$

kde	E	energetická výška	[m]
	Z_t	ztráty třením $Z = \xi_t \frac{\alpha v_c^2}{2g}$	[m]
	Z_m	ztráty místní $Z = \xi_m \frac{\alpha v_c^2}{2g}$	[m]
	Q	průtok	[m^3/s]
	y_h , y_c	horní hladina, zúžená hladina v profilu	[m]
	v_h , v_c	rychlost v profilu	[m]
	S	průtočná plocha výtokového otvoru $S = b_v * a_v$	[m^2]
	b_v	šířka otvoru	[m]
	a_v	výška otvoru	[m]
	ξ_m	součinitel ztráty místní	[-]
	ξ_t	součinitel ztráty třením	[-]
	α	Coriolisovo číslo	[-]
	g	gravitační zrychlení	[m/s^2]
	μ	výtokový součinitel (vztah 1.6)	[-]
	ε	součinitel výškového zúžení	[-]
	$\frac{p_h}{\rho g}, \frac{p_c}{\rho g}$	tlaková výška	[m]

Když se neprojeví vliv zpětného vzdutí dolní vody, tvoří se za vtokem odpadní chodby zúžená hloubka $y_c = \varepsilon * a_o$. V opačném případě se zúžená hloubka zatápí a vzniká hloubka $y_c = y_\sigma$. Hloubka y_σ se dopočítá nerovnoměrným prouděním v odpadní chodbě. Na fyzikálním modelu se vytváří tlakové proudění v části nebo po celé délce odpadu. Při tlakovém proudění nenabývá tlaková výška v odpadu nulové hodnoty. [26]

4.8 Průběh hladiny ve spadišti a v odpadní chodbě – výsledky

4.8.1 Průběh hladiny ve spadišti a v odpadní chodbě při nezahlceném vtoku odpadní chodby

Diplomová práce se zabývá stanovením průběhu hladiny ve spadišti a v odpadní chodbě pro méně příznivý stav, kdy se průtok převádí pouze přepadem přes bezpečnostní přeliv a kdy výpust je uvedena mimo provoz.

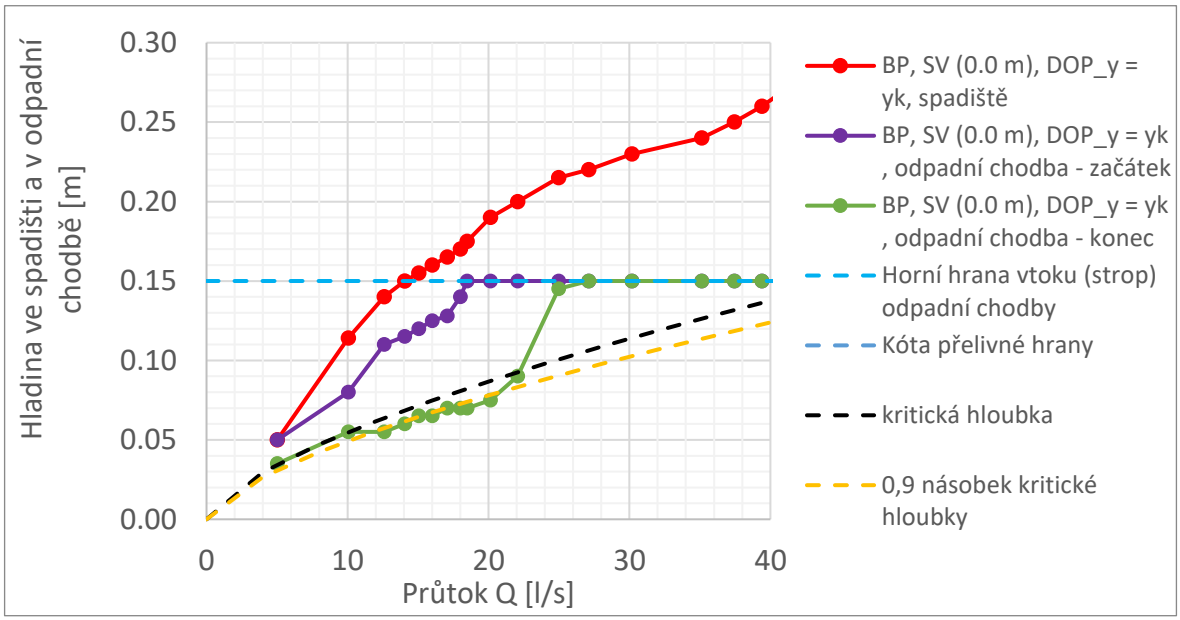
Při stanovení průběhu hladiny ve spadišti a v odpadní chodbě se řešila problematika, z jakého výchozího profilu by se mělo začínat a jaká výchozí hloubka se vytvoří v tomto profilu. Jako výchozí profil pro teoretické stanovení průběhu hladiny na fyzikálním modelu sdruženého objektu se zvolil konec odpadní chodby (označení polohy viz Obr. 39). Předpokládalo se, že při proudění o volné hladině s nezahlceným vtokem odpadní chodby se v tomto profilu tvoří hloubka blízká kritické hloubce, jelikož v odpadní chodbě nastává říční režim proudění a naopak v laboratorním žlabu se vytváří bystřinný režim proudění. Graf 16 zobrazuje závislost hladiny ve spadišti (konec spadiště) a v odpadní chodbě (začátek a konec odpadní chodby) na průtoku (poloha vyznačena na Obr. 39). Z grafu vyplývá, že v odpadní chodbě se utváří někde v blízkosti výchozího profilu kritická hloubka. Avšak s ohledem na vlastnosti provzdušněného proudění není snadné stanovit v jakém profilu. Existovala i možnost, že by se při stanovení průběhu hladiny vycházelo přímo ze změřených údajů na fyzikální modelu. Jelikož bylo snahou provést výpočet separátně, tato možnost se neuvažovala. Při zavedení tohoto předpokladu se zavedly do výpočtu určité odchylky. Teoretický průběh hladiny se posuzoval pro dolní okrajovou podmínku y = y_k, kdy se neprojevilo zpětné vzdutí dolní vody.

Teoretický průběh hladiny v odpadní chodbě lze nejen stanovit postupy pro nerovnoměrné proudění o volné hladině, ale rovněž i postupy založenými na větě o hybnosti za předpokladu, že nevznikají při proudění odpadním objektem žádné ztráty místní a že se vyjádří ztráta třením z Manningovy rovnice. Po zavedení daných předpokladů se vztah 1.20 při konstantním průtoku v odpadní chodbě zjednoduší do tvaru 1.29 Avšak z hydraulického hlediska v odpadní chodbě nedochází ke změně směru proudění a proudění je dáno spíše impulzem proudu.

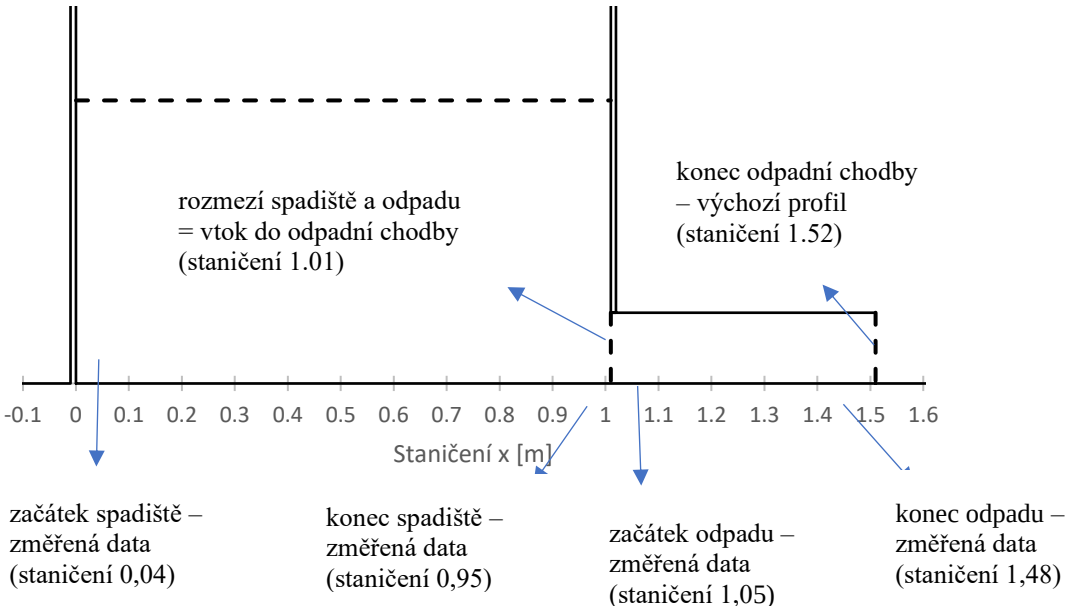
$$\Delta y = y_h - y_d + \Delta L * i = \frac{\alpha}{2g} * (v_d^2 - v_h^2) + \frac{{Q_p}^2}{K^2} * \Delta L \qquad (1.29)$$

Šířka spadiště a šířka odpadu na fyzikálním modelu sice nabývají stejné hodnoty, však na modelu se utváří ztráta místní vlivem drážky pro stavidlový uzávěr na rozmezí spadiště a odpadní chodby. Stavidlový uzávěr na vtoku odpadní chodby nebyl součástí tohoto fyzikálního modelu. Zavedením součinitele ztráty místní náhlým rozšířením a zúžením hodnotou ξm = 0,03 se ukázalo, že lze tuto ztrátu zanedbat s ohledem na její nevýznamný příspěvek. Součinitel drsnosti se stanovil na základě typu materiálu hodnotou n = 0,012. S volbou součinitele drsnosti vyvstává otázka, zdali by se měla uvažovat pouze vnější drsnost třením o materiál, nebo se i zohlednit vnitřní tření kapaliny.

Teoretický průběh hladiny nekoresponduje se změřeným průběhem hladiny v odpadní chodbě po celé své délce, jak ukazuje graf 20. Na konci odpadu se sice tvoří změřená hloubka blízká teoretické kritické hloubce, ale dopočítaná teoretická hloubka na začátku odpadu se v porovnání se změřenou hloubkou liší. Důvodem odlišnosti je mimo jiné měření hladiny u stěny odpadní chodby, vlastnosti proudění ve spadišti (př. provzdušnění, příčné zakřivení hladiny) a nulový sklon dna (nenapomáhá odtoku, říční proudění). Typizační směrnice se zmiňuje, že u modelových výzkumů se ve výchozím profilu na rozmezí spadiště a odpadní chodby neutvářela teoretická hodnota kritické hloubky, ale vlivem charakteru proudění vyšší hloubka. [12]



Graf 16 – Závilost změřené hladiny ve spadišti (konec) a v odpadu (začátek, konec) na průtoku



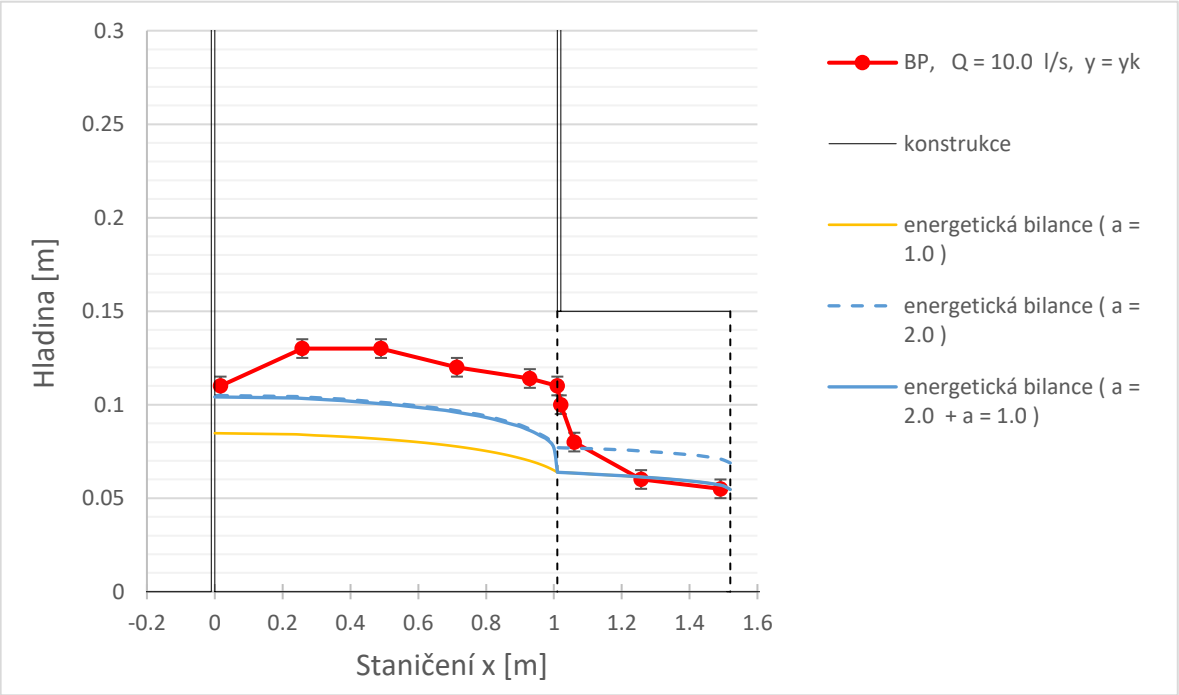
Obr. 39 – Označení profilů pro vykreslení křivek změřených dat nebo pro výpočet

Teoretický průběh hladiny ve spadišti nekoresponduje s průběhem hladiny změřené na fyzikálním modelu (viz Graf 20). Změřený průběh hladiny znázorňuje průběh hladiny u stěny spadiště, nikoliv hladinu ve středu spadiště a ani průměrnou hladinu ve spadišti. Průběh hladiny ve spadišti je ovlivněn vlastnostmi proudění. Lze očekávat, že hladina u stěny začátku spadiště bude přibližně podobná hladině ve středu spadiště, jelikož se neprojevilo výrazné příčné zakřivení hladiny a nepůsobí vliv proudění ve spadišti.

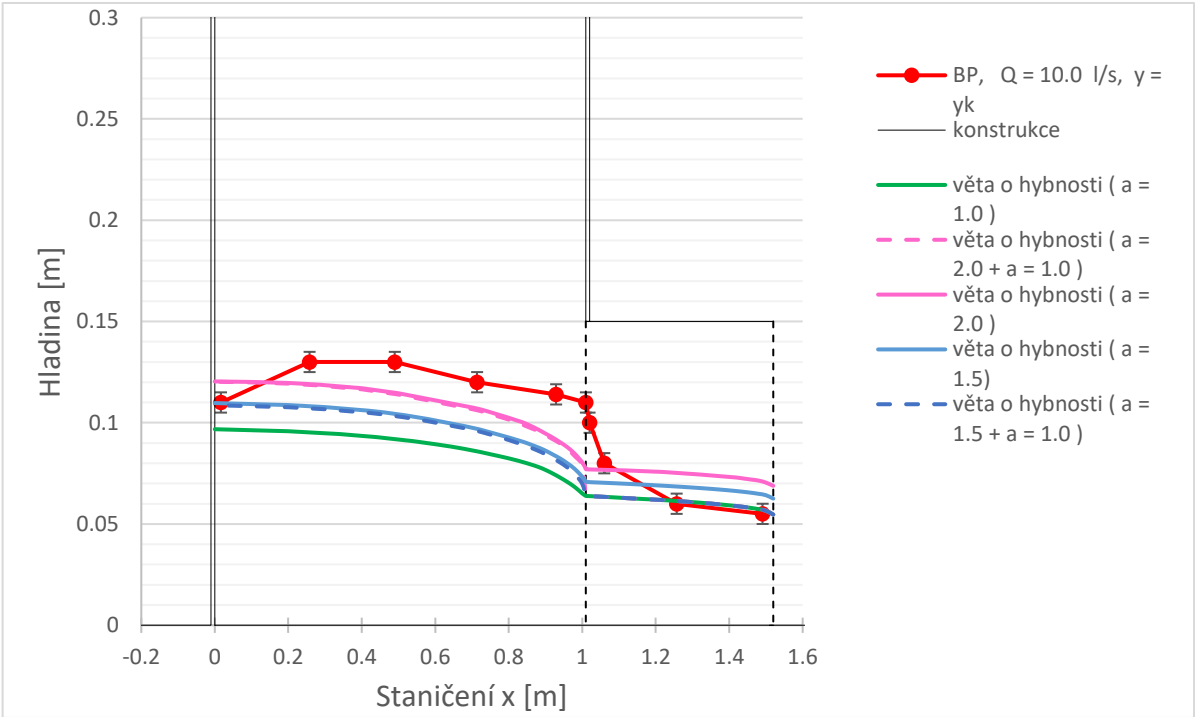
Při výpočtu se narazilo na problematiku spjatou s Coriolisovým číslem. Ani po uvážení chyb měření, se pro hodnotu Coriolisova čísla $\alpha = 1,0$ nepřibližuje teoretický průběh hladiny ke změřenému průběhu hladiny ve sdruženém objektu. Typizační směrnice poukazuje, že důsledkem vlastností proudění ve spadišti nabývá hodnota Coriolisova čísla hodnot vyšších, klidně i nad hodnotu $\alpha = 2$. [12] Bylo tedy otázkou, zda se má navýšit hodnota Coriolisova čísla jen pro výpočty ve spadišti, nebo i pro výpočty v odpadním objektu. Z grafů 17 a 18 vyplývá, že pro stanovení teoretického průběhu hladiny na fyzikálním modelu nezáleží, zda se pro daný postup navýší hodnota Coriolisova čísla pouze pro výpočet ve spadišti, nebo i pro výpočet v odpadní chodbě. Pro daný postup teoretický průběh hladiny ve spadišti nabývá podobných hodnot jak pro navýšení Coriolisovo čísla pouze ve spadišti, tak i pro navýšení Coriolisovo čísla ve spadišti a v odpadní chodbě. Pro průběh hladiny v odpadním objektu se bralo v úvahu, že na konci odpadní chodby se tvoří hloubka blízká kritické hloubce (pro $\alpha = 1,0$). Přistoupilo se k navýšení hodnoty Coriolisova čísla pouze pro výpočet průběhu hladiny ve spadiště. Výpočet teoretického průběhu hladiny ve spadišti vychází z dopočítané hloubky (pro Coriolisovo číslo $\alpha = 1,0$) v profilu rozmezí spadiště a odpadní chodby. Diplomová práce nedokáže jednoznačně konstatovat, zda se má navýšit hodnota Coriolisovo číslo pro výpočet průběhu hladiny ve sdruženém objektu, nebo případně nikoliv, pro praktické účely.

Pro stanovení teoretického průběhu hladiny ve spadišti je lepší aplikovat postup založený na větě o hybnosti než na energetické bilanci. Zásadním důvodem je vytvoření změny směru proudění ve spadišti. I některá odborná literatura pro stanovení průběhu hladiny ve spadišti bočního bezpečnostního přelivu uvádí postup založený na větě o hybnosti, např. *Open – Channel Hydraulics* [31], *Hydraulic Structures* [33], typizační směrnice [12]. Graf 20 zobrazuje teoretický průběh hladiny ve spadišti postupem Ven te Chow (pro $\alpha = 1,0$, $\alpha = 1,5$, $\alpha = 2,0$ a $\alpha = 3,0$), teoretický průběh hladiny ve spadišti pro postup energetické bilance (pro $\alpha = 1,0$ a $\alpha = 2,0$), dále průběh hladiny v odpadní chodbě pro postup metodou po úsecích ($\alpha = 1,0$) a změřená data na modelu pro průtok $Q = 10$ l/s. Z grafu vyplývá, že hloubka ve spadišti nabývá nižších hodnot pro teoretický průběh hladiny stanoveným postupem energetické bilance v porovnání s teoretickým průběhem hladiny stanoveným postupem Ven te Chow. Toto je i patrné z grafu 19, který porovnává změřenou hladinu (hloubku) na začátku spadiště s hladinami (hloubkami) stanovenými zmíněnými výpočetními postupy. Aby změřená hladina (hloubka) odpovídala teoretické hladině (hloubce), musela by se uvažovat pro postup energetické bilance hodnota Coriliolisova číslo cca $\alpha = 2,0$. Naopak pro metodu věta o hybnosti postačí navýšit Coriolisovo číslo na hodnotu $\alpha = 1,5$. Teoretická hloubka na začátku spadiště je vypočítaná za předpokladu, že ve výchozím profilu (konec odpadní chodby) vzniká kritická

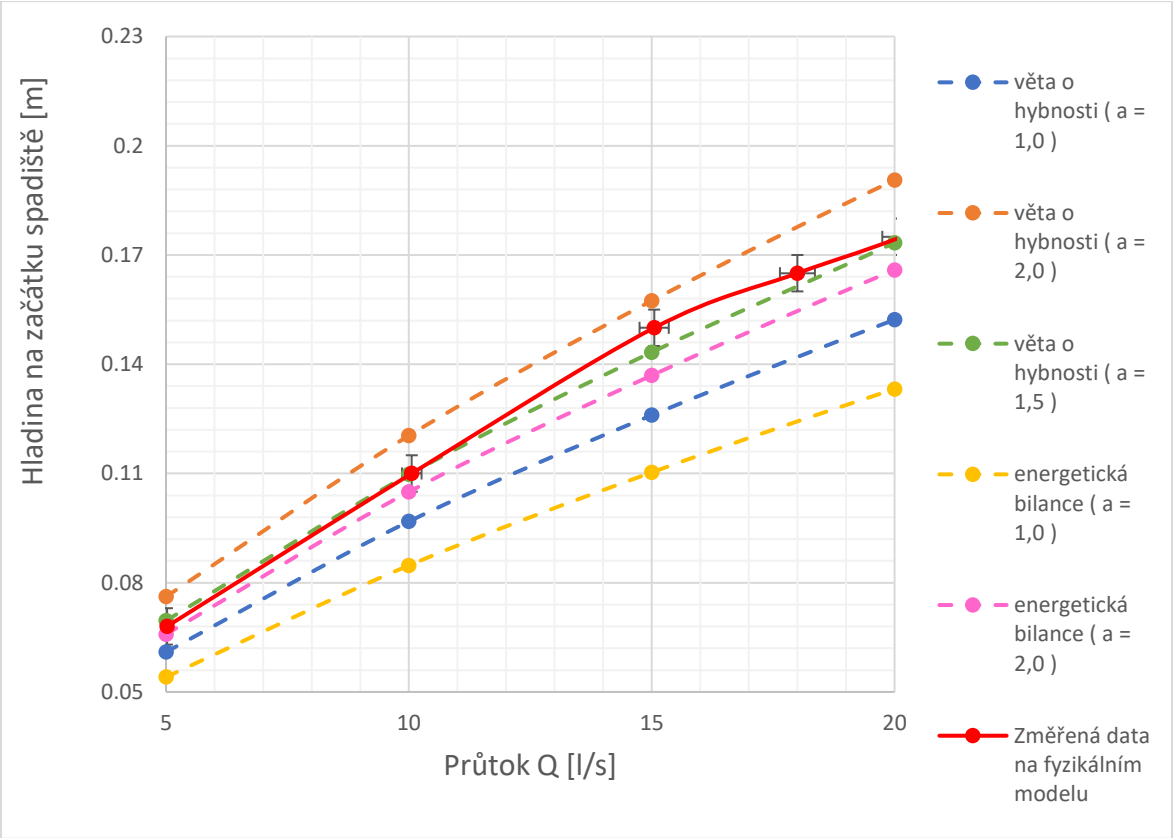
hloubka a v odpadu je proudění o volné hladině. Pro změřený průběh se na fyzikálním modelu na začátku odpadní chodby utváří tlakové proudění nad průtok 18,5 l/s. Diplomová práce usuzuje, že stanovit průběh hladiny ve spadišti postupem rovnoměrného proudění není vhodné.



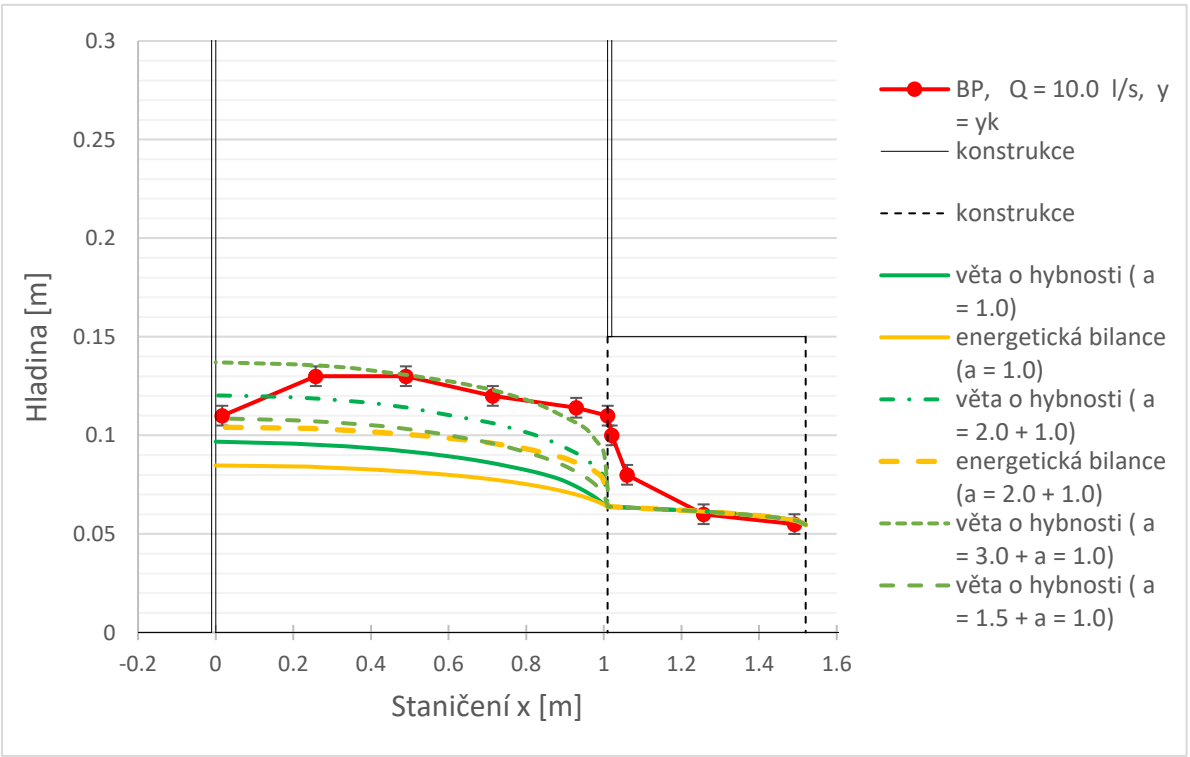
Graf 17 – Teoretický průběh hladiny ve spadišti stanovený energetickou bilancí (spadiště) a metodou po úsecích (odpadní chodba) pro různou kombinaci Coriolisova čísla, změřený průběh hladiny ve sdruženém objektu (Q = 10,0 l/s)



Graf 18 – Teoretický průběh hladiny ve spadišti stanovený postupem Ven te Chow (spadiště) a metodou po úsecích (odpadní chodba) pro různou kombinaci Coriolisova čísla, změřený průběh hladiny ve sdruženém objektu (Q = 10,0 l/s)



Graf 19 – Porovnání teoretické hladiny na začátku spadiště pro různé postupy se změřenou hladinou (pro BP, y = yk) v závislosti na průtoku



Graf 20 – Teoretický průběh hladiny stanovený různými postupy a změřený průběh hladiny na modelu sdruženého objektu (Q = 10 l/s)

Vysvětlení legendy grafů 17 až 20

věta o hybnosti (a = 1,5 + a = 1,0)

pro výpočet ve spadišti se použil postup Ven te Chow s hodnotou Coriolisova čísla α = 1,5 a pro výpočet v odpadní chodbě se použila metoda po úsecích s hodnotou Coriolisova čísla α = 1,0

věta o hybnosti (a = 1,5)

pro výpočet ve spadišti se použil postup Ven te Chow s hodnotou Coriolisova čísla α = 1,5 a pro výpočet v odpadní chodbě se použila metoda po úsecích s hodnotou Coriolisova čísla α = 1,5

energetická bilance (a = 2,0 + a = 1,0)

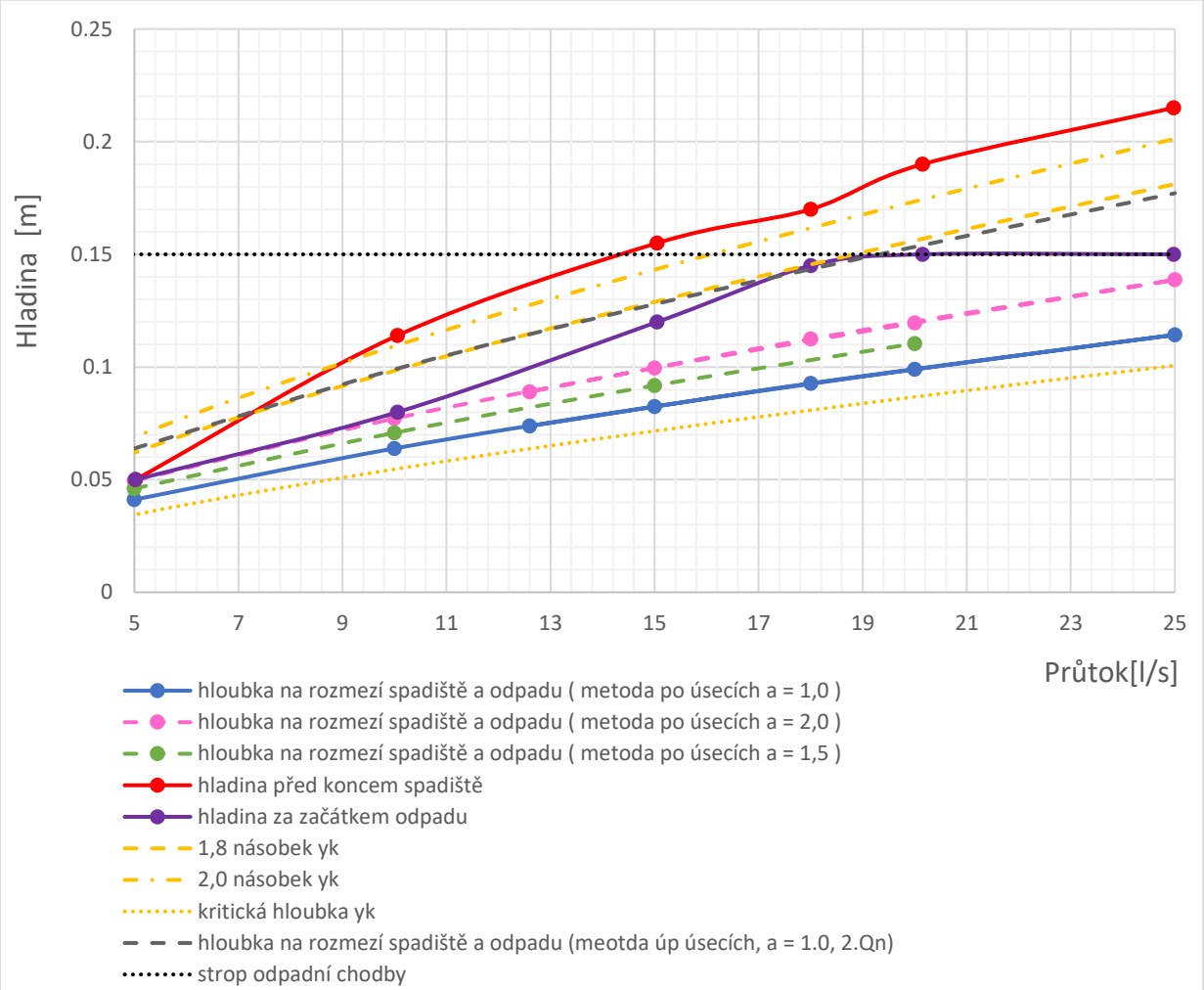
pro výpočet ve spadišti se použil postup energetické bilance s Coriolisova čísla α = 2,0 a pro výpočet v odpadní chodbě se použila metoda po úsecích s hodnotou Coriolisova čísla α = 1,0

energetická bilance (a = 1,0)

pro výpočet ve spadišti se použil postup energetické bilance s Coriolisova čísla α = 1,0 a pro výpočet v odpadní chodbě se použila metoda po úsecích s hodnotou Coriolisova čísla α = 1,0

BP, Q = 10,0 l/s, y = yk

experiment „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“, průtok 10 l/s, dolní okrajová podmínka y= yk



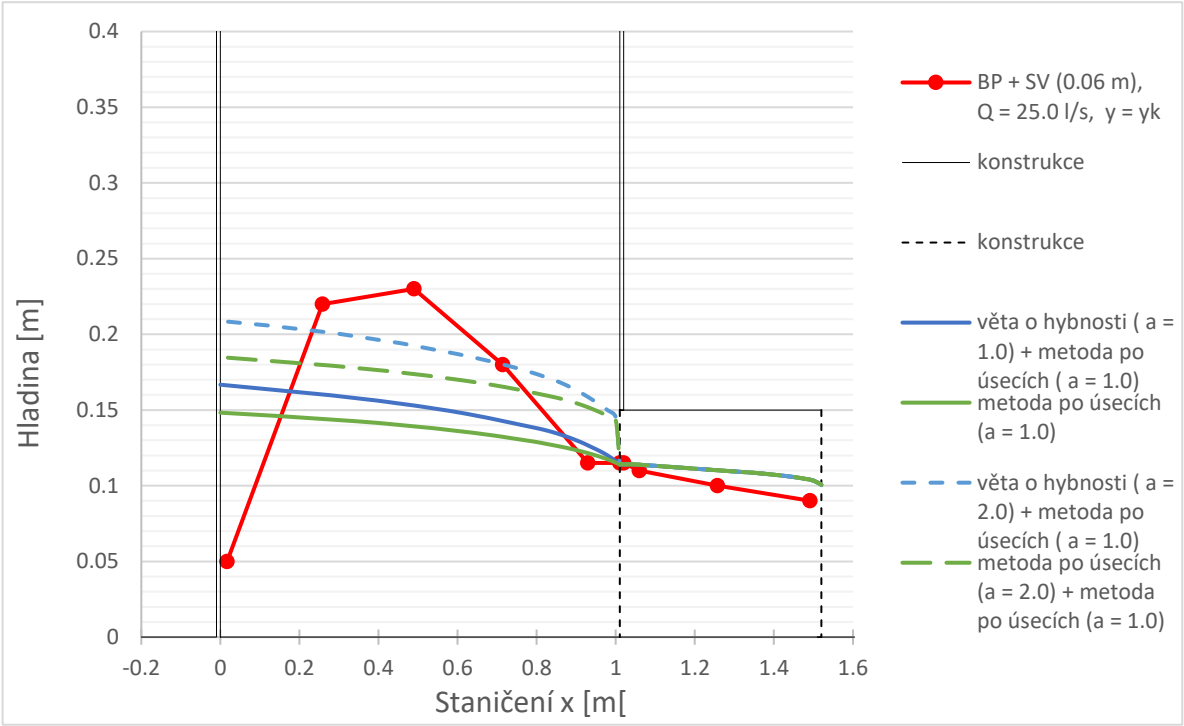
Graf 21 – Teoretický i změřený průběh hladiny na začátku odpadní chodby (rozmezí spadiště a odpadní chodby) a doporučená hloubka hloubky spadiště dle směrnice v závislosti na průtoku

Na základě modelových výzkumů doporučuje typizační směrnice pro sdružený objekt se žlabovým přelivem volit hloubku spadiště v místě napojení odpadu na spadiště odpovídající minimálně dvojnásobku kritické hloubky pro návrhový průtok a dále doporučuje výšku vstupního profilu navazujícího odpadu navrhnout 1,8násobek kritické hloubky v souvislosti s dalšími doporučeními. Vlivem charakteru proudění se utváří na rozmezí spadiště a odpadu hloubka vyšší než předpokládaná hloubka. [12] Naopak pro sdružený objekt s šachtovým přelivem typizační směrnice doporučuje jiné rozměry. Odpadní chodba by měla převést dvojnásobek návrhového průtok o volné hladině. [12] Při splnění doporučení by se mělo zachovat proudění o volné hladině v odpadu. (Další informace včetně ukázky výpočtů např. viz [12].)

Graf 21 porovnává teoreticky stanovenou hloubku v profilu napojení odpadní chodby na spadiště (aplikace metody po úsecích v odpadním objektu, pro Cor. číslo a = 1,0/ 1,5/ 2,0) a změřenou hloubkou na fyzikálním modelu (konec spadiště, začátek odpadu). Graf dále zobrazuje křivku hloubky odpovídající dvojnásobnému průtoku a křivky s doporučenými násobky kritické hloubky dle směrnice (pozn. Protože srovnávací rovina vede dnem spadiště a odpadní chodby, je hloubka ve spadišti rovna vzdálenosti hladiny k srovnávací rovině.). Protože se přímo neměřila hloubka na rozmezí spadiště a odpadu, je nutné si hloubka interpolovat mezi křivkou změřené hladiny na konci spadiště a začátku odpadu (poloha viz Obr. 39). Změřený průběh hladiny se přibližuje k průběhu křivky 1,8násobku kritické hloubky a k průběhu křivky hloubky pro dvojnásobný průtok, až se dostává nad jejich průběh. Protože se liší hodnota teoreticky stanovené hloubky od změřené hloubky na modelu v profilu napojení odpadu na spadiště, je na straně bezpečnosti zvážit doporučení pro návrh sdruženého objektu. Rozdílnost změřeného průběhu hladiny s křivkami doporučených hodnot je dána konstrukčním řešením fyzikálního modelu a vlastnostmi proudění.

Při přepadu pouze přes přeliv se tvoří ve spadišti nerovnoměrné prostorové proudění. Předpokladem pro aplikaci věty o hybnosti je neexistence impulzu pro proudění ve spadišti, například impulz vytvoří proudění výpustí. [33] Graf 22 zobrazuje průběh hladiny ve sdruženém objektu pro změřená data na modelu (průtok 25 l/s) při provozu výpusti i bezpečnostního přelivu pro výšku otevření výpusti 0,06 m, dále teoretický průběh hladiny ve spadišti pro postup věty o hybnosti dle Ven te Chow (Coriolisovo číslo $\alpha = 1,0$ a $\alpha = 2,0$) a pro postup energetické bilance (Coriolisovo číslo $\alpha = 1,0$ a $\alpha = 2,0$). Graf dále zobrazuje teoretický průběh hladiny v odpadní chodbě stanovenou metodou po úsecích (Coriolisovo číslo $\alpha = 1,0$). Teoretický průběh hladiny ve spadišti používá pro rozdělení průtoku výpustí a přepadu přes bezpečnostní přeliv metodu b) (viz v kapitole *Konzumční křivka sdruženého objektu*). Z grafu vyplývá, že nelze aplikovat zmíněné výpočetní postupy při součinnosti proudění výpustí a přepadu přes přeliv uvedeným způsobem. Průběhy křivek změřené hladiny a stanovené hladiny se navzájem od sebe liší nejen hodnotově, ale i tvarem. Teoretický průběh hladiny ve spadišti má spíše vzestupní trend, naopak průběh změřené hladiny ve spadišti má spíše odlišný trend. Vzájemná interakce proudění a přepadu přes přeliv ve spadišti vytváří složité hydraulické poměry. Například proud výpustí tlačí naakumulovanou vodu ve spadišti

dále po proudu, čímž napomáhá k jejímu odtoku ze spadiště i ovlivňuje průběh hladiny ve spadišti. Nebo mimo jiné i přepadající paprsky ovlivňují proud výpustí a vytváří příčné zakřivení, čímž se touto kombinací u stěny spadiště vytvoří vyšší hladina než ve středu spadiště. Průběh hladiny ve spadišti při souběžné činnosti obou funkčních zařízení se stanoví jinými postupy. V Příloze 6 je přidán doplňkový výpočet pro dolní okrajovou podmínku y = 0,07 m.



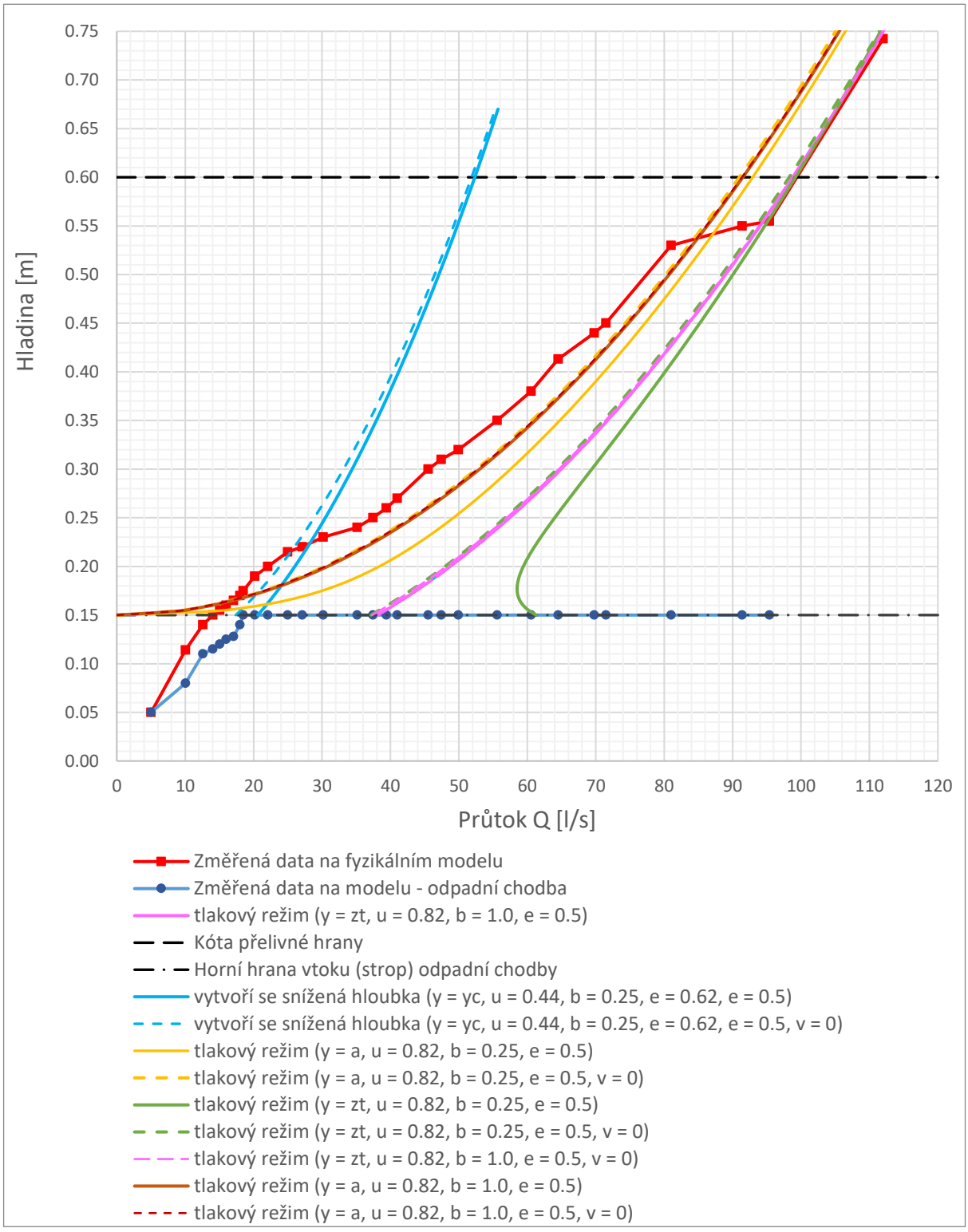
Graf 22 – Změřený průběh hladiny ve sdruženém objektu pro experiment bezpečností přeliv s otevřenou výpustí (výška otevření 0,06 m) a teoretický průběh hladiny
Pozn. Pro teoretický výpočet uvažován průtok výpustí 13,23 l/s a přepadu přes přeliv 11,77 l/s.

4.8.2 Průběh hladiny ve spadišti a v odpadní chodbě při zahlceném vtoku odpadní chodby

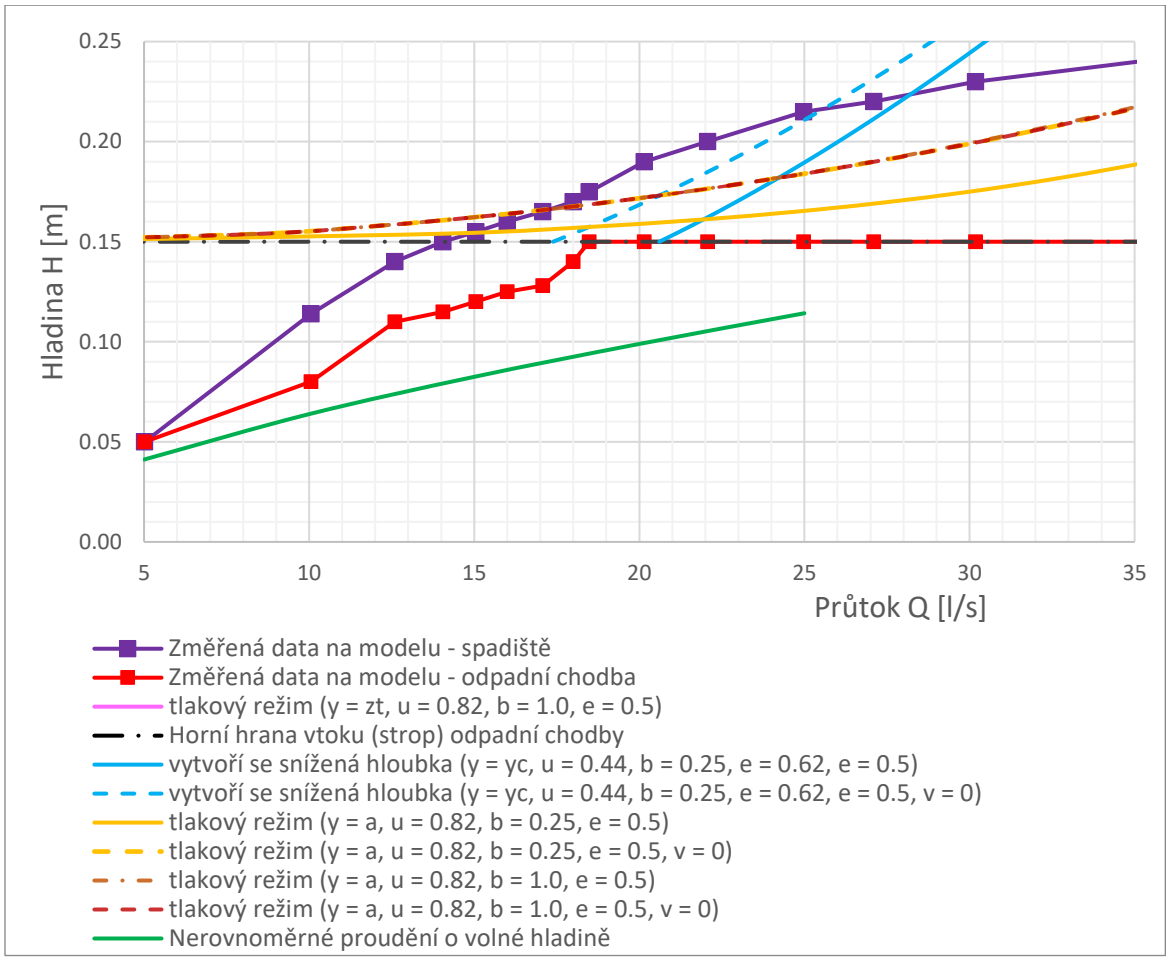
Snahou diplomové práce bylo stanovit i postup pro výpočet průběhu hladiny ve sdruženém objektu po zahlcení vtoku odpadní chodby při méně příznivém stavu provozu bezpečnostního přelivu s neprovozuschopnou výpustí. Bohužel se zjistilo, že důsledkem charakteru proudění není diplomová práce schopná jednoznačně stanovit postup řešení. Pro stanovení hladiny na konci spadiště při zahlceném vtoku se uvažovaly následující možnosti:

- Při zahlceném vtoku se vytvoří snížená hloubka $y_c = e * a_v$, kde součinitel zúžení je e = 0,62 a výška odpadní chodby činí a_v = 0,15 m. Součinitel ztráty místní nabývá ξ = 0,5 a výtokový součinitel činí μ = 0,44.Výpočet zanedbává/nezanedbává přítokovou rychlost (šířka profilu b = 0,25 m). Coriolisovo číslo se uvažuje hodnotou 1,5.
- Při zahlceném vtoku se vytvoří tlakový režim proudění v odpadu. Hladina v profilu činí $y = a_o$ = 0,15 m, součinitel ztráty místní vtoku je ξ = 0,5 a výtokový součinitel je μ = 0,82. Coriolisovo číslo se uvažuje hodnotou 1,0. Výpočet zanedbává/nezanedbává přítokovou rychlost (šířka profilu b = 0,25 m). Vychází se z profilu na konci odpadu.
- Při zahlceném vtoku se vytvoří tlakový režim proudění v odpadu. Hladina v profilu činí $y = z_t$, součinitel ztráty místní vtoku je ξ = 0,5 a výtokový součinitel je μ = 0,82. Coriolisovo číslo se uvažuje hodnotou 1,0. Výpočet zanedbává/nezanedbává přítokovou rychlost (šířka profilu b = 0,25 m). Vychází se z profilu na konci odpadu.
- Při zahlceném vtoku se vytvoří tlakový režim proudění v odpadu. Hladina v profilu činí $y = a_o$, součinitel ztráty místní vtoku je ξ = 0,5 a výtokový součinitel je μ = 0,82. Coriolisovo číslo se uvažuje hodnotou 1,0. Výpočet zanedbává/nezanedbává přítokovou rychlost (šířka profilu b = 1,0 m). Nastává zatopený přepad. Vychází se z profilu na konci odpadu.
- Při zahlceném vtoku se vytvoří tlakový režim proudění v odpadu. Hladina v profilu činí $y = z_t$ = 0,5 a = 0,075 m, součinitel ztráty místní vtoku je ξ = 0,5 a výtokový součinitel je μ = 0,82. Coriolisovo číslo se uvažuje hodnotou 1,0. Výpočet zanedbává/nezanedbává přítokovou rychlost (šířka profilu b = 01,0 m). Nastává zatopený přepad. Vychází se z profilu na konci odpadu.

Z grafu 23 a 24 vyplývá, že teoretický průběh křivek nekoresponduje se změřenou hladinou na fyzikálním modelu vzhledem k vlastnostem provzdušněného proudění a vzhledem k proudění ve sdruženém objektu. Při tlakovém proudění v odpadní chodbě se nejblíže k průběhu změřené hladiny přibližuje křivka s dosazovaným parametrem $y = a$. Při výpočtu hladiny záleží, zda se zanedbává nebo nezanedbává přítoková rychlost. Při zanedbání přítokové rychlosti by činil rozdíl teoretické hladiny a naměřené hladiny cca 15 % až 20 %. Protože poté nabývá výtokový součinitel jiné hodnoty tak, aby teoretická křivka se podobala se změřenou křivkou. Naopak při dosazení parametru $y = z_t$ se ani po snížení výtokového součinitele průběh teoretické křivky nepodobá průběhu změřené křivky.

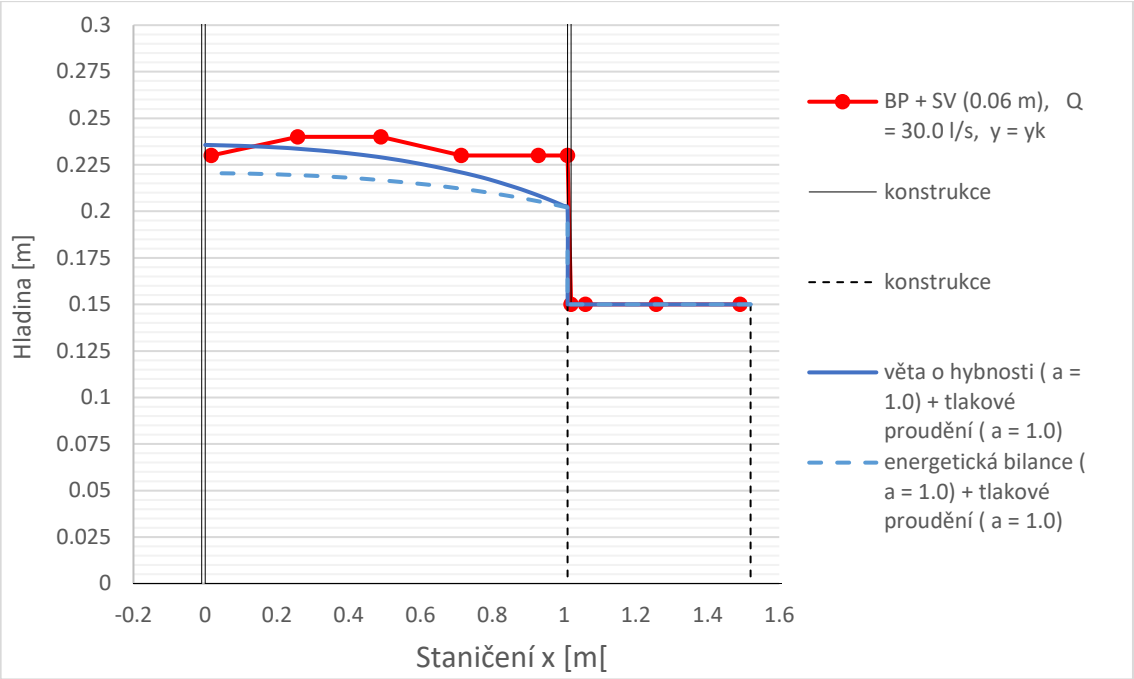


Graf 23 – Závislost průtoku na teoretické hladině na konci spadiště pro různé postupy, závislost průtoku na změřené hladině ve spadiště (konec) a změřené hladině v odpadní chodbě (začátek)

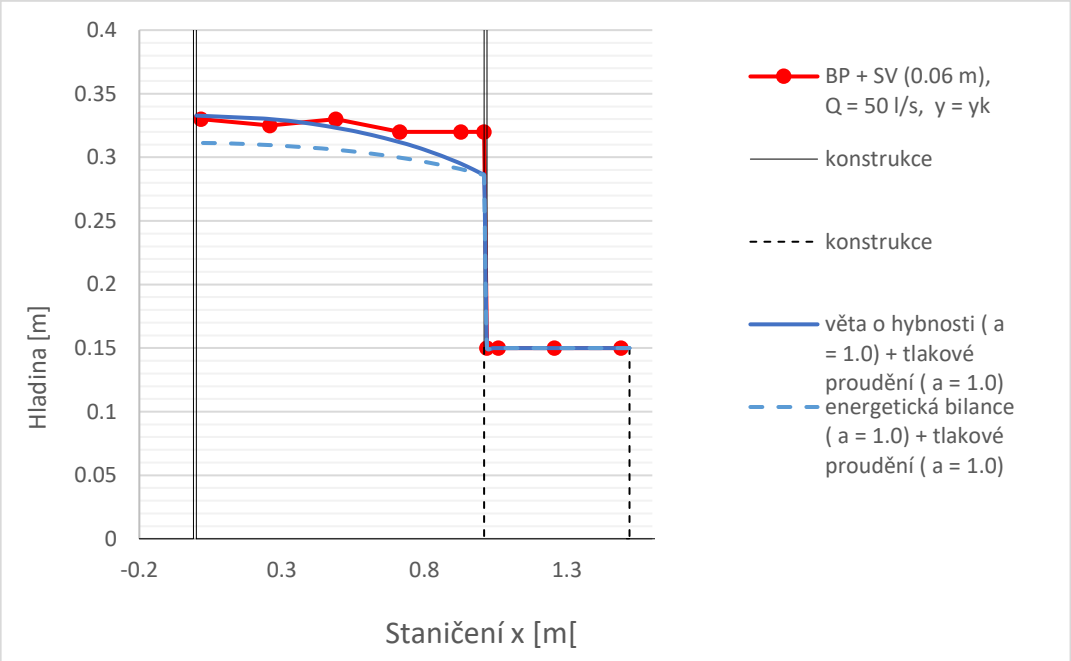


Graf 24 – Závislost průtoku na teoretické hladině na konci spadiště pro různé postupy, závislost průtoku na změřené hladině ve spadiště (konec) a změřené hladině v odpadní chodbě (začátek) – detail

Vyvstala tedy problematika, jaký výpočetní postup pro stanovení hladiny ve spadišti použít tak, aby výpočet byl adekvátní. Protože volba výpočetního postupu, ovlivňuje stanovenou hladinu na konci spadiště a poté i výpočet průběhu hladiny ve spadišti. Důkazem toho je graf 25 a graf 26, který zobrazuje teoretický průběh hladiny ve sdruženém objektu a změřený průběh hladiny pro průtok Q = 30 l/s a Q = 50 l/s. Hloubka na konci spadiště se dopočítala postupem podle odrážky č. 2 (výše z nabídky postupů) se zanedbáním přítokové rychlosti. Z grafu je patrné, že pokud by se uvažovala vyšší hladina v profilu, posunul by se teoretický průběh hladiny ve spadišti nahoru. Taktéž volba součinitelů, např. výtokového součinitele nebo Coriolisova čísla, by změnila průběh hladiny. Dále z grafu vyplývá, že změřený průběh hladiny vytváří skoro vodorovnou hladinu ve spadišti, a naopak teoretický průběh hladiny ve spadišti postupně se zvyšuje od konce k začátku spadiště. Na odlišnost tvaru křivek má vliv mimo jiné limitace odpadu kapacitou odpadní chodby, příčné zakřivení hladiny, provzdušnění proudu, akumulování vody ve spadišti, proudění vody ve spadišti, nulový sklon dna a podobně. Pro stanovení průběhu hladiny ve spadišti se blíží teoretický průběh hladiny pro Coriolisovo číslo a = 1,0 ke změřenému průběh hladiny ve spadišti. Například pro průtok Q = 30 l/s činí rozdíl teoretický hladiny od změřené hladiny na začátku spadiště do cca 5 %.



Graf 25 – Změřený průběh hladiny ve sdruženém objektu pro experiment bezpečností přeliv s otevřenou výpustí (výška otevření 0,06 m) a teoretický průběh hladiny

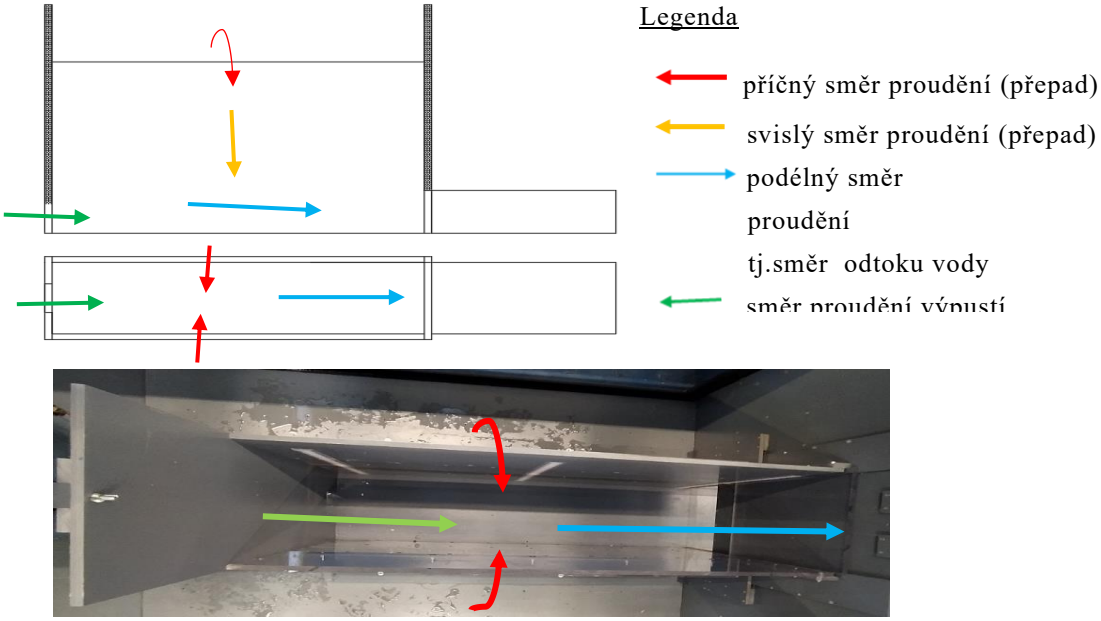


Graf 26 – Změřený průběh hladiny ve sdruženém objektu pro experiment bezpečností přeliv s otevřenou výpustí (výška otevření 0,06 m) a teoretický průběh hladiny

Z těchto všech faktů vyplývá, že stanovit průběh hladiny ve sdruženém objektu pro zahlcený vtok odpadní chodby není snadné s ohledem na charakter proudění ve sdruženém objektu.

4.9 Rekapitulace s rozpravou

Fyzikální model představuje jednopatrový sdružený objekt se žlabovým bezpečnostním přelivem oboustranného nátoku, s výpustí vyústěnou v čelní stěně přelivu a s uzavřeným profilem odpadu. Při proudění sdruženým objektem proudí voda nejdříve výpustí ve směru odtékající vody. Kdy vystoupá horní hladina v nádrži nad úroveň přelivné hrany, přidává se k proudění výpustí i přepad přes bezpečnostní přeliv. Přepadající voda přes přeliv mění ve spadišti směr proudění. Ve sdruženém objektu vzniká interakce dvou směru proudění – proudu výpusti i přepadu přes bezpečnostní přeliv. Obrázek 40 zobrazuje názorně směry proudění ve sdruženém objektu. Vzájemná interakce proudění výpustí a přepadu přes bezpečnostní přeliv ovlivňuje nejen proudění ve sdruženém objektu, ale i jeho kapacitu.



Obr. 40 – Popis směru proudění ve sdruženém objektu

Kapacita sdruženého objektu je limitována nejen kapacitou výpusti a kapacitou bezpečnostního přelivu, ale i kapacitou spadiště, kapacitou odpadu a podmínkami pod hrází. Než dosáhne horní hladina úrovně přelivné hrany, skládá se konzumční křivka sdruženého objektu z konzumční křivky výpusti. Po vystoupání horní hladiny nad kótu přelivné hrany se konzumční křivka sdruženého objektu stanoví jako součet konzumční křivky bezpečnostního přelivu a konzumční křivky výpusti. Obrázek 41 zobrazuje rozdělení konzumční křivky sdruženého objektu.

Konzumční křivka výpusti se skládá ze dvou částí – proudění výpustí před dosažením horní hladiny úrovně přelivné hrany a proudění výpustí po dosažení horní hladiny úrovně přelivné hrany. Než vystoupá horní hladina do úrovně přelivné hrany, vzniká ve sdruženém objektu nerovnoměrné ustálené proudění o volné hladině bez zahlceného vtoku výpusti a nerovnoměrné proudění o volné hladině se zahlceným vtokem výpusti. Mezi zahlceným vtokem a nezahlceným vtokem výpusti lze očekávat přechodovou oblast. S ohledem na rozměry výpusti se neproměřil zcela stav nezahlceného vtoku výpusti a přechodu výpusti

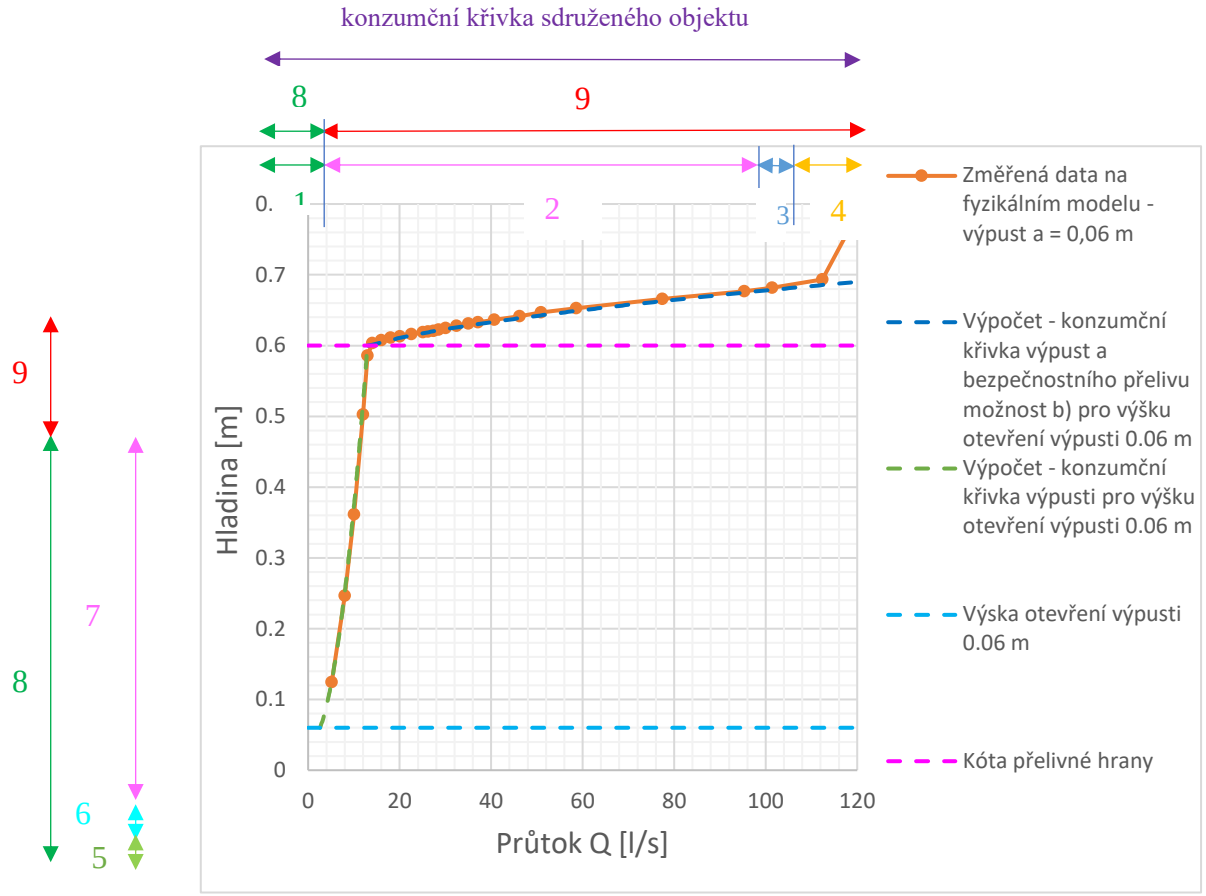
z nezahlceného vtoku do zahlceného vtoku. Protože je vytékající paprsek limitován dnem a nepůsobí na spodní vrstvě atmosférický tlak, ale nýbrž přetlak [26], usuzuje se, že se z hydraulického hlediska bude chovat proudění výpustí při zahlceném vtoku jako výtok pod konstrukcí. Rozlišuje se dokonalý a nedokonalý výtok pod konstrukcí. Nedokonalý výtok nastává při ovlivnění výtoku dolní vodou, kdy je nutné pro protlačení stejného průtoku jako u dokonalého přepadu vyvinout větší sílu, tj. je potřeba větší spád hladin. Zpětné vzdutí dolní vody se může vytvořit nejen vlivem podmínkami pod hrází, ale i nevhodným návrhem odpadního objektu či spadiště. V opačném případě se utváří dokonalý výtok pod konstrukcí. Na výpust je mnohdy kladen požadavek, aby kapacitně převáděla maximálně neškodný průtok před zapojením bezpečnostního přelivu.

Po dosažení horní hladiny úrovně přelivné hrany se přidává přepad přes bezpečnostní přeliv. Z naměřených dat vyplývá, že kapacita výpusti je ovlivněna vzájemnou interakcí proudění výpustí a přepadu přes přeliv. Horní hladina v nádrži i hladina ve spadišti se řídí přepadem přes bezpečnostní přeliv i prouděním výpustí. Snížením spádu mezi horní hladinou a hladinou ve spadišti klesá kapacita výpusti. Popsat teoretický průběh hladiny ve sdruženém objektu není snadné vzhledem k vzájemné interakci proudů, proto se při stanovení konzumční křivky výpusti zavádí náhradní řešení. Jako optimální řešení se jeví pro výpočet konzumční křivky výpusti použít rovnici dokonalého výtoku pod konstrukcí. Zároveň se pro konzumční křivku bezpečnostního přelivu zavádí předpoklad, že se stanoví pro méně příznivý stav, kdy voda přepadá pouze přes bezpečnostní přeliv. Zvolit tento způsob náhradního řešení se jeví jako výhodné, neboť se utváří určitá bezpečnostní rezerva. Ve sdruženém objektu by proudil ve skutečnosti nižší průtok než teoretický. Ale je třeba si uvědomit, že snížením průtoku se zvýší horní hladina v nádrži.

Konzumční křivka bezpečnostního přelivu se skládá z dokonalého přepadu přes přeliv, z přechodové oblasti a ze zatopeného přepadu. Při zatopeném přepadu stoupá horní hladina v nádrži rychlejším tempem, než činí přírůstek průtoku. Kapacita je limitována průtočným profilem odpadu. Naopak při dokonalém přepadu přes přeliv není snížená kapacita přelivu. Přechodová oblast vzniká přechodem mezi dokonalým a zatopeným přepadem. Na fyzikálním modelu se dokonalý přepad utvořil při proudění o volné hladině a při tlakovém proudění v odpadní chodbě. Dokonalý přepad byl ovlivněn hladinou ve spadišti až pro vyšší průtoky při tlakovém proudění v odpadní chodbě. Zatopený přepad vzniká na modelu pouze při tlakovém proudění v odpadu. Z porovnání výpočtu s naměřenými daty vyplynulo, že se může zanedbat přítoková rychlost. Bezpečnostní přeliv se dimenzuje na dokonalý přepad přes přeliv se zanedbáním přítokové rychlosti a se zavedením účinné šířky přelivu. Kapacitu bezpečnostního přelivu je lepší dimenzovat na méně vhodný stav při neprovozuschopné výpusti. Bohužel pro nedostatek změřených dat není možné jednoznačně konstatovat, podle kterého postupu se stanoví křivka zatopeného přepadu. Bezpečnostní přeliv se navrhuje mnohdy na přepadovou výšku v rozsahu 0,3 m až 0,6 m. [29]

Z hlediska bezpečnosti je při návrhu kapacity sdruženého objektu výhodnější uvažovat i s méně příznivější variantou, kdy je zcela omezena provozuschopnost výpusti a kdy zůstává v provozu pouze bezpečnostní přeliv. Při provozu sdruženého objektu může nastat v praxi

situace úplného omezení provozuschopnosti výpusti, třeba důsledkem jejího zanesení neseným materiálem vodním tokem. Z měření na fyzikálním modelu vyplynulo, že při neprovozuschopné výpusti vzniká v nádrži vyšší horní hladina a že se snižuje kapacitu spadiště i odpadní chodby. Z měření na fyzikálním modelu dále vyplynulo, že proud výpustí dodává impuls proudění ve spadišti. Proudění výpustí disponuje dostatkem energie k vyvinutí síly na odtlačení akumulované vody ve spadišti dále po proudu, a tak pomáhá urychlovat odtok ze spadiště. Proto je též výhodné mimo jiné výpust hydraulicky i technicky příhodně navrhnout, neopomenout její údržbu při provozu nebo zvolit vhodná opatření na ochrnu vtoku. Na lepší nahrnout taková opatření, jež zabrání zanesení nebo ucpání výpusti, ale zároveň samy nezpůsobí omezení provozuschopnosti výpusti. Například při nevhodném návrhu česlí se mohou samy česle zanést unášeným materiálem vodním tokem, a tak částečně nebo zcela omezit vtok výpusti.



Legenda
1 proudění výpustí
2 dokonalý přepad přes přeliv, proudění výpustí
3 přechodová oblast přepadu přes přeliv, proudění výpustí
4 zatopený přepad přes přeliv, proudění výpustí
5 proudění výpustí – nezahlcený vtok
6 proudění výpustí – přechod
7 proudění výpustí – zahlcený vtok
8 proudění výpustí
9 proudění výpustí a přepad přes bezpečnostní přeliv

Obr. 41 – Konzumční křivka sdruženého objektu (výška otevření výpusti a = 0.06 m)

Podle mezních podmínek mechanické podobnosti činí na fyzikálním modelu minimální výška otevření výpusti hodnoty 0,06 m, aby jev výtokem nebyl ovlivněn nepříznivě drsností a povrchovým napětím. [21] Z tohoto důvodu se zvolily příslušné výšky otevření výpusti 0,1 m a 0,06 m. Pro potvrzení nebo vyvrácení teze o zrychlení odtoku ze spadiště se provedlo dodatečně pár hrubých měření pro výšku otevření výpusti 0,04 m. Proudění výpustí disponuje energií k odtlačení masy vody dále po proudu do menší vzdálenosti. Při snížení výšky otevření výpusti se sice zmírní vliv proudění výpustí, ale stále napomáhá zrychlování odtoku ze spadiště. V porovnání s rozměry odpadní chodby, se zvolená výška otevření výpusti 0,1 m, v praxi spíše pro rozměry výpusti neuplatní. Proto se dodatečně zavedla i výška otevření výpusti 0,06 m. Měření pro výšku otevření 0,1 m může částečně připomínat stav pro převedení vody za stavby sdruženým objektem.

Kapacitu spadiště i kapacitu odpadní chodby je výhodnější navrhnout na méně příznivý stav, kdy je v provozu pouze bezpečnostní přeliv. Kapacita spadiště se volí tak, aby nebyl ovlivněn přepad přes přeliv, tj. vznikl dokonalý přepad přes přeliv. Průběh hladiny ve spadišti se spíše stanoví postupem založeným na větě o hybnosti, například postupem Ven te Chow (vztah 1.20), než postupem energetické bilance z důvodu, že se ve spadišti vytváří prostorové nerovnoměrné proudění. Při výpočtu se vychází z výchozího profilu na rozmezí spadiště a odpadu. Obecně vlivem charakteru proudění provzdušněného proudu (př. provzdušnění, rozložení tlaku, Coriolisovo číslo, hloubka, rychlost, hustota atd) je složitější stanovit teoretický průběh ve sdruženém objektu, tak aby korespondoval se skutečným průběhem hladiny ve sdruženém objektu. Provzdušněný proud má jiné vlastnosti než neprovzdušněný proud. Diplomová práce usuzuje, že stanovit průběh hladiny ve spadišti vztahy rovnoměrného proudění není dobrou možností. Pro stanovení průběhu hladiny ve spadišti při souběžném proudění výpustí a přepadu přes bezpečnostní přeliv není možné uvedené postupy věty o hybnosti a energetické bilance daným způsobem zcela aplikovat. Proudění výpustí dodává impuls proudění ve spadišti a zároveň se ve spadišti utváří vzájemná interakce obou proudění. Z důvodu nulového sklonu dna nebylo možné vyzkoušet postup Komorova. Stanovit průběh hladiny ve spadišti po zahlcení vtoku odpadní chodby není snadné, diplomová práce nestanovila výpočetní postupy.

Ve společné odpadní chodbě nesmí nastat tlakový režim proudění, tj. voda musí proudit o volné hladině. Při tlakovém proudění vznikají negativní účinky na konstrukci sdruženého objektu i jeho blízké okolí. Mezi hladinou a stropem uzavřeného odpadu musí být volný prostor minimálně 0,5 m. [28] V odpadní chodbě vzniká nerovnoměrné proudění o volné hladině. Průběh hladiny v odpadní chodbě se stanoví spíše postupy pro nerovnoměrné proudění v otevřeném korytě. Pokud by nevznikaly místní ztráty a pokud by se vyjádřily ztráty tření Manningovou rovnicí, může se aplikovat i postup založený na větě o hybnosti. V typizační směrnici se uvádí, že hloubka ve skluzu by se měla pohybovat v rozmezí od kritické hloubky až po hloubku rovnoměrného proudění. [12] Vlivem nulového sklonu dna na fyzikálním modelu nebylo možné vyzkoušet postup pro rovnoměrné proudění v odpadní chodbě.

Při návrhu sdruženého objektu by se neměly opomenout ani podmínky pod hrází vodního díla. Podmínkami pod hrází se rozumí způsob řešení i návrh prvků pro tlumení

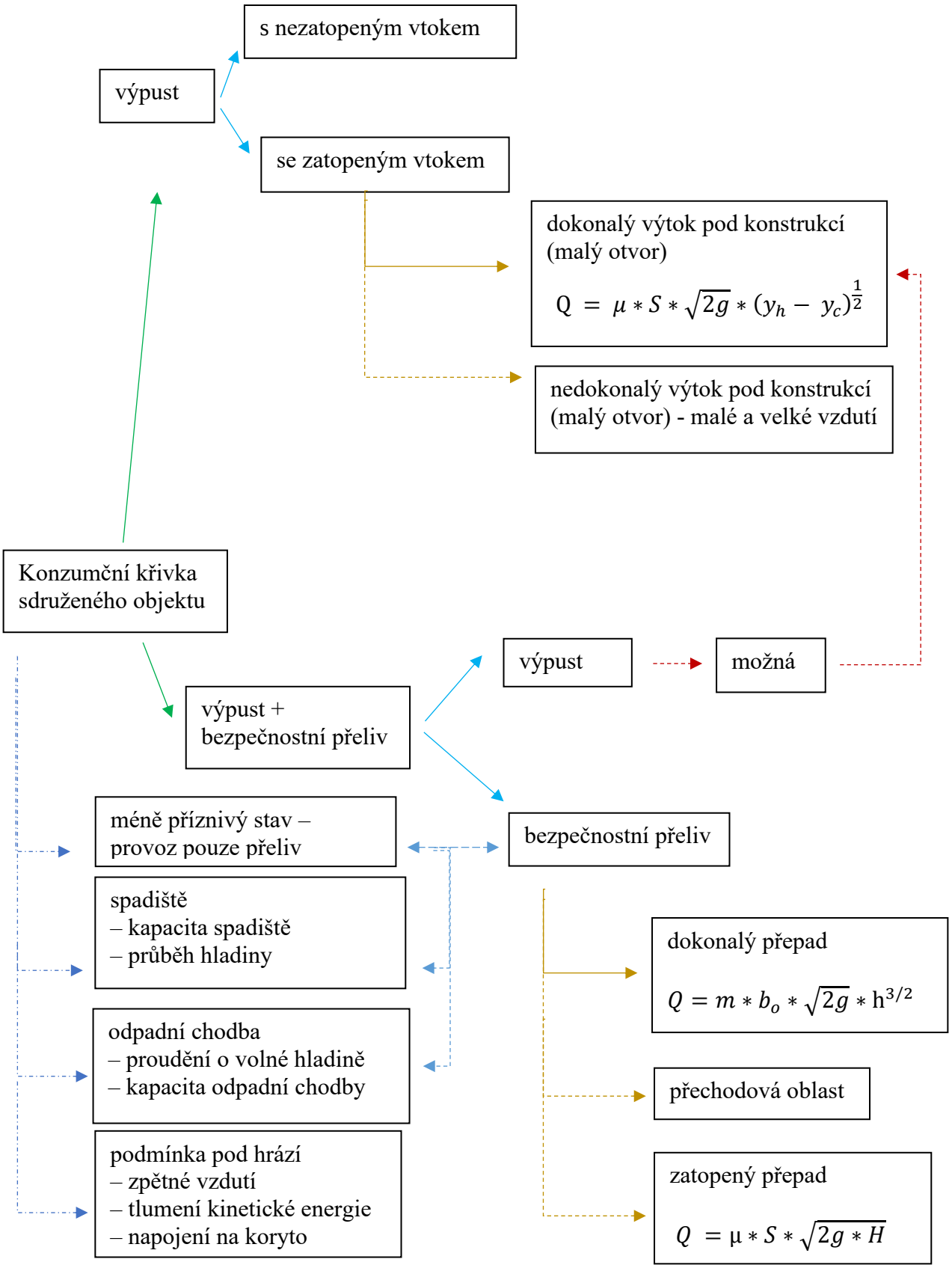
kinetické energie (vývar, zdrsněné koryto atd.) a prvků pro napojení na koryto. Zpětné vzdutí dolní vody má vliv na proudění sdruženým objektem. Diplomová práce nemůže zcela identifikovat míru ovlivnění s ohledem na nedostatečné proměření dat pro dolní okrajovou podmínku rovnou hloubce dolní vody, s ohledem na nulový sklon dna a s ohledem na zkrácenou délku odpadní chodby. Dolní okrajová podmínka rovna kritické hloubce $y = y_k$ simuluje sice takové podmínky na výtoku pod hrází, kdy není proudění ve sdruženém objektu ovlivněno zpětným vzdutím dolní vody a na fyzikálním modelu se pak může teoreticky utvořit kritická hloubka. Ale návrh nulového sklonu dna ovlivňuje svým způsobem průběh hladiny na modelu sdruženého objektu, kdy zvyšuje hloubku vody ve sdruženém objektu. Například pro experiment „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“ se utváří v odpadní chodbě převážně říční režim proudění. Pokud by se v tomto případě sklon dna navýšil tak, aby v odpadní chodbě byl bystřinný režim proudění a ve spadišti říční režim proudění, pak by do jisté míry pomohl nenulový sklon dna lépe vodě odtékat. Zároveň by v tomto případě se projevil asi jinak i vliv zpětného vzdutí dolní vody.

Při návrhu dílčích částí sdruženého objektu je nutné splnit různé požadavky, kterou jsou na funkční zařízení kladeny. Obecně se upřednostňují konstrukce bezobslužné s jednoduchou obsluhou. V odborné literatuře se naleznou doporučení pro návrh sdružených objektů, například v typizační směrnici *Navrhování sdružených objektů zemních hrází do výšky 15 m* [12]. Uvádí se zde například, aby se světlý vstupní profil na rozmezí spadiště a skluzu (odpadní chodby) rovnal minimálně 1,8 násobku kritické hloubky pro sdružený objekt se žlabovým přelivem nebo aby na rozmezí spadiště a odpadu navrhl zúžený profil o specifických rozměrů pro sdružený objekt se šachtovým přelivem. [12]

Při přepadu přes přeliv, dopadu do spadiště a prouděním ve spadišti se voda provzdušňuje. Provzdušněné proudění má jiné vlastnosti než neprovzdušněné proudění. Při zatopeném přepadu se míra provzdušnění na modelu radikálně snižuje. Míra provzdušnění by se lišila pro skutečné vodní dílo. Ve spadišti se utváří nerovnoměrný průběh hladiny v příčném i v podélném směru. Příčné zakřivení hladiny způsobuje přepadající voda, jež má tendenci odtlačovat vodu ke stěnám spadiště za podmínky, že disponuje dostatkem energie nebo není její vliv omezen hloubkou ve spadišti. Při souběžné činnosti obou funkčních zařízení taktéž přepadající paprsky ovlivňují proud výpustí, čímž zvyšují hladinu u stěny spadiště.

S vývojem technologie se dnes nabízejí i nové možnosti v oblasti modelování. Na trhu jsou k dispozici prostředky ke zkoumání jevů matematickým modelováním, například pomocí programů Hecras nebo Ansys. Je tedy otázkou, zdali by nebylo zajímavé posoudit proudění ve sdruženém objektu i matematickým modelováním. Pro složitější sdružené objekty je výhodné ověřit proudění ve funkčním objektu mnohdy na fyzikálním modelu. Obrázek 42 zobrazuje některé informace, co by se při návrhu funkčního objektu mohly uvažovat.

Pro veškeré výpočty používala diplomová práce převážně tabulkový procesor Microsoft Excel, ale pro některé výpočty se aplikoval i program Matlab. Diplomová práce dále aplikovala pro některé menší výpočty i program Hecras (1D). Tabulkový procesor Microsoft Excel se zvolil jako dominantní výpočetní program, aby bylo možné vidět do jádra výpočetních postupů a vyzkoušet různé kombinace změn.



Obr. 42 – Schéma konzumční křivky sdruženého objektu

5. Závěr

V praxi se u malých vodních nádrží i suchých nádrží používá funkční objekt typu sdružený objekt. Sdružený objekt slučuje minimálně dvě různá funkční zařízení, obvykle bezpečnostní přeliv a výpustné zařízení (výpust). Ve srovnání s návrhem samostatných oddělených funkčních objektů je sloučení odlišných funkčních zařízení do jednoho sdruženého objektu někdy výhodnější, ať už z pohledu provozního, technického nebo ekonomického. [1] [2] Použití tohoto typu funkčního objektu má své výhody i nevýhody. Podle konstrukčního uspořádání se dělí sdružené objekty do tří větších skupin. Příkladem vodního díla vybaveného funkčním objektem typu sdružený objekt je třeba suchá nádrž Čihadlo, suchá nádrž Jelení nebo malá vodní nádrž Neškaredice.

Diplomová práce se snažila analyzovat hydraulické řešení sdruženého objektu pomocí experimentálních dat získaných měřením na fyzikálním modelu a doporučit některé výpočetní postupy do inženýrské praxe s ohledem na limity měření na modelu. Fyzikální model představuje jednopatrový sdružený objekt se žlabovým bezpečnostním přelivem oboustranného nátoku, s výpustí vyústěnou v čelní stěně přelivu a s uzavřeným profilem odpadu. Fyzikální model byl umístěn ve vodohospodářské hale Fakulty stavební ČVUT v Praze. Při proudění sdruženým objektem proudí voda nejdříve výpustí ve směru odtékající vody. Pro tento stav je mnohdy podmínkou, aby před dosažením horní úrovně přelivné hrany výpust převáděla maximálně neškodný průtok. Po dosažení horní hladiny úrovně přelivné hrany se přidává přepad přes bezpečnostní přeliv. Přepadající voda přes přeliv mění ve spadišti směr proudění. Ve společném spadišti vzniká interakce dvou směru proudění – proudu výpusti i přepadu přes bezpečnostní přeliv. Voda odtéká ze společného spadiště společným odpadem. Kapacita sdruženého objektu je dána nejen kapacitou bezpečnostního přelivu a výpusti, ale i kapacitou spadiště, kapacitou odpadu a podmínkami pod hrází. Při návrhu dílčích částí sdruženého objektu je nutné splnit různé požadavky, kterou jsou na funkční zařízení kladeny. Obecně se upřednostňují konstrukce bezobslužné s jednoduchou obsluhou.

Z hlediska bezpečnosti je při návrhu kapacity sdruženého objektu výhodnější uvažovat i s méně příznivější variantou, kdy je zcela omezena provozuschopnost výpusti a kdy zůstává v provozu pouze bezpečnostní přeliv. Při provozu sdruženého objektu může nastat v praxi situace úplného omezení provozuschopnosti výpusti, třeba důsledkem jejího zanesení neseným materiálem vodním tokem. Z měření na fyzikálním modelu vyplynulo, že proudění výpustí dodává impuls proudění ve spadišti. Zanedbáním proudění výpustí se vytváří menší bezpečnostní rezerva.

Konzumční křivku sdruženého objektu tvoří před dosažením horní hladiny v nádrži úrovně přelivné hrany konzumční křivka výpusti. Konzumční křivka výpusti se skládá z křivky pro nezahlcený vtok výpusti a pro zahlcený vtok výpusti. Mezi nezahlceným vtokem a zahlceným vtokem výpusti lze očekávat přechodovou oblast. Usuzuje se, že pro zahlcený vtok výpusti se konzumční křivka stanoví dokonalým výtokem pod konstrukcí. Na výpust je mnohdy kladen požadavek, aby převáděla maximálně neškodný průtok před dosažením horní hladiny úrovně přelivné hrany.

Po dosažení horní hladiny v nádrži úrovně přelivné hrany se konzumční křivka sdruženého objektu skládá z kombinace konzumční křivky vypustí a konzumční křivky bezpečnostního přelivu. S ohledem na vzájemnou interakci proudění výpustí a přepadem přes bezpečnostní přeliv není snadné stanovit průběh hladiny ve sdruženém objektu i jeho kapacitu, proto se při stanovení konzumční křivky sdruženého objektu zavádí „náhradní řešení“.

Kapacitu bezpečnostního přelivu je lepší navrhnout na méně příznivý stav, kde je v provozu pouze přeliv. Bezpečnostní přeliv se navrhuje na dokonalý přepad přes přeliv se zanedbáním přítokové rychlosti se zavedením účinné šířky přelivu. Při přepadu přes bezpečnostní přeliv se utváří dokonalý přepad, přechodová oblast a zatopený přepad. Při návrhu se upřednostňuje bezobslužný nehrazený bezpečnostní přeliv.

Kapacitu spadiště a kapacitu odpadní chodby je výhodnější taktéž navrhnout na méně příznivý stav, kdy je v provozu pouze bezpečnostní přeliv. Při návrhu spadiště se musí brát ohled na to, aby hladina ve spadišti nelimitovala přepad přes přeliv. Průběh hladiny ve spadišti se při nezahlceném vtoku odpadní chodby stanoví spíše postupem věty o hybnosti než postupem energetické bilance. Při zahlceném odpadu bylo nesnadné postup jednoznačně stanovit. Pro souběžný provoz výpustí a přepadu přes přeliv není možné metodu zcela aplikovat. Odpadní chodba se mnohdy řeší formou rámové propusti (Benešovy rámy). Kapacita odpadní chodby by měla být taková, aby nevznikalo tlakové proudění. Průběh hladiny v odpadní chodbě se stanoví metodami nerovnoměrného proudění. Avšak není vyloučené za určitých předpokladů použití i postup věty o hybnosti. Při návrhu by se nemělo ani opomenout řešení podmínek pod hrází, aby došlo k tlumení kinetické energie a aby se vyvarovalo vlivu zpětného vzdutí dolní vody. Zpětné vzdutí dolní vody ovlivňuje průběh hladiny ve sdruženém objektu. Na fyzikálním modelu se při přepadu přes přeliv, dopadu do spadiště a prouděním ve spadišti se voda provzdušňuje. Provzdušněné proudění má jiné vlastnosti než neprovzdušněné proudění. Při zatopeném přepadu se míra provzdušnění na modelu snižuje radikálně. Ve spadišti se utváří nerovnoměrný průběh hladiny v příčném i v podélném směru.

Při vypracování diplomové práci se objevily určité nejasnosti i další zajímavosti, jež by bylo zajímavé dále prozkoumat. Pozoruhodné by bylo stanovit, co by se stalo, kdyby například se snížila přelivná hrana bezpečnostního přelivu, kdyby se uvažoval nikoliv uzavřený leč otevřený odpad, kdyby nevznikalo tlakové proudění v odpadní chodbě a jiné. S vývojem technologie se dnes nabízejí i nové možnosti v oblasti matematického modelování. Na trhu jsou k dispozici prostředky ke zkoumání jevů matematickým modelováním, například pomocí programů Hecras nebo Ansys. Další zajímavostí by bylo zjistit, jak moc lze namodelovat proudění ve sdruženém objektu pomocí matematického modelování.

6. Literatura

[1] ŠÁLEK, Jan. *Rybníky a účelové nádrže*. Brno: VUTIUM, 2001. ISBN 80-214-1806-0.

[2] *ČSN 75 0120: Vodní hospodářství - Terminologie hydrotechniky*. Červen 2009.

[3] *ČSN 75 2410 Malé vodní nádrže*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Duben 2011.

[4] PATERA, Adolf, Karel NACHÁZEL a Pavel FOŠUMPAUR. Nádrže a vodohospodářské soustavy 10. Praha: ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02620-5.

[5] ŘÍHA, Jaromír. *Návrh a realizace suchých nádrží z pohledu technickobezpečnostního dohledu*. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2014. ISBN 978-807-2126-002.

[6] *TNV 75 2415: Suché nádrže*. Leden 2013.

[7] PPO Klapovský potok – POLDR. In: *OŘ Vysočina - Lesy ČR* [online]. Copyright ©Lesy ČR, 2022 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: https://orvysocina.lesycr.cz/wp-content/uploads/2021/03/klapovsky-02.jpg

[8] ZESLAKO2. Suchý poldr Jelení z návodní strany. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 26. dubna 2020, 11:09:42 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Such%C3%BD_poldr_Jelen%C3%AD.jpg

[9] Metodický pokyn odboru ochrany vod M˘6P pro navrhování, výstavbu a provoz suchých nádrží. Věštník MŽP. 7/2001. Ročník Xi. částka 7. Dostupné z:

https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/CF6AF96A14B04BEEC1256FC800389BA1/$file/01.pdf

nebo

https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/e75c7074f3a42826c1256b0100778c9a/cf6af96a14b04beec1256fc800389ba1?OpenDocument

[10] BROŽA, Vojtěch. *Přehrady*. Praha: Nakladatelství techn. lit., 1987.

[11] VRÁNA, Karel a Jan BERAN. *Rybníky a účelové nádrže*. Vyd. 3. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-800-1040-027.

[12] *Navrhování sdružených objektů zemních hrází do výšky 15 m: Typizační směrnice stavebního objektu*. Hydroprojekt Praha, OZ Brno, 1981.

[13] VÁCLAVÍK, Vojtěch. *Účelové vodohospodářské nádrže: učební texty*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2007. ISBN 978-802-4813-363.

[14] *ČSN 75 2340: Navrhování přehrad - Hlavní parametry a vybavení*. Září 2017.

[15] ŠÁLEK, Jan, Anna TRESOVÁ a Zdeněk MIKA. *Rybníky a účelové nádrže: celostátní vysokoškolská učebnice pro stavební fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 80-030-0092-0.

[16] PPO Březinka – POLDR. In: *OR Vysočina - Lesy ČR* [online]. Copyright © 2022 Lesy ČR. [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: https://orvysocina.lesycr.cz/wp-content/uploads/2021/03/brezinka-02.jpg

[17] BROŽA, Vojtěch. Nádrže, jezy a přehrady. Praha: SNTL, 1967.

[18] VRÁTIL, Jan. *POSOUZENÍ VODNÍHO DÍLA ROUCHOVANY ZA POVODNÍ*. BRNO, 2019. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ - Fakulta stavební. Vedoucí práce Doc. Ing. JAN JANDORA, Ph.D. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=194454.

[19] FOŠUMPAUR Pavel, Tomáš KAŠPAR, Martin KRÁLÍK, Milan ZUKAL, Petr HOLÝ a Pavel ŘEHÁK. Příprava suché retenční nádrže Mělčany. In: *Vodohospodársky spravodajca: dvojmesačník pre vodné hospodárstvo a životné prostredie*. Banská Bystrica: Združenie zamestnávateľov vo vodnom hospodárstve na Slovensku, január 2019. ISSN 0322-886X.

[20] Sweco Hydroprojekt, a.s.: Dědina, Mělčany, suchá retenční nádrž. Dokumentace k územnímu rozhodnutí. Praha 10/2017.

[21] ČÁBELKA, Jaroslav. Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice. 1. Výzkum na hydraulických modelech a ve skutečnosti. Praha: Academia, 1987.

[22] Chyba měření. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Chyba_m%C4%9B%C5%99en%C3%AD

[23] VRÁNA, Karel. *Rybníky a účelové nádrže: příklady*. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1991. ISBN 80-010-0656-5.

[24] KOLÁŘ, Václav, Cyril PATOČKA a Jiří BÉM. Hydraulika. Praha: SNTL, 1983.

[25] BOOR, Boris, Cyril PATOČKA a Jiří KUNŠTÁTSKÝ. *Hydraulika pro vodohospodářské stavby: celost. učebnice pro vys. školy*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1968. Řada stavební literatury.

[26] HAVLÍK, Vladimír a Ivana MAREŠOVÁ. *Hydraulika: příklady*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-010-1586-6.

[27] MATOUŠEK, Václav. *Výtok otvorem – aplikace pro stavidlo a plavební komoru (přednáška š. 10)*. Hydraulika 3 Praha: České vysoké učení technické, Fakulta stavební, Katedra hydrauliky a hydrologie. [cit. 6.5.2022]

[28] *Vyhláška č. 590/2002 Sb.: Vyhláška o technických požadavcích pro vodní díla*. účinnost leden 2003. Dostupné také z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2002-590

[29] DOLEŽAL, Petr. *Malé vodní a suché nádrže: TP 1.19 : technická pomůcka k činnosti autorizovaných osob*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě vydává Informační centrum ČKAIT, 2011. ISBN 978-808-6364-162.

[30] MATOUŠEK, Václav. *Pohyb reálné kapaliny : Matematické modelování a Navier-Stokesova rovnice (přednáška)*. Hydraulika 3 Praha: České vysoké učení technické, Fakulta stavební, Katedra hydrauliky a hydrologie. [cit. 6.5.2022]

[31] CHOW, Ven Te. *Open-channel hydraulics*. Caldwell: Blackburn Press, [1959]. ISBN 19-328-4618-2.

[32] KRATOCHVÍL, Jiří, Miloš JANDA a Vlastimil STARA. *Projektování přehrad: komplexní projekt HT: komplexní projekt HT*. Brno: Ediční středisko Vysokého učení technického, 1988. Dostupné také z:

http://techlib.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwY2AwNtIz0EUrE5JMUpJTgZVtcmKKWSowytMSk80MkpJMQOevJVomg0YKfH2NAkJNXYIt_aCn5oC2xkDOQ9UDnWcKXjJdhbQBwcDM0tTUmJmB2dgMlJzdnUAbcaAqkeoIN0EGFtC-ASEGpuRiYQZupHP-RBjEA0DjHdkl-WWHF-YdXqtQcHRmakZRYooog4Kba4izhy7UvHjoYEo83F4jMQYWYAc9VYJBIS3NICktEZgTEoHtHzNDi6SUFHNgzklLSbYwMk5ONJFkkMRpjBQeOWkGLkNLCwtIh1-GgTUNmCBTZeF-lAP7GQCpZWVW

[33] Novak, P., et al. *Hydraulic Structures*, Taylor & Francis Group, 2007. *ProQuest Ebook Central*, https://ebookcentral.proquest.com/lib/techlibebooks/detail.action?docID=292866.

[34] KUNŠTÁTSKÝ, Jiří. *Hydraulické výpočty propustků a mostů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956.

7. Seznam

7.1 Seznam příloh

Příloha 1 – Fyzikální model sdruženého objektu

Příloha 2 – Experiment bezpečností přeliv se zavřenou výpustí

Příloha 3 – Experiment bezpečností přeliv s otevřenou výpustí

Příloha 4 – Základní hydraulické rovnice

Příloha 5 – Doplňkové výpočty

Příloha 6 – Doplňkové výpočty

7.2 Seznam obrázků, tabulek a grafů

7.2.1 Seznam obrázků

Obr. 1 – Suchá nádrž typu malé vodní nádrže – Suchá nádrž na Klapovském potoce [7] (pozn. obrázek zmenšen)..... 15
Obr. 2 – Suchá nádrž typu přehrady – Suchá nádrž Jelení [8] (pozn. obrázek zmenšen)..... 16
Obr. 3 – Přímý trubní bezpečnostní přeliv [13, p. 59] a ukázka polohy přelivu s vyznačeným směrem proudění..... 18
Obr. 4 – Boční bezpečnostní přeliv [13, p. 59]..... 18
Obr. 5 – Schéma sdruženého objektu se šachtovým bezpečnostním přelivem, výpustí a odběrem [1, p. 45]..... 18
Obr. 6 – Kašnový bezpečnostní přeliv [1, p. 45]..... 18
Obr. 7 – Kašnový bezpečnostní přeliv a kombinovaný bezpečnostní přeliv (kašnový bezpečnostní přeliv, výpust) [13, p. 61]..... 19
Obr. 8 – Otevřená výpust se stavidlovým uzávěrem u malé vodní nádrže se stálým nadržením a s nižší výškou hráze [15, p. 90] (pozn. dopsáno sousloví přívodní koryto)..... 20
Obr. 9 – Výpust s ponořeným vtokovým objektem u suché nádrže Březinka [16] (pozn. obrázek zmenšen)..... 21
Obr. 10 – Podélný řez výpustí suché nádrže s ponořených vtokovým objektem [5, pp. 33 - část a)]..... 21
Obr. 11 – Podélný řez výpustí malé vodní nádrže se stálým nadržením s uzávěrem a s odběrem na vzdušní straně hráze [1, p. 39]..... 21
Obr. 12 – Podélný řez výpusti suché nádrže se spodní výpustí s věžovým vtokovým objektem a pohled na věžový vtokový objekt [5, p. 33]..... 22
Obr. 13 – Trubní výpust se šoupátkovým uzávěrem [13, p. 47]..... 22
Obr. 14 – Podélný řez výpusti suché nádrže s požerákovým vtokovým objektem a pohled do šachty požeráku [5, p. 35]..... 22
Obr. 15 – Suchá nádrž Vlastislav – jednopatrový sdružený objekt s bezpečnostním přelivem, s výpustí zaústěnou do čelní stěny a s uzavřeným odpadem od přelivu (autor Ing. P. Balvín, Phd.)..... 24
Obr. 16 – Suchá nádrž Vlatislav – pohled na výpust sdruženého objektu a pohled odpadní chodbu směrem do spadiště (autor Ing. P. Balvín, Phd.)..... 24

Obr. 17 – Suchá nádrž na Bílském potoce – jednopatrový sdružený objekt s bezpečnostním přelivem, s výpustí zaústěnou do čelní stěny a s otevřeným odpadem od přelivu (autor Veronika Táboříková) 25
Obr. 18 – Suchá nádrž na Bílském potoce – pohled na výpust sdruženého objektu a pohled skluzem (otevřeným žlabem) směrem do spadiště (autor Veronika Táboříková) . 25
Obr. 19 – Suchá nádrž Čihadlo – jednopatrový sdružený objekt se žlabovým bezpečnostním přelivem s oboustranným nátokem o více přelivných polí, s výpustí zaústěnou do čelní stěny a s uzavřeným odpadem od přelivu (autor Veronika Táboříková) 25
Obr. 20 – Schéma dvoupatrového sdruženého funkčního objektu [13, p. 63] s dodanou popiskou částí (a,b,c,d) 26
Obr. 21 – Suchá nádrž na Klapovském potoce – sdružený objekt se šachtovým přelivem (autor Ing. P. Balvín, Phd.) 26
Obr. 22 – Schéma jednopatrového sdruženého funkčního objektu se šachtovým přelivem [13, p. 63] s dodanou popiskou částí (a,b,c,d) 27
Obr. 23 – Sdružený objekt u navrhované suché nádrže Mělčany [20] 27
Obr. 24 – Schéma s popisem některých prvků fyzikálního modelu, prvků laboratorního žlabu a vybraných měřidel 29
Obr. 25 – Fyzikální model sdruženého objektu 30
Obr. 26 – Fyzikální model sdruženého objektu 31
Obr. 27 – Popis směru proudění ve sdruženém objektu při experimentu 32
Obr. 28 – Příčné zakřivení hladiny ve spadišti 33
Obr. 29 – Popis směru proudění při experimentu 39
Obr. 30 – Konzumční křivka kašnového přelivu [23, p. 75] a šachtového přelivu [24, p. 238] 48
Obr. 31 – Popis veličin pro rovnici dokonalého přepadu a zatopeného přepadu 52
Obr. 32 – Dokonalý výtok pod konstrukcí 56
Obr. 33 – Nedokonalý výtok pod stavidlem pro malé vzdutí 57
Obr. 34 – Nerovnoměrné proudění v otevřeném korytě s nulovou tlakovou výškou a s nulovým sklonem dna 58
Obr. 35 – Konzumční křivka sdruženého objektu (výška otevření výpusti a = 0.06 m) 62
Obr. 36 – Energetická bilance („modifikace metody po úsecích“) 68
Obr. 37 – Popis proměnných pro postup Ven te Chow 69
Obr. 38 – Nerovnoměrné proudění v otevřeném korytě – metoda po úsecích 70
Obr. 39 – Označení profilů pro vykreslení křivek změřených dat nebo pro výpočet 73
Obr. 40 – Popis směru proudění ve sdruženém objektu 84
Obr. 41 – Konzumční křivka sdruženého objektu (výška otevření výpusti a = 0.06 m) 86
Obr. 42 – Schéma konzumční křivky sdruženého objektu 89

Seznam obrázků v Přílohách

Obr. 43 – Popis některých prvků fyzikálního modelu, prvků laboratorního žlabu a vybraných měřidel 100
Obr. 44 – Horní přívod - přívodní potrubí se šoupaty na dvou větví, průtokoměry, uklidňovací nádoba, šoupě pro jalovou výpust 100
Obr. 45 – Pohled na žlab před modelem, na část fyzikálního modelu (výpust, bezpečnostní přeliv, spadiště) a na hrotové měřítko 101
Obr. 46 – Pohled na laboratorní žlab za fyzikálním modelem, na část fyzikálního modelu (odpadní chodba) , na měřidla (měřící metr) na skle a na odtok ze žlabu 101
Obr. 47 – Pohled na laboratorní žlab s fyzikálním modelem 102

Obr. 48 – Pohled na odpadní objekt 102
Obr. 49 – Fyzikální model zepředu (výpust, stavidlo a bezpečnostní přeliv) 102
Obr. 50 – Tlumící síto na nátoku do laboratorního žlabu, hrotové měřítko 102
Obr. 51 – Výtok z laboratorního žlabu včetně hradidel pro nastavení dolní okrajové podmínky 102
Obr. 52 - Thomsnův měrný přeliv (pro měření průtoku se nepoužíval, prostor součástí uklidňovací nádoby) 103
Obr. 53 - Řezy 103
Obr. 54 - Řezy 104
Obr. 55 - Půdorys žlabu s modelem 104
Obr. 56 - Pohled na laboratorní žlab s fyzikálním modelem 105
Obr. 57 – Pohled odpadním objektem směrem do spadiště pro průtok 12,0 l/s 106
Obr. 58 – Pohled odpadním objektem směrem do spadiště pro průtok 18,0 l/s 106
Obr. 59 – Pohled odpadním objektem směrem do spadiště pro průtok 25,5 l/s 106
Obr. 60 – Pohled na odpadní objekt ze strany pro průtok 12,0 l/s 107
Obr. 61 – Pohled na odpadní objekt ze strany pro průtok 17,5 l/s 107
Obr. 62 – Pohled na odpadní objekt ze strany pro průtok 25,5 l/s 107
Obr. 63 – Pohled na odpadní objekt ze strany pro průtok 112,0 l/s 107
Obr. 64 – Ukázka proudění v odpadním objektu (průtok 37 l/s) 108
Obr. 65 – Pohled do spadiště pro průtok 12,0 l/s 108
Obr. 66 – Pohled do spadiště pro průtok 17,5 l/s 108
Obr. 67 – Pohled do spadiště pro průtok 25,5 l/s (autor Ing. T. Kašpar, Phd.) 108
Obr. 68 – Pohled do spadiště pro průtok 69,7 l/s 109
Obr. 69 – Pohled do spadiště pro průtok cca 95 l/s 109
Obr. 70 – Pohled do spadiště pro průtok cca 112 l/s (zatopený přepad) 109
Obr. 71 – Detail na vír utvořený při obtékání čelní stěny přepadu pro zatopený přepad 109
Obr. 72 – Průběh hladiny ve spadišti pro průtok 12,0 l/s 110
Obr. 73 – Průběh hladiny ve spadišti pro průtok 17,5 l/s 110
Obr. 74 – Průběh hladiny ve spadišti pro průtok 25,5 l/s 110
Obr. 75 – Průběh hladiny ve spadišti pro průtok 39,4 l/s 111
Obr. 76 – Průběh hladiny ve spadišti pro průtok 69,7l/s 111
Obr. 77 – Průběh hladiny ve spadišti pro průtok 95,0 l/s 111
Obr. 78 – Pohled odpadním objektem směrem do spadiště (otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 12,0 l/s – pouze výpust v provozu 114
Obr. 79 – Pohled odpadním objektem směrem do spadiště (otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 17,5 l/s – výpust i přeliv v provozu 114
Ob. 80 – Pohled odpadním objektem směrem do spadiště (otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 25,5 l/s – výpust i přeliv v provozu 114
Obr. 81 – Pohled odpadním objektem směrem do spadiště (otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 40,7 l/s – výpust i přeliv v provozu 115
Obr. 82 – Pohled na odpadní objekt ze strany (výška otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 12,0 l/s – výpust v provozu 115
Obr. 83 – Pohled na odpadní objekt ze strany (výška otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 17,5 l/s – výpust i přeliv v provozu 115
Obr 84 – Pohled na odpadní objekt ze strany (výška otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 25,5 l/s – výpust i přeliv v provozu 115
Obr. 85 – Pohled na odpadní objekt ze strany (výška otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 40,7 l/s – tlakový režim proudění, výpust i přeliv v provozu 116

Obr. 86 – Pohled na odpadní objekt pro stav zatopeného přepadu (výška otevření 0,06 m) .116
Obr. 87 – Pohled do spadiště (výška otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 12,0 l/s – výpust v provozu 116
Obr. 88 – Pohled do spadiště (výška otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 17,5 l/s – výpust i přeliv v provozu 116
Obr. 89 – Pohled do spadiště s (výška otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 25,5 l/ – výpust i přeliv v provozu 117
Obr. 90 – Pohled do spadiště (výška otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 40,7 l/s – výpust i přeliv v provozu 117
Obr. 91 – Pohled do spadiště (výška otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 95,3 l/s – výpust i přeliv v provozu 117
Ob. 92 – Pohled do spadiště pro zahlcený přepad (výška otevření výpusti 0,06 m).....117
Obr. 93 – Pohled do spadiště ze shora a detail vytvořeného vírů vlivem obtékání čelní stěny spadiště pro zatopený přepad (výška otevření výpusti 0,06 m).....118
Obr. 94 – Průběh hladiny ve spadišti (výška otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 12,0 l/s – výpust v provozu (autor Ing. T. Kašpar, PhD.) 118
Obr. 95 – Průběh hladiny ve spadišti (výška otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 17,5 l/s – výpust i přeliv v provozu 118
Obr. 96 – Průběh hladiny ve spadišti (výška otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 25,5 l/s – výpust i přeliv v provozu 119
Obr. 97 – Průběh hladiny ve spadišti (výška otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 40,7 l/s – výpust i přeliv v provozu 119
Obr. 98 – Pohled na výtok z odpadu pro průtok 32,1 l/s pro dolní okrajovou podmínku y = 0,07 m (výška otevření výpusti 0,1 m) - výpust i přeliv v provozu.....119
Obr. 99 – Pohled do spadiště pro průtok 32,1 l/s pro dolní okrajovou podmínku y = 0,07 m (výška otevření výpusti 0,1 m) - výpust i přeliv v provozu.....120
Obr. 100 – Označení veličin.....125

7.2.2 Seznam grafů

Graf 1 – Průběh hladiny ve sdruženém objektu pro dolní okrajovou podmínku y = yk 36
Graf 2 – Konzumční křivka bezpečnostního přelivu (závislost horní hladiny na průtoku), závislost průtoku na hladině ve spadišti (začátek, konec), závislost průtoku na hladině v odpadní chodbě (začátek, konec) a ukázka nestability proudění ve spadišti a v odpadní chodbě (vyznačení polohy viz Graf 1).....37
Graf 3 – Závislost průběhu hladiny ve spadišti (konec) a hladiny v odpadní chodbě (začátek) na průtoku při experimentu „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“ a experiment „bezpečností s otevřenou výpustí“ (výška otevření výpusti 0,1 m a 0,06 m) – detail (označení vynesené polohy viz Graf 6) 41
Graf 4 – Konzumční křivka bezpečnostního přelivu (exp. bezpečnostní přeliv se zavřenou výpust) a konzumční křivka sdruženého objektu (exp. bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí) 42
Graf 5 – Detailní konzumční křivka bezpečnostního přelivu (exp. bezpečnostní přeliv se zavřenou výpust) a konzumční křivka sdruženého objektu (exp. bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí).....42
Graf 6 – Průběh hladiny ve sdruženém objektu (výška otevření výpusti 0,1 m) 43
Graf 7 – Průběh hladiny ve sdruženém objektu (výška otevření výpusti 0,06 m) 44

Graf 8 – Průběh hladiny ve sdruženém objektu při experimentu „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“ a při experimentu“ bezpečností s otevřenou výpustí“ (výška otevření výpusti 0,1 m a 0,06 m) – průtok 17,5 l/s 46
Graf 9 – Průběh hladiny ve sdruženém objektu při experimentu „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“ a při experimentu“ bezpečností s otevřenou výpustí“ (výška otevření výpusti 0,1 m a 0,06 m) – průtok 25,5 l/s 46
Graf 10 – Konzumční křivka bezpečnostního přelivu 53
Graf 11 – Konzumční křivka bezpečnostního přelivu (zatopený přepad) pro změřená data a pro výpočtená data..... 54
Graf 12 – Konzumční křivky výpusti (výška otevření výpusti 0,1 m) 60
Graf 13 -Konzumční křivky výpusti (výška otevření výpusti 0,06 m) 60
Graf 14 – Změřená konzumční křivka sdruženého objektu a teoreticky stanovená konzumční křivka sdruženého objektu pro možnost a), dále konzumční křivka bezpečnostního přelivu změřená a vypočtená..... 65
Graf 15 – Změřená konzumční křivka sdruženého objektu a teoreticky stanovená konzumční křivka sdruženého objektu pro možnost b), dále konzumční křivka bezpečnostního přelivu změřená a vypočtená..... 65
Graf 16 – Závilost změřené hladiny ve spadišti (konec) a v odpadu (začátek, konec) na průtoku 73
Graf 17 – Teoretický průběh hladiny ve spadišti stanovený energetickou bilancí (spadiště) a metodou po úsecích (odpadní chodba) pro různou kombinaci Coriolisova čísla, změřený průběh hladiny ve sdruženém objektu (Q = 10,0 l/s) 75
Graf 18 – Teoretický průběh hladiny ve spadišti stanovený postupem Ven te Chow (spadiště) a metodou po úsecích (odpadní chodba) pro různou kombinaci Coriolisova čísla, změřený průběh hladiny ve sdruženém objektu (Q = 10,0 l/s) 75
Graf 19 – Porovnání teoretické hladiny na začátku spadiště pro různé postupy se změřenou hladinou (pro BP, y = yk) v závislosti na průtoku 76
Graf 20 – Teoretický průběh hladiny stanovený různými postupy a změřený průběh hladiny na modelu sdruženého objektu (Q = 10 l/s)..... 76
Graf 21 – Teoretický i změřený průběh hladiny na začátku odpadní chodby (rozmezí spadiště a odpadní chodby) a doporučená hloubka hloubky spadiště dle směrnice v závislosti na průtoku..... 77
Graf 22 – Změřený průběh hladiny ve sdruženém objektu pro experiment bezpečností přeliv s otevřenou výpustí (výška otevření 0,06 m) a teoretický průběh hladiny Pozn. Pro teoretický výpočet uvažován průtok výpustí 13,23 l/s a přepadu přes přeliv 11,77 l/s. 79
Graf 23 – Závislost průtoku na teoretické hladině na konci spadiště pro různé postupy, závislost průtoku na změřené hladině ve spadiště (konec) a změřené hladině v odpadní chodbě (začátek)..... 81
Graf 24 – Závislost průtoku na teoretické hladině na konci spadiště pro různé postupy, závislost průtoku na změřené hladině ve spadiště (konec) a změřené hladině v odpadní chodbě (začátek) – detail..... 82
Graf 25 – Změřený průběh hladiny ve sdruženém objektu pro experiment bezpečností přeliv s otevřenou výpustí (výška otevření 0,06 m) a teoretický průběh hladiny..... 83
Graf 26 – Změřený průběh hladiny ve sdruženém objektu pro experiment bezpečností přeliv s otevřenou výpustí (výška otevření 0,06 m) a teoretický průběh hladiny..... 83

Seznam grafů v Přílohách

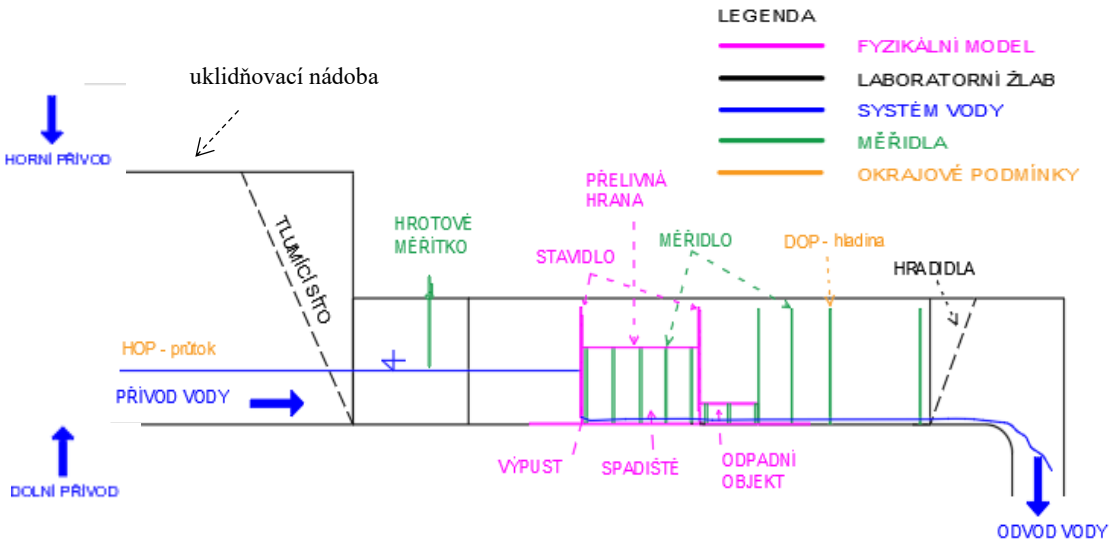
Graf 27 – Závislost hladiny ve spadišti (konec) a v odpadní chodbě (začátek) na průtoku pro experiment „bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí“ pro různou dolní okrajovou 112
Graf 28 – Průběh hladiny ve sdruženém objektu pro dolní okrajovou podmínku y = 0.07 m 113
Graf 29 – Závislost hladiny ve spadišti (konec) a v odpadní chodbě (začátek) na průtoku pro experiment „bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí“ (výška otevření výpusti 0.1 m) pro různou dolní okrajovou podmínku včetně nestability proudění (vyznačení polohy viz Graf 6)..... 120
Graf 30 – Průběh hladiny ve sdruženém objektu (výška otevření výpusti 0,1 m) – pro dolní okrajovou podmíku y = 0,07 m 121
Graf 31 – Konzumční křivka sdruženého objektu (výška otevření výpusti 0,1 m) pro rozmezí průtoku 0 l/s až 60 l/s..... 121
Graf 32 – Závislost hladiny ve spadišti (konec) a v odpadní chodbě (začátek) na průtoku pro experiment bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí a s otevřenou výpustí (výška otevření výpusti 0.1 m, 0.06 m a 0,04 m) (vyznačení polohy viz Obr. 39)..... 122
Graf 33 - Závislost hladiny ve spadišti (začátek, konec) a v odpadní chodbě (začátek, konec) na průtoku a konzumční křivka sdruženého objektu pro experiment bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí (výška otevření výpusti 0.06 m) (vyznačení polohy viz Obr. 39)..... 123
Graf 34 – Konzumční křivka výpusti pro dolní okrajovou podmínku y = 0,13 m..... 131
Graf 35 – Konzumční křivka výpusti pro dolní okrajovou podmínku y = 0,07 m..... 132
Graf 36 – Závislost změřené hladiny ve spadišti (začátek, konec) a v odpadu (začátek, konec) na průtoku 133
Graf 37 – Porovnání teoretické hladiny na začátku spadiště pro různé postupy se změřenou 135
Graf 38 – Teoretický průběh hladiny stanovený různými postupy a změřený průběh hladiny 135
Graf 39 – Teoretický i změřený průběh hladiny na začátku odpadní chodby (rozmezí spadiště a odpadní chodby) a doporučená hloubka hloubky spadiště dle směrnice v závislosti na průtoku 136

7.2.3 Seznam tabulek

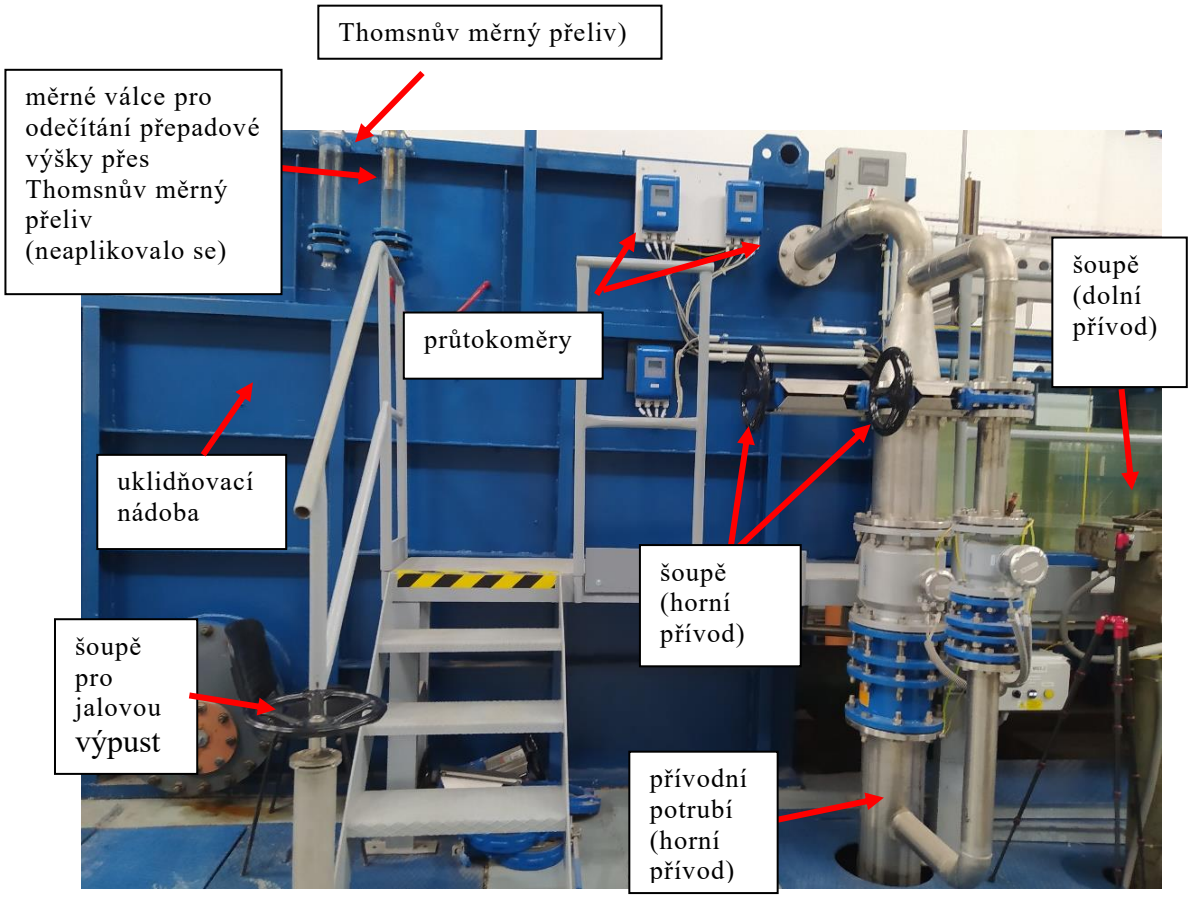
Tabulka 1 – Porovnání průtoku při experimentu „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“ („konzumční křivka bezpečnostního přelivu) a při experimentu „bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí“(„konzumční křivka sdruženého objektu“) s ohledem na úroveň horní hladiny (dolní okrjaová podmínka y = yk)..... 47
Tabulka 2 – Součinitel přepadu μ [26, p. 156] 50
Tabulka 3 – Součinitel zatopení σ [26, p. 160] 50
Tabulka 4 – Změřené hodnoty průtoku na modelu a teoretické průtoky stanovenými rovnicemi dokonalého přepadu..... 53
Tabulka 5 – Konzumční křivka možnost a) a možnost b) pro výšku otevření výpusti 0,1 m..... 63
Tabulka 6 – Konzumční křivka možnost a) a možnost b) pro výšku otevření výpusti 0,06 m.... 64

Příloha 1 – Fyzikální model sdruženého objektu

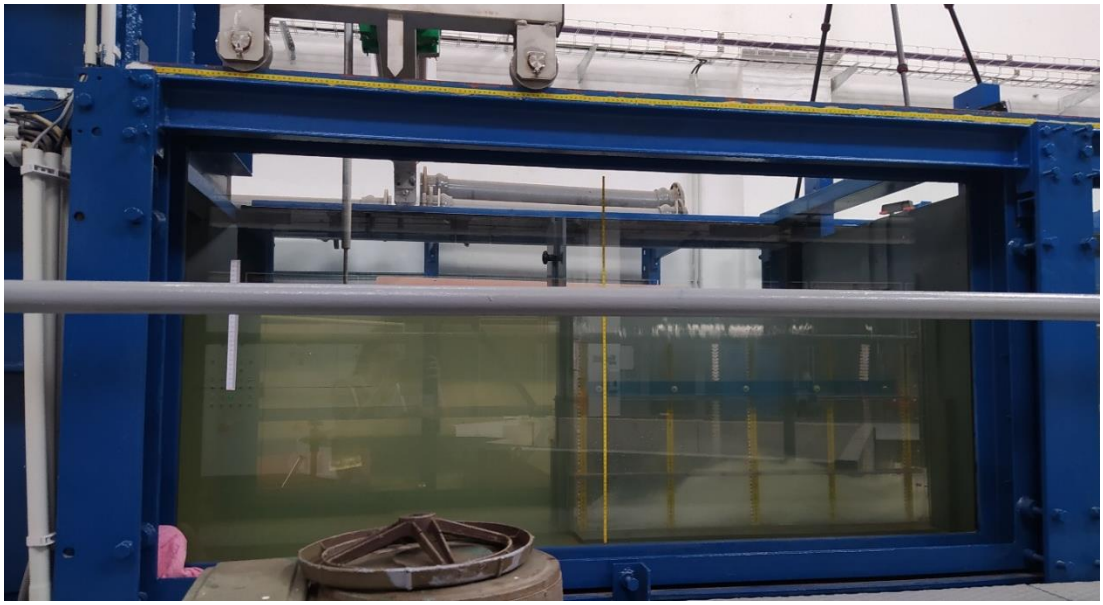
Příloha obsahuje fotodokumentaci dílčích částí fyzikálního modelu a laboratorního žlabu. Dále obsahuje výkresovou dokumentaci laboratorního žlabu s fyzikálním modelem.



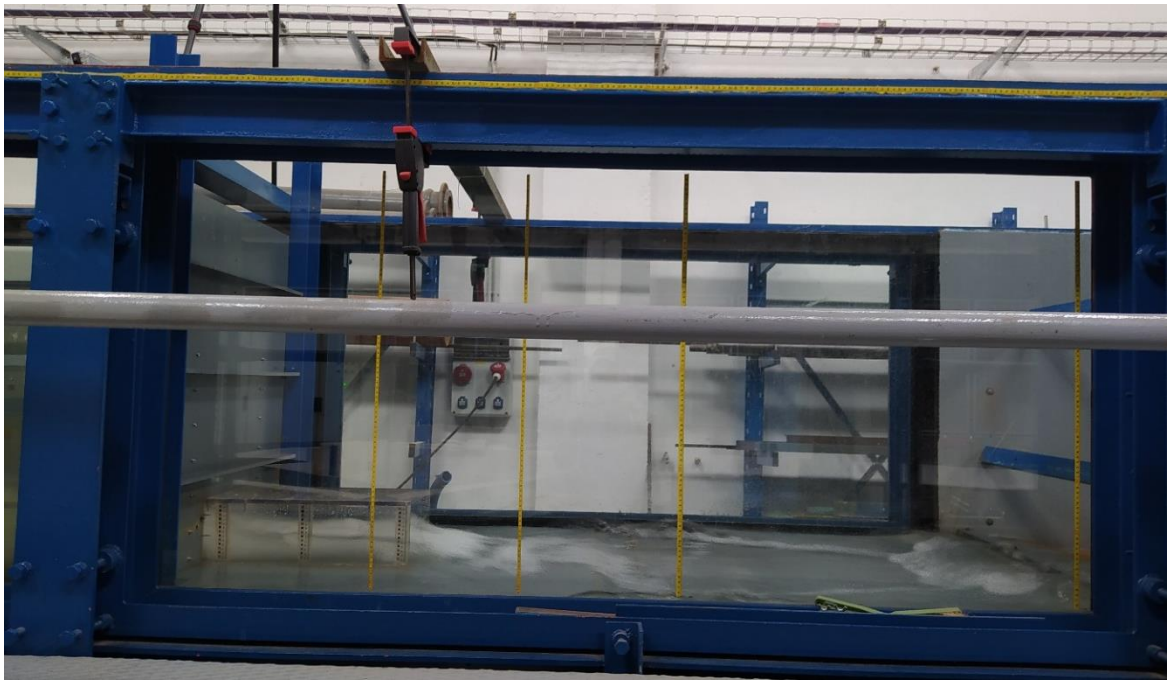
Obr. 43 – Popis některých prvků fyzikálního modelu, prvků laboratorního žlabu a vybraných měřidel



Obr. 44 – Horní přívod - přívodní potrubí se šoupaty na dvou větví, průtokoměry, uklidňovací nádoba, šoupě pro jalovou výpust



Obr. 45 – Pohled na žlab před modelem, na část fyzikálního modelu (výpust, bezpečnostní přeliv, spadiště) a na hrotové měřítko



Obr. 46 – Pohled na laboratorní žlab za fyzikálním modelem, na část fyzikálního modelu (odpadní chodba) , na měřidla (měřící metr) na skle a na odtok ze žlabu

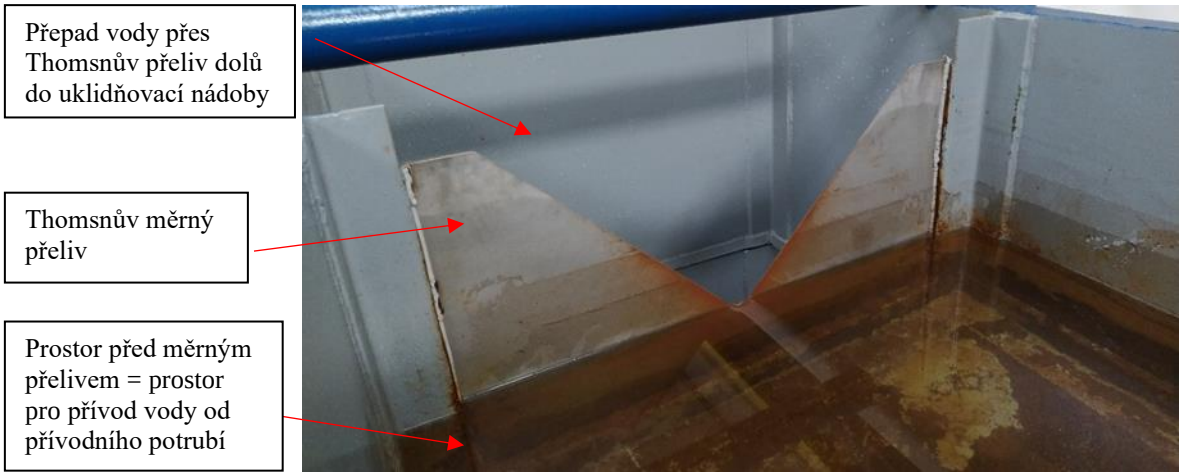
Obr. 47 – Pohled na laboratorní žlab s fyzikálním modelem

Obr. 49 – Fyzikální model zepředu (výpust, stavidlo a bezpečnostní přeliv)

Obr. 48 – Pohled na odpadní objekt

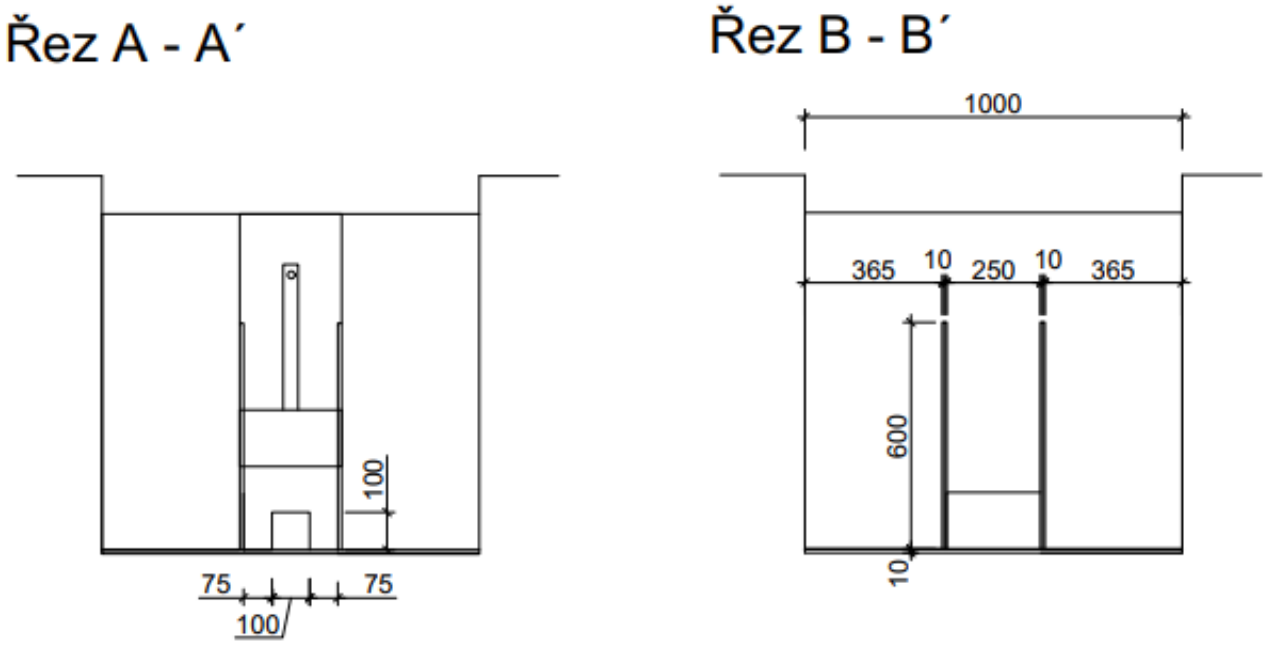
Obr. 50 – Tlumící síto na nátoku do laboratorního žlabu, hrotové měřítko

Obr. 51 – Výtok z laboratorního žlabu včetně hradidel pro nastavení dolní okrajové podmínky

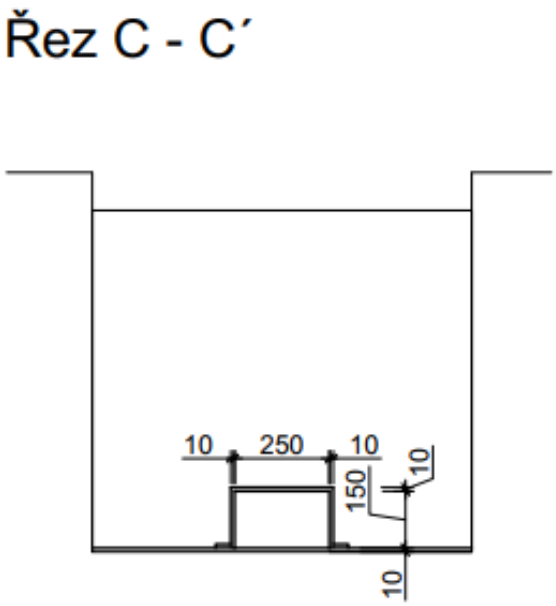


Obr. 52 - Thomsnův měrný přeliv (pro měření průtoku se nepoužíval, prostor součástí uklidňovací nádoby)

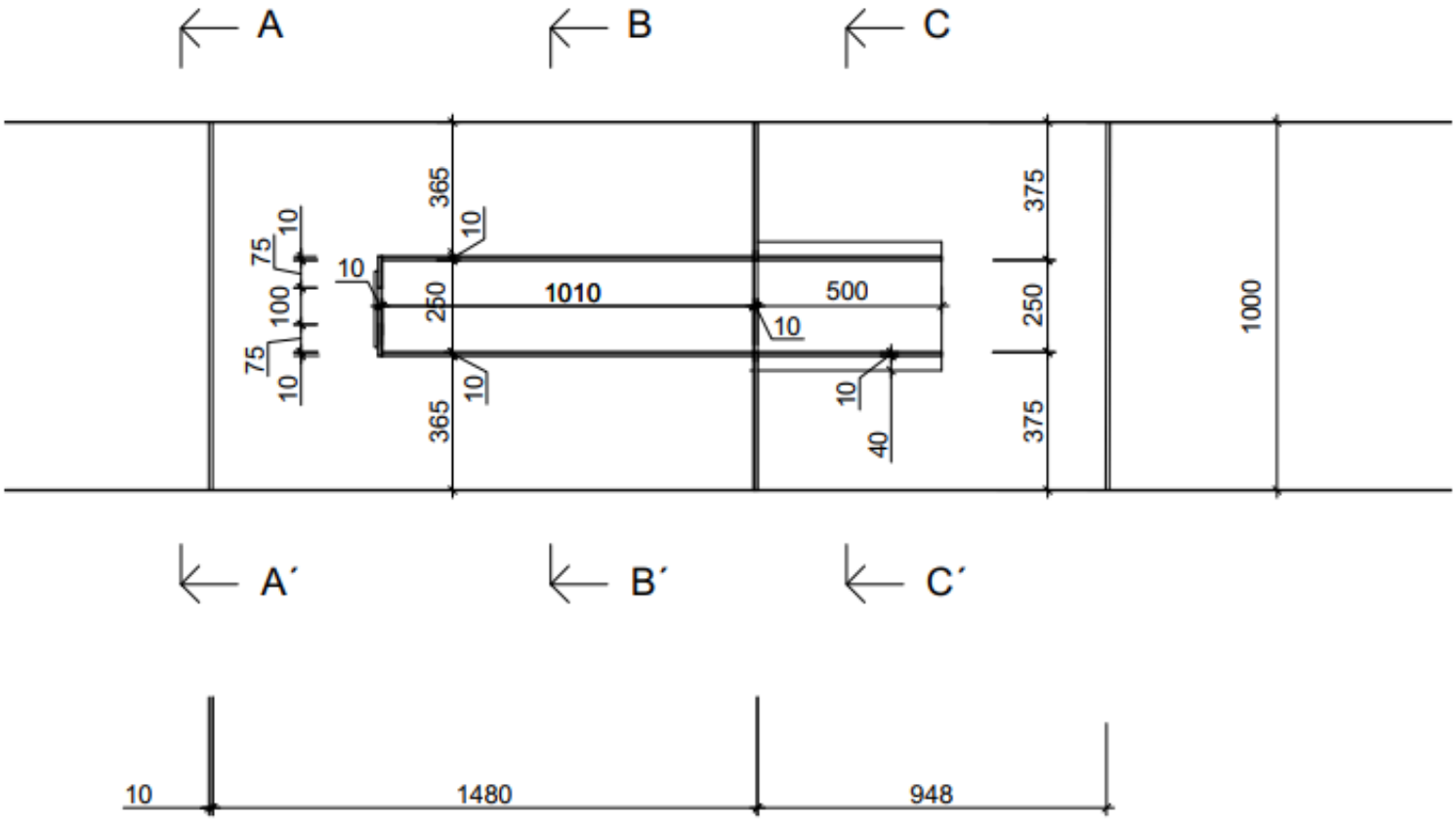
Následující obrázky zobrazují rozměry laboratorního žlabu s fyzikálním modelem – půdorys (měřítko 1:20), řezy (měřítko 1:20) a pohled na laboratorní žlab s modelem (měřítko 1:30).



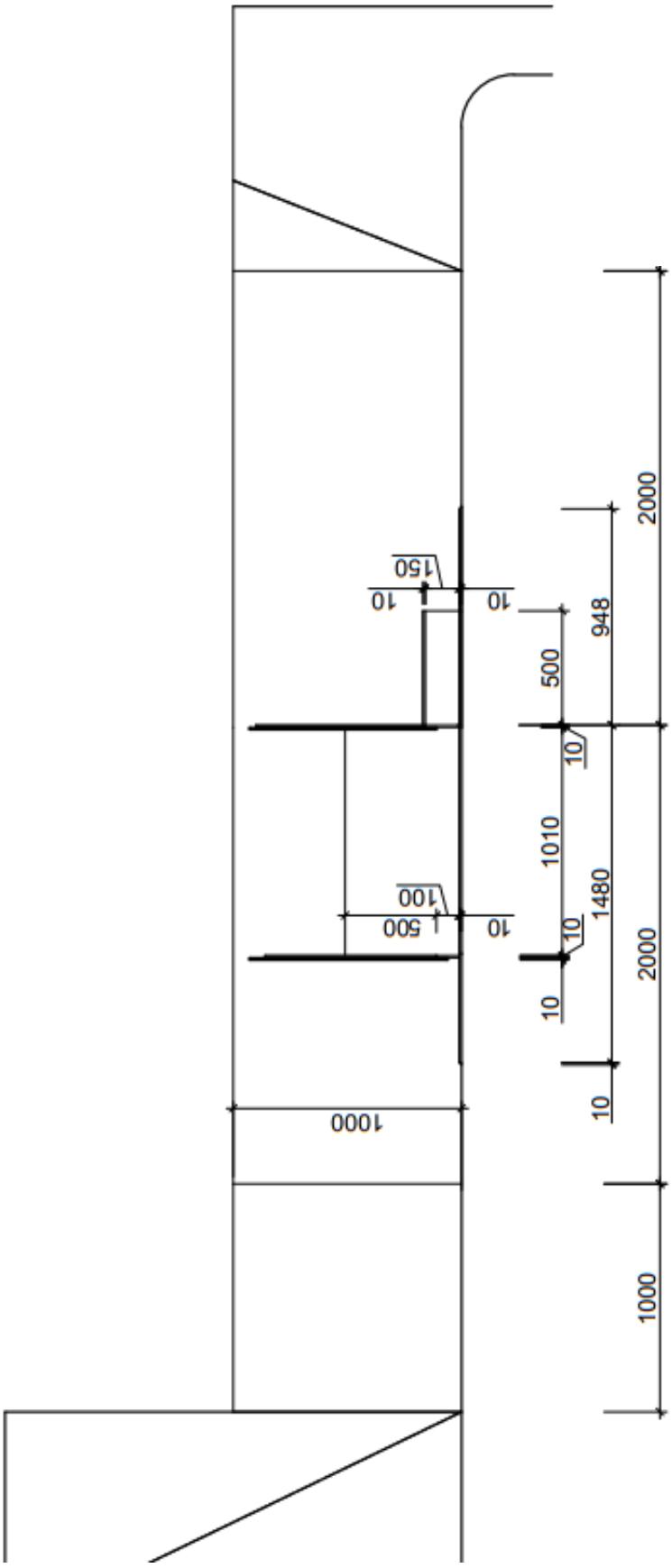
Obr. 53 - Řezy



Obr. 54 - Řezy



Obr. 55 - Půdorys žlabu s modelem



Obr. 56 - Pohled na laboratorní žlab s fyzikálním modelem

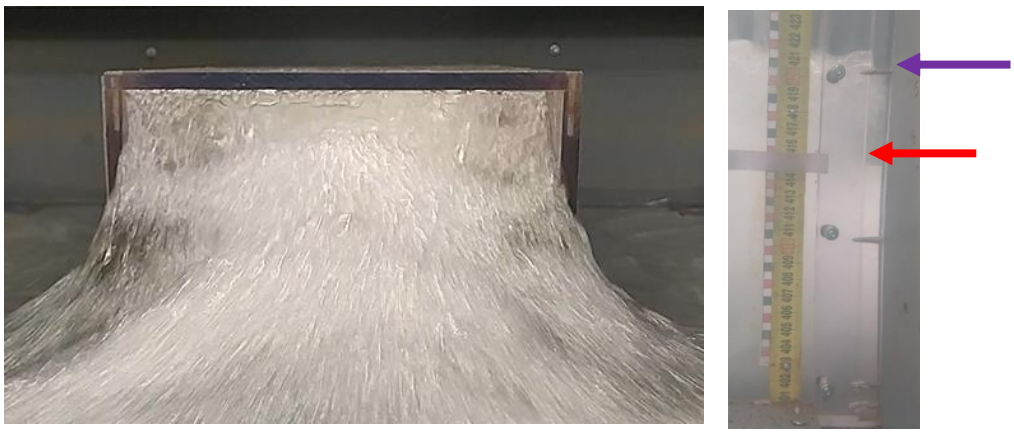
Příloha 2 - Experiment „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“

Fotografie zachycují průběh hladiny ve spadišti ze strany, pohled do spadiště seshora i, pohled směrem od výtoku z odpadní chodby nebo průběh hladiny v odpadní chodbě ze strany případně pro stav nezahlceného vtoku odpadní chodby (Q = 12 l/s), částečně zahlceného vtoku odpadní chodby (Q = 17,5 l/s, 18 l/s) či zahlceného vtoku odpadní chodby (Q = 25,5 l/s, 37 l/s, 69,7 l/s, 95 l/s, 112 l/s) pro dolní okrajovou podmínku y = y_k.

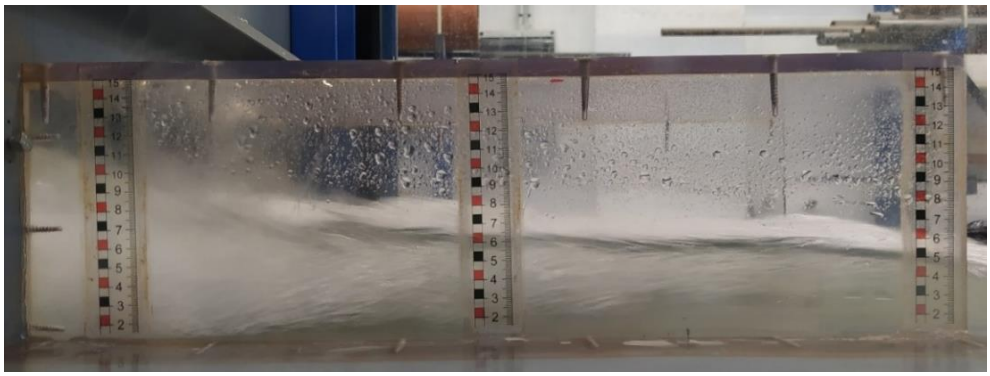
Legenda ← horní hrana vtoku do odpadního objektu ← hladina ve spadiště

Obr. 57 – Pohled odpadním objektem směrem do spadiště pro průtok 12,0 l/s

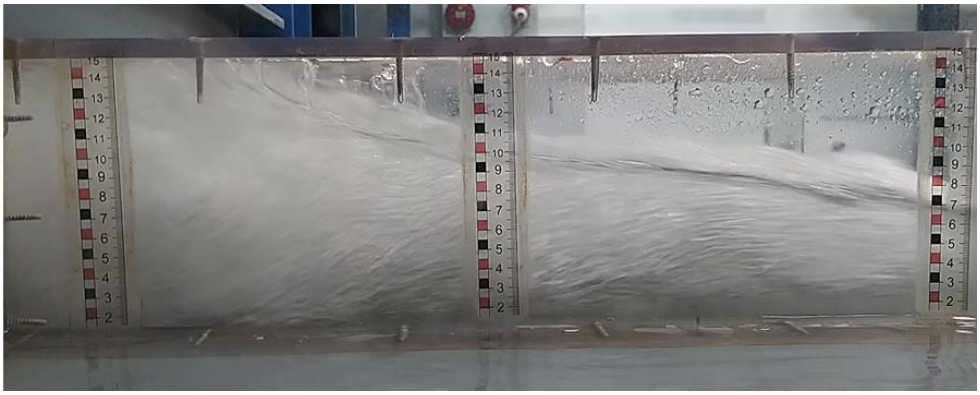
Obr. 58 – Pohled odpadním objektem směrem do spadiště pro průtok 18,0 l/s



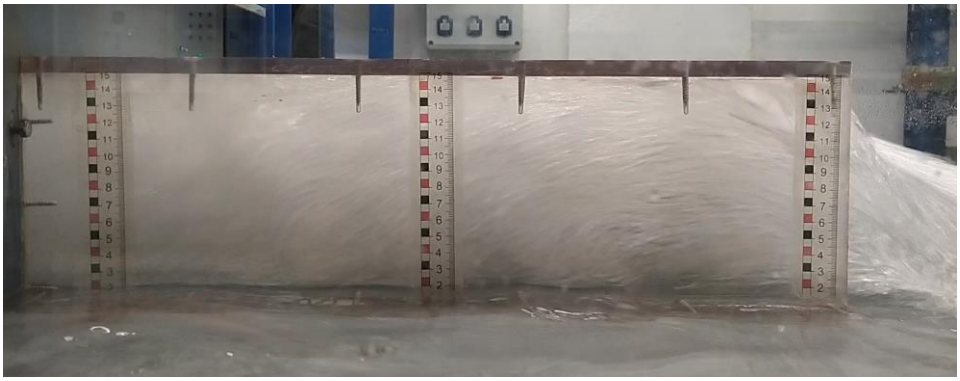
Obr. 59 – Pohled odpadním objektem směrem do spadiště pro průtok 25,5 l/s



Obr. 60 – Pohled na odpadní objekt ze strany pro průtok 12,0 l/s

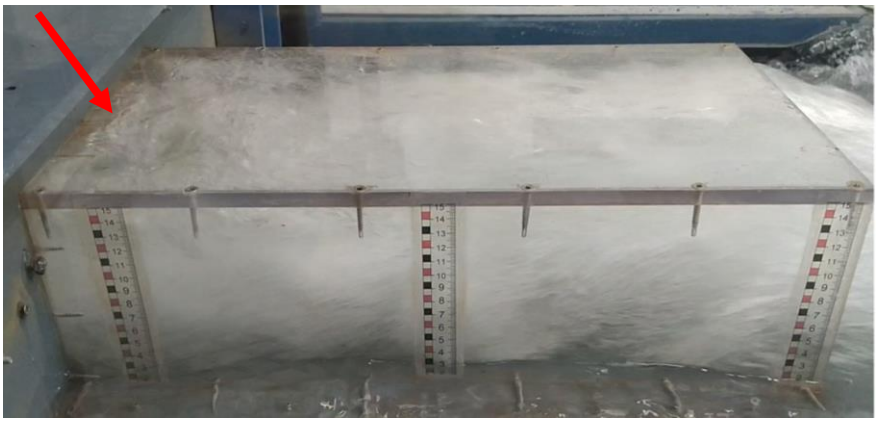


Obr. 61 – Pohled na odpadní objekt ze strany pro průtok 17,5 l/s

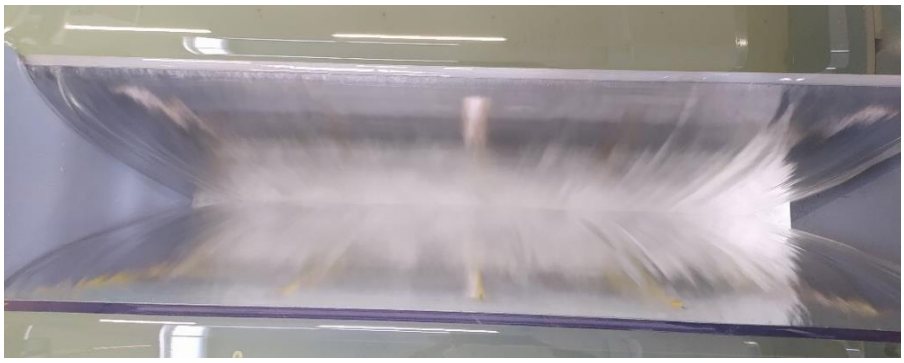


Obr. 62 – Pohled na odpadní objekt ze strany pro průtok 25,5 l/s

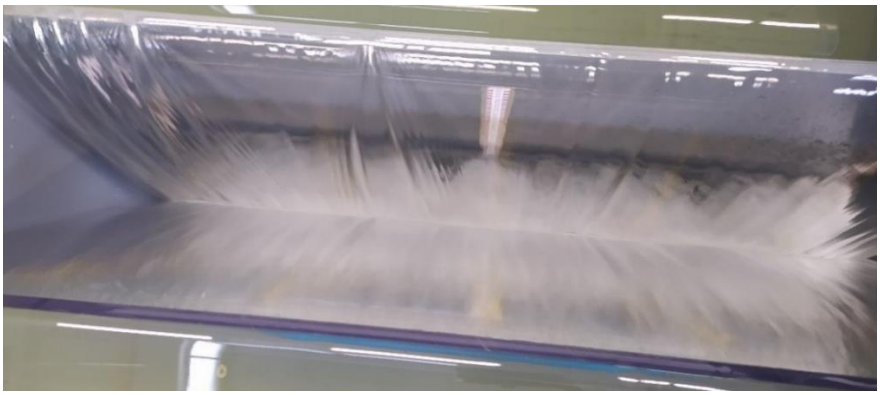
Obr. 63 – Pohled na odpadní objekt ze strany pro průtok 112,0 l/s



Obr. 64 – Ukázka proudění v odpadním objektu (průtok 37 l/s)
Pozn. Zajímavost – proudění u hrany vtoku (červená šipka)



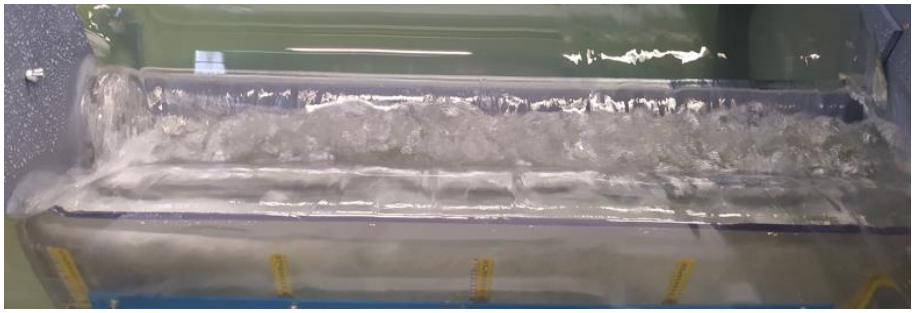
Obr. 65 – Pohled do spadiště pro průtok 12,0 l/s



Obr. 66 – Pohled do spadiště pro průtok 17,5 l/s

Obr. 67 – Pohled do spadiště pro průtok 25,5 l/s
(autor Ing. T. Kašpar, Phd.)

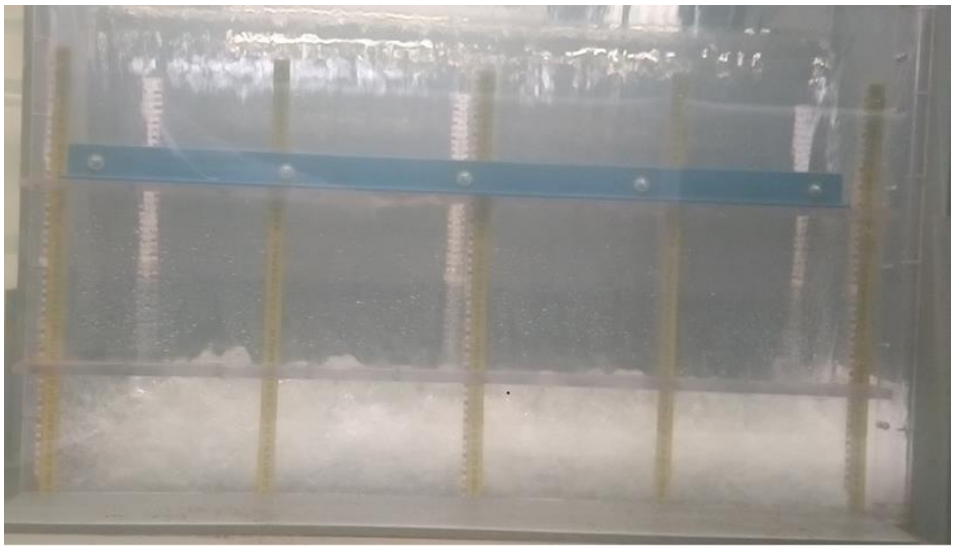
Obr. 68 – Pohled do spadiště pro průtok 69,7 l/s



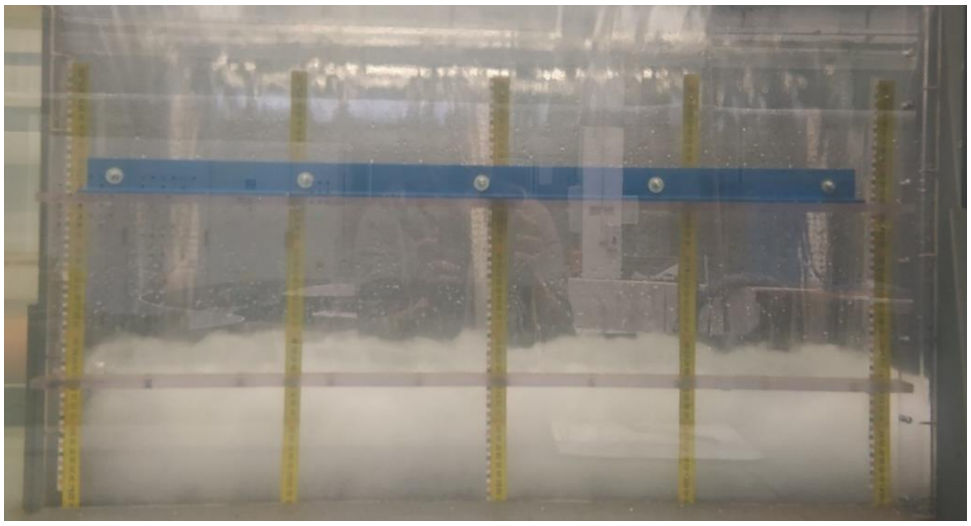
Obr. 69 – Pohled do spadiště pro průtok cca 95 l/s

Obr. 70 – Pohled do spadiště pro průtok cca 112 l/s (zatopený přepad)

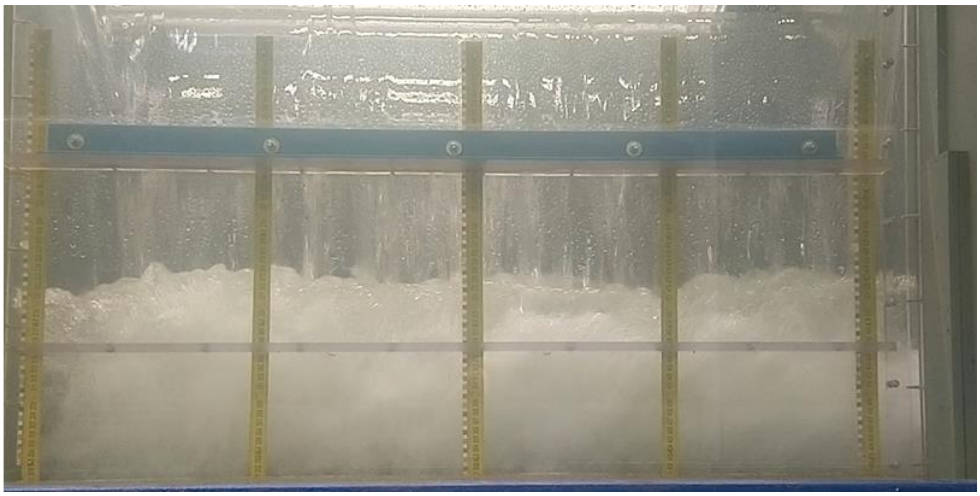
Obr. 71 – Detail na vír utvořený při obtékání čelní stěny přepadu pro zatopený přepad



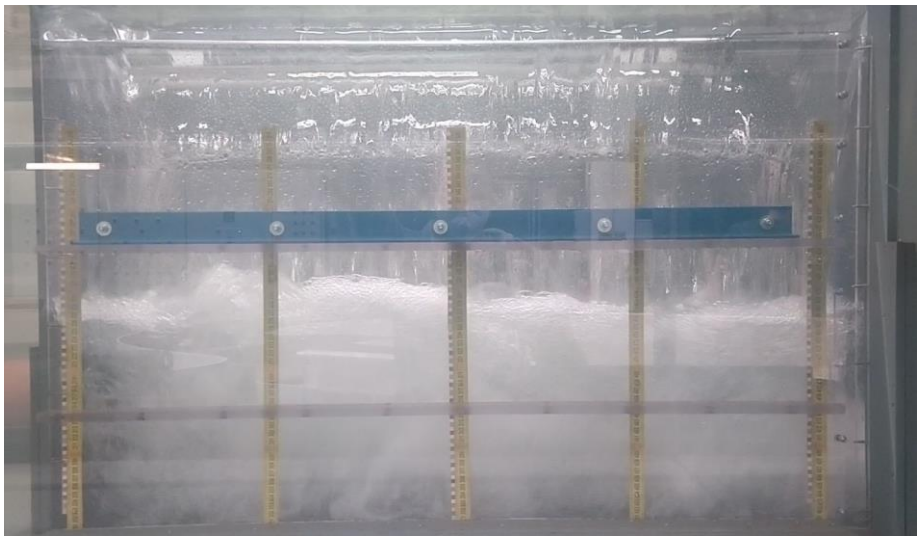
Obr. 72 – Průběh hladiny ve spadišti pro průtok 12,0 l/s



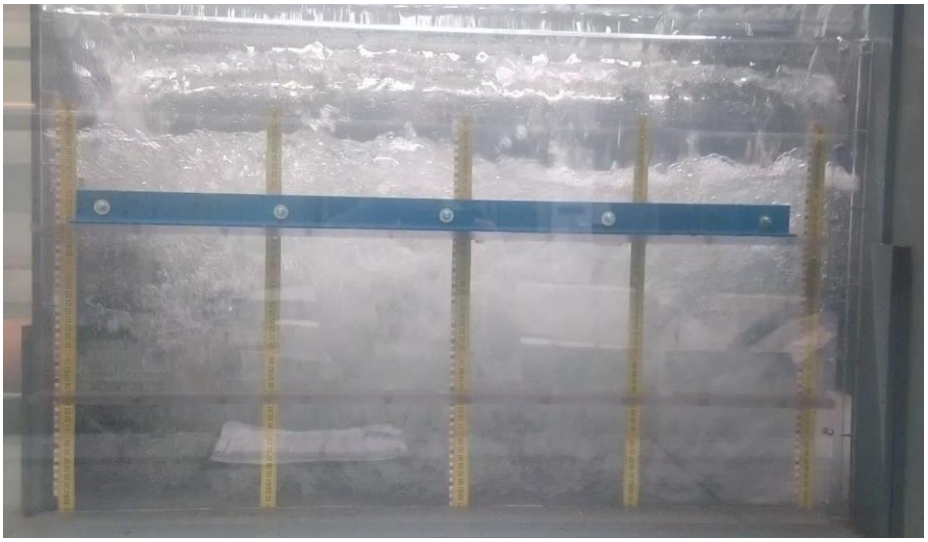
Obr. 73 – Průběh hladiny ve spadišti pro průtok 17,5 l/s



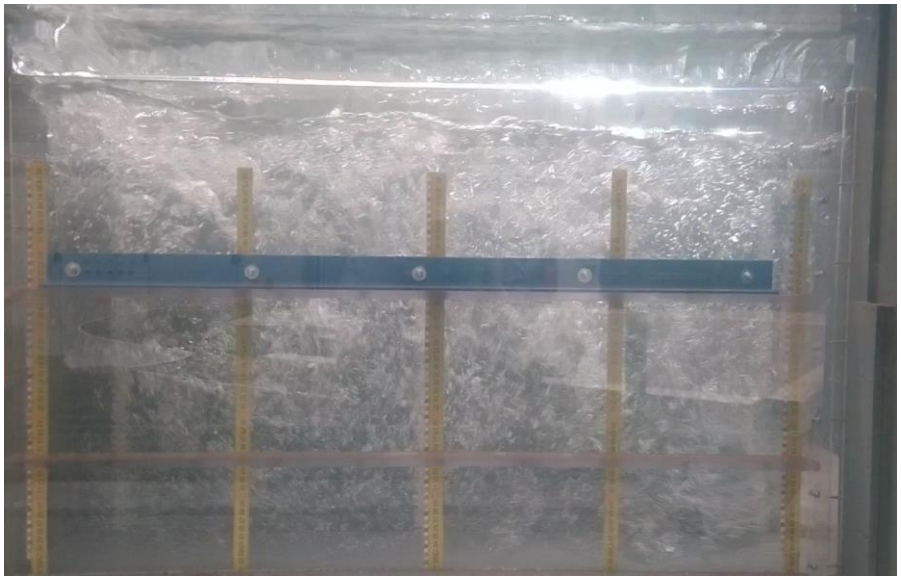
Obr. 74 – Průběh hladiny ve spadišti pro průtok 25,5 l/s



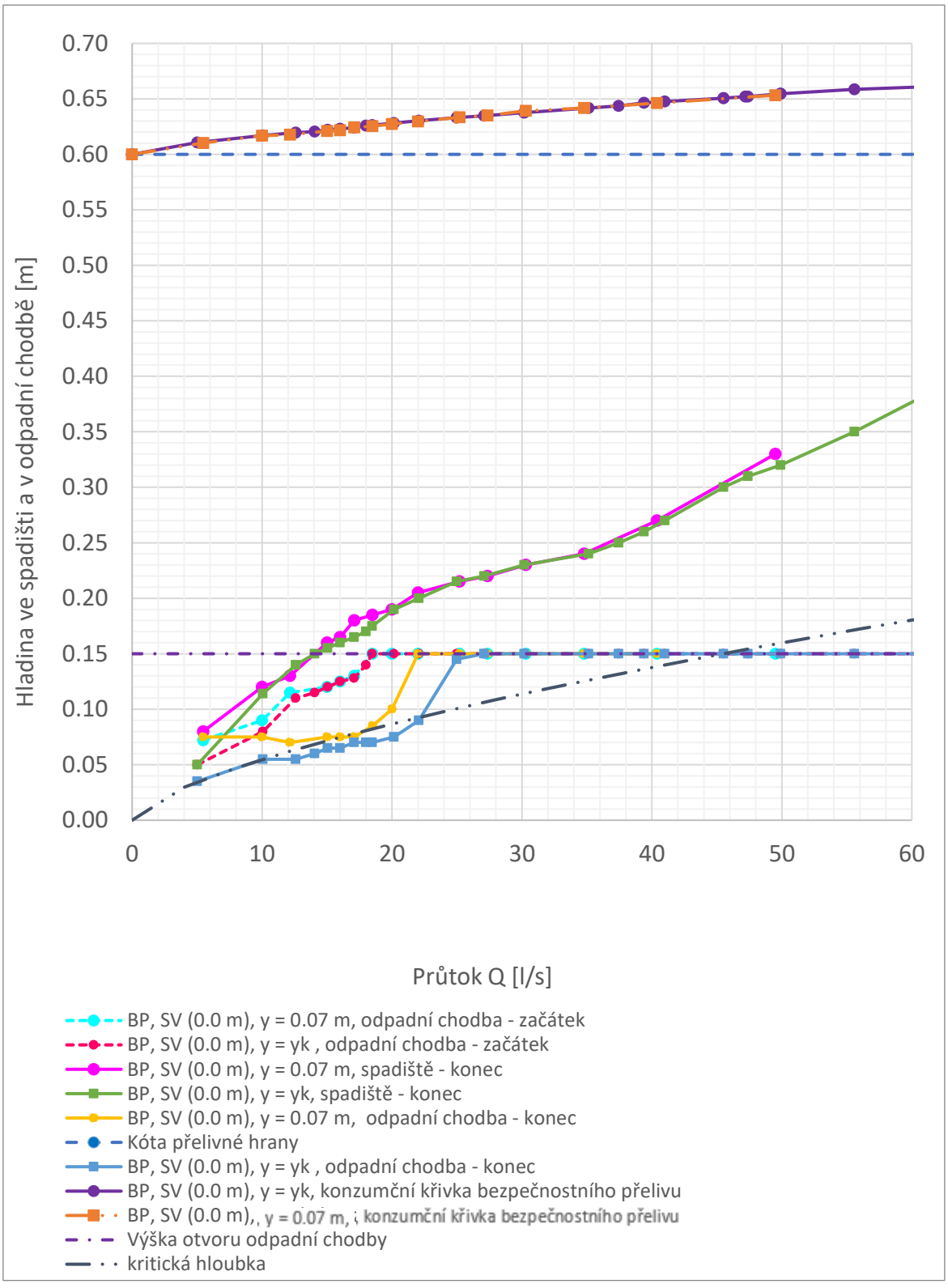
Obr. 75 – Průběh hladiny ve spadišti pro průtok 39,4 l/s



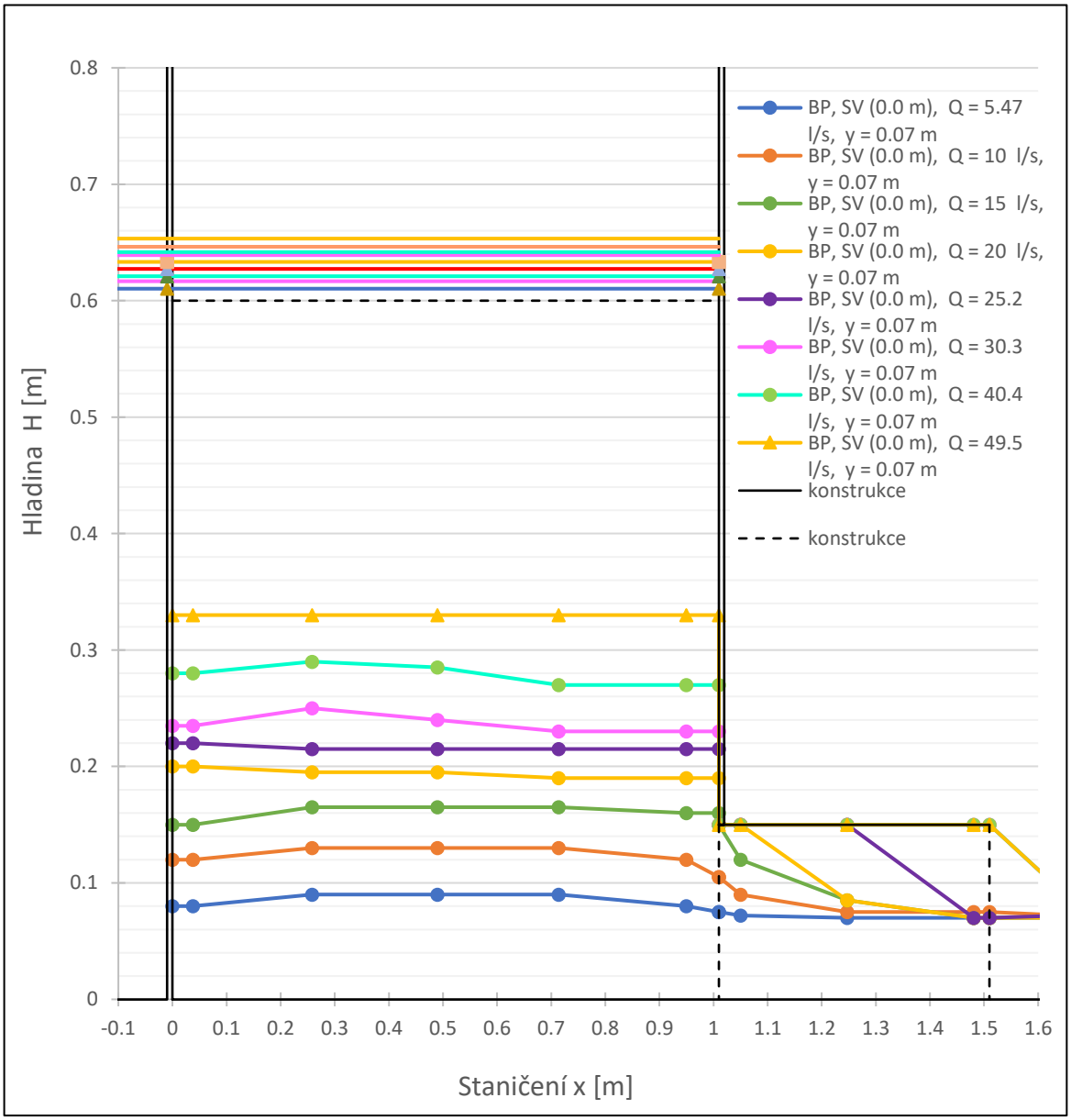
Obr. 76 – Průběh hladiny ve spadišti pro průtok 69,7l/s



Obr. 77 – Průběh hladiny ve spadišti pro průtok 95,0 l/s



Graf 27 – Závislost hladiny ve spadišti (konec) a v odpadní chodbě (začátek) na průtoku pro experiment „bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí“ pro různou dolní okrajovou



Graf 28 – Průběh hladiny ve sdruženém objektu pro dolní okrajovou podmínku y = 0.07 m

Vysvětlení legendy grafů 1 až 2

BP, SV (0,0 m)	označení experimentu bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí (výška otevření výpusti činí 0,0 m)
Q = 20.15 l/s	křivka zobrazuje průběh hladiny pro průtok 20,15 l/s
$y = y_k$	dolní okrajová podmínka je rovna hladině kritické hloubky $y_d = y_k$
konzumční křivka	označení konzumční křivky bezpečnostního přelivu
spadiště/odpadní chodba	označení pozice ve sdruženém objektu

Příloha 3 - Experiment „bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí“

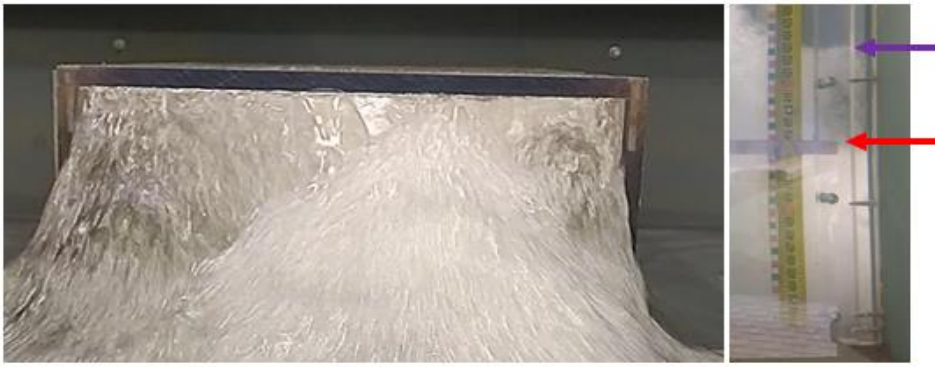
Fotografie zachycují průběh hladiny ve spadišti ze strany, pohled do spadiště seshora, pohled směrem od výtoku z odpadního objektu nebo průběh hladiny v odpadním objektu ze strany případně pro stav nezahlceného vtoku odpadního objektu (Q = 12,0 l/s + 17,5 l/s), částečně zahlceného vtoku (Q = 25,5 l/s) a zahlceného vtoku odpadního objektu (Q = 40,7 l/s) pro výšku otevření výpusti 0,06 m. Obrázek 98 a 99 zachycují průběh hladiny ve sdruženém objektu pro dolní okrajovou podmínku y = 0,07m (průtok 32,1 l/s) pro výšku otevření 0,1 m.

Legenda ← horní hrana vtoku do odpadního objektu ← hladina ve spadiště

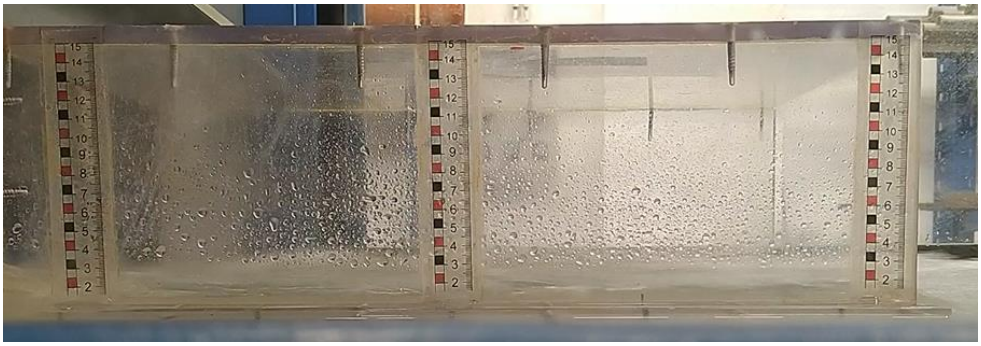
Obr. 78 – Pohled odpadním objektem směrem do spadiště (otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 12,0 l/s – pouze výpust v provozu

Obr. 79 – Pohled odpadním objektem směrem do spadiště (otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 17,5 l/s – výpust i přeliv v provozu

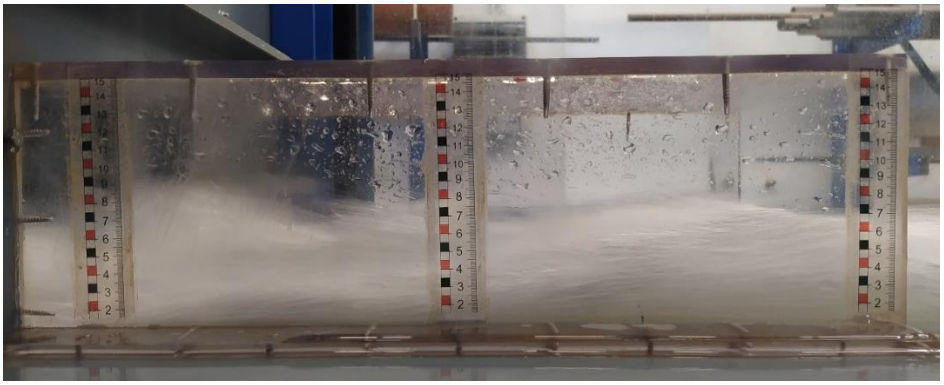
Ob. 80 – Pohled odpadním objektem směrem do spadiště (otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 25,5 l/s – výpust i přeliv v provozu



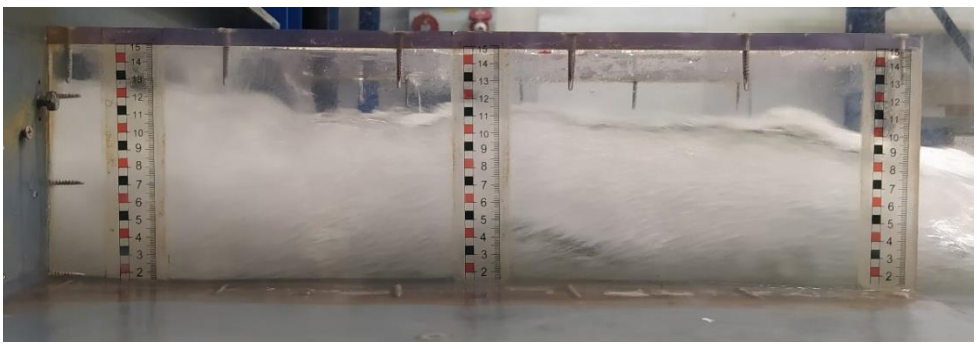
Obr. 81 – Pohled odpadním objektem směrem do spadiště (otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 40,7 l/s – výpust i přeliv v provozu



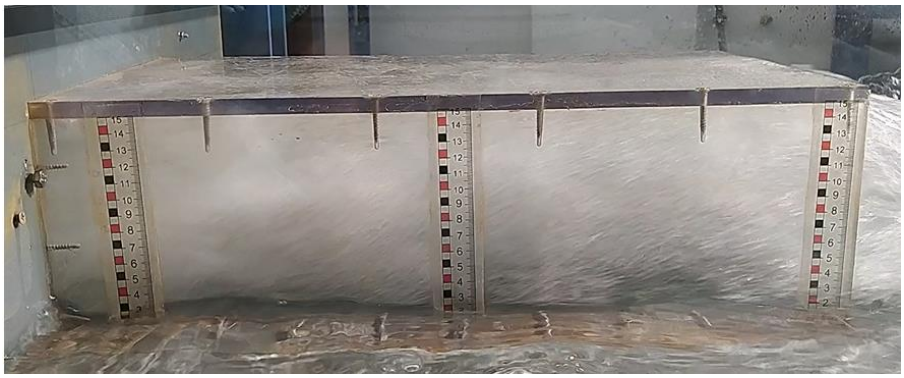
Obr. 82 – Pohled na odpadní objekt ze strany (výška otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 12,0 l/s – výpust v provozu



Obr. 83 – Pohled na odpadní objekt ze strany (výška otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 17,5 l/s – výpust i přeliv v provozu

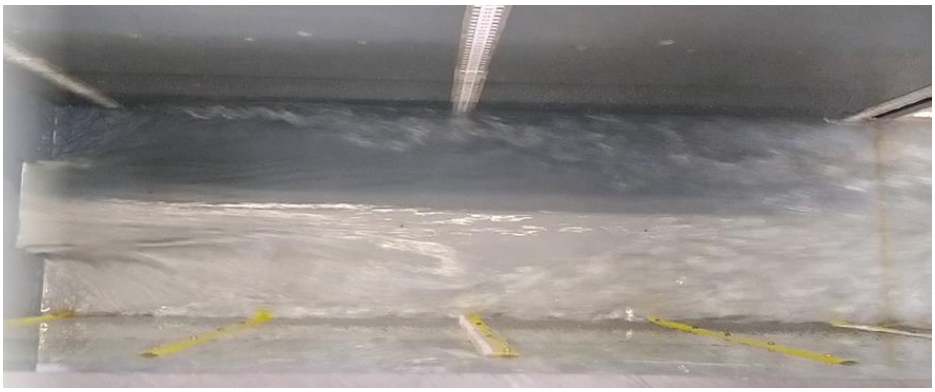


Obr 84 – Pohled na odpadní objekt ze strany (výška otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 25,5 l/s – výpust i přeliv v provozu

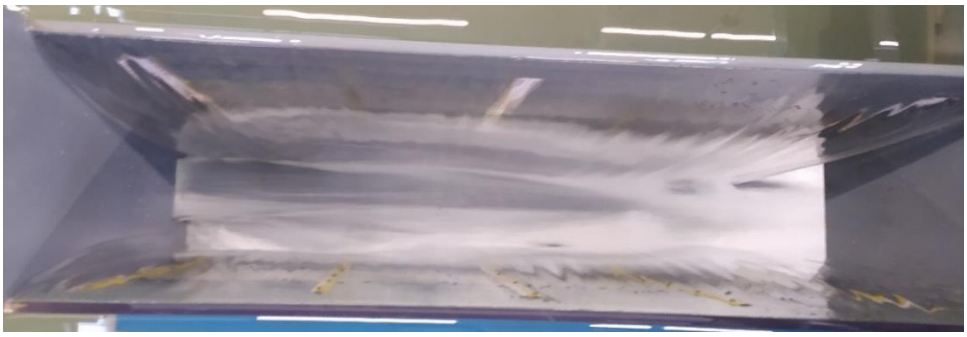


Obr. 85 – Pohled na odpadní objekt ze strany (výška otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 40,7 l/s – tlakový režim proudění, výpust i přeliv v provozu

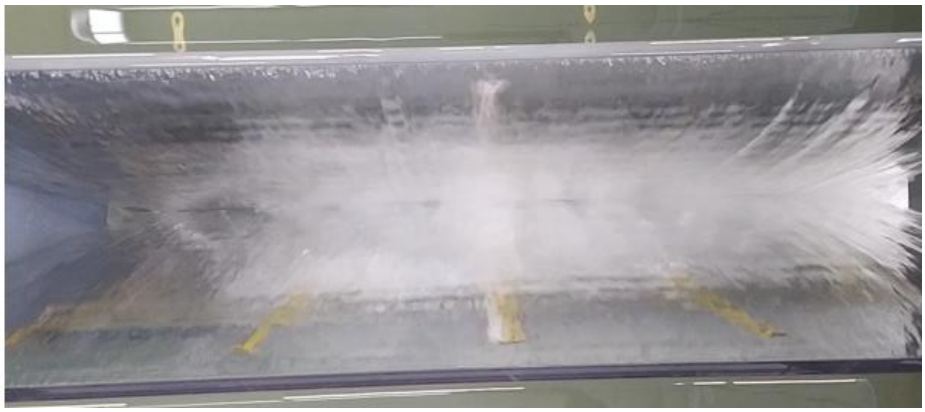
Obr. 86 – Pohled na odpadní objekt pro stav zatopeného přepadu (výška otevření 0,06 m)



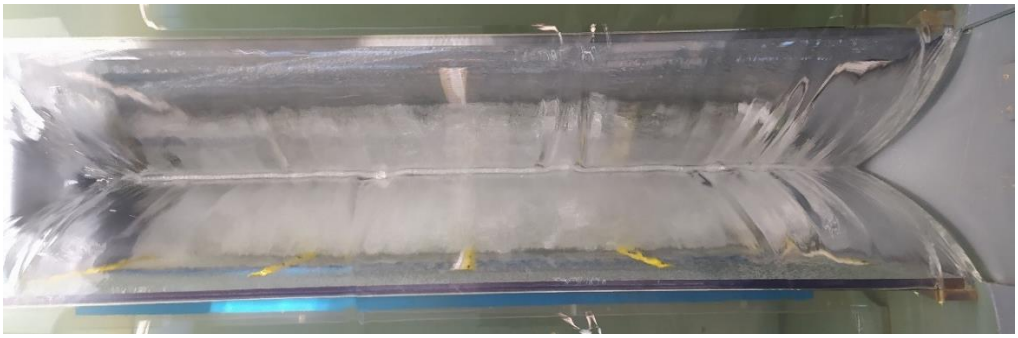
Obr. 87 – Pohled do spadiště (výška otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 12,0 l/s – výpust v provozu



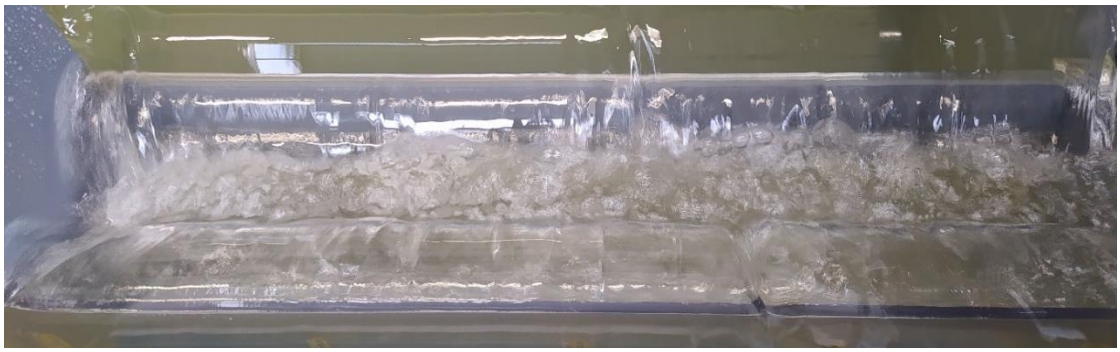
Obr. 88 – Pohled do spadiště (výška otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 17,5 l/s – výpust i přeliv v provozu



Obr. 89 – Pohled do spadiště s (výška otevření výpusti 0,06 m)
pro průtok 25,5 l/ – výpust i přeliv v provozu



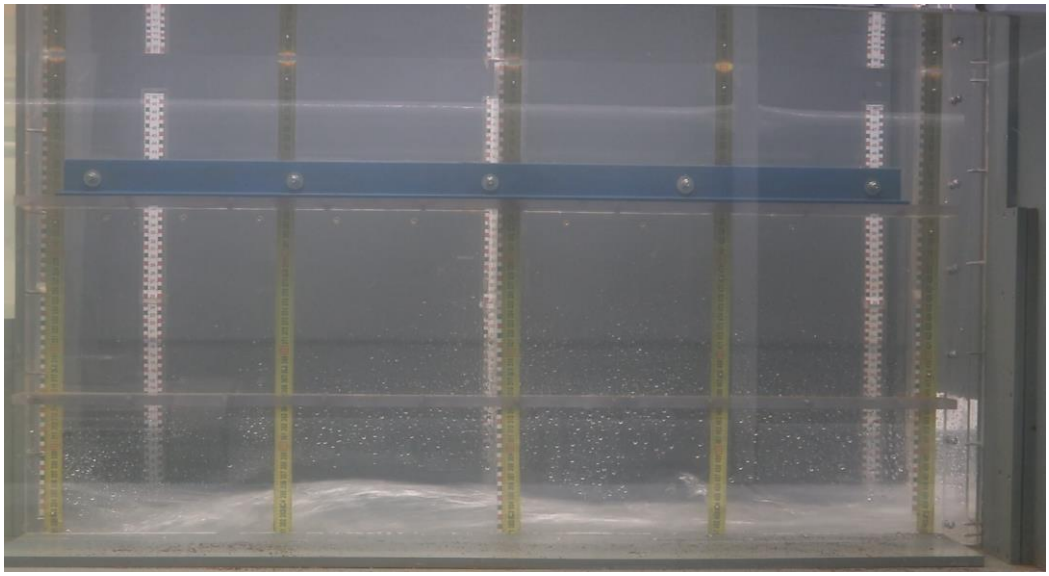
Obr. 90 – Pohled do spadiště (výška otevření výpusti 0,06 m)
pro průtok 40,7 l/s – výpust i přeliv v provozu



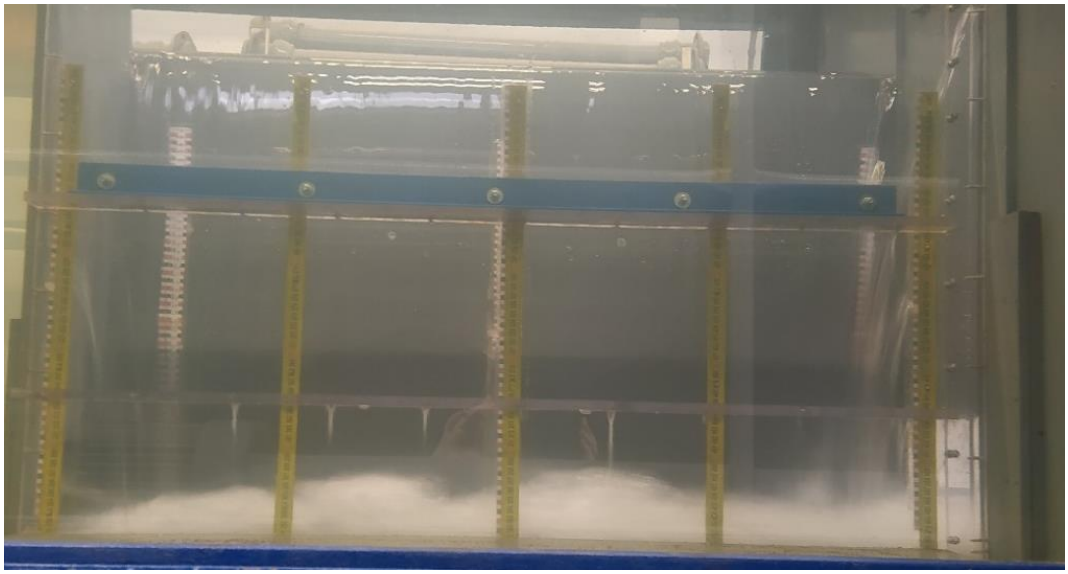
Obr. 91 – Pohled do spadiště (výška otevření výpusti 0,06 m)
pro průtok 95,3 l/s – výpust i přeliv v provozu

Ob. 92 – Pohled do spadiště pro zahlcený přepad (výška otevření výpusti 0,06 m)

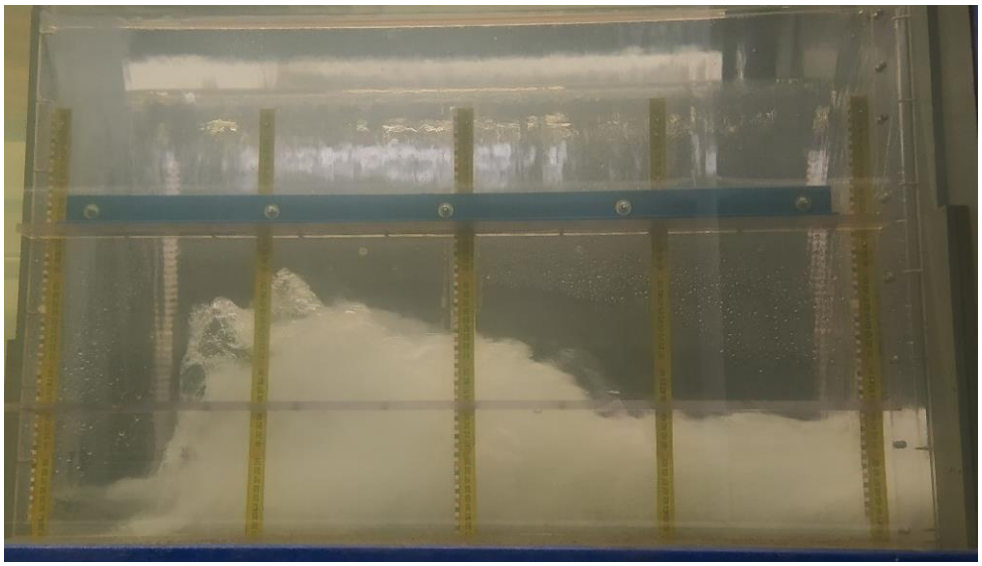
Obr. 93 – Pohled do spadiště ze shora a detail vytvořeného vírů vlivem obtékání čelní stěny spadiště pro zatopený přepad (výška otevření výpusti 0,06 m)



Obr. 94 – Průběh hladiny ve spadišti (výška otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 12,0 l/s – výpust v provozu (autor Ing. T. Kašpar, PhD.)



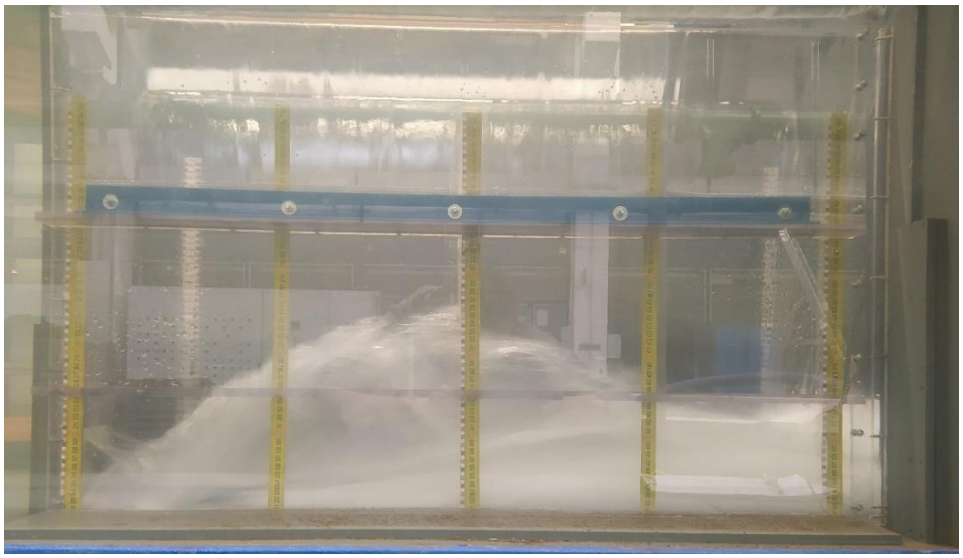
Obr. 95 – Průběh hladiny ve spadišti (výška otevření výpusti 0,06 m) pro průtok 17,5 l/s – výpust i přeliv v provozu



Obr. 96 – Průběh hladiny ve spadišti (výška otevření výpusti 0,06 m)
pro průtok 25,5 l/s – výpust i přeliv v provozu

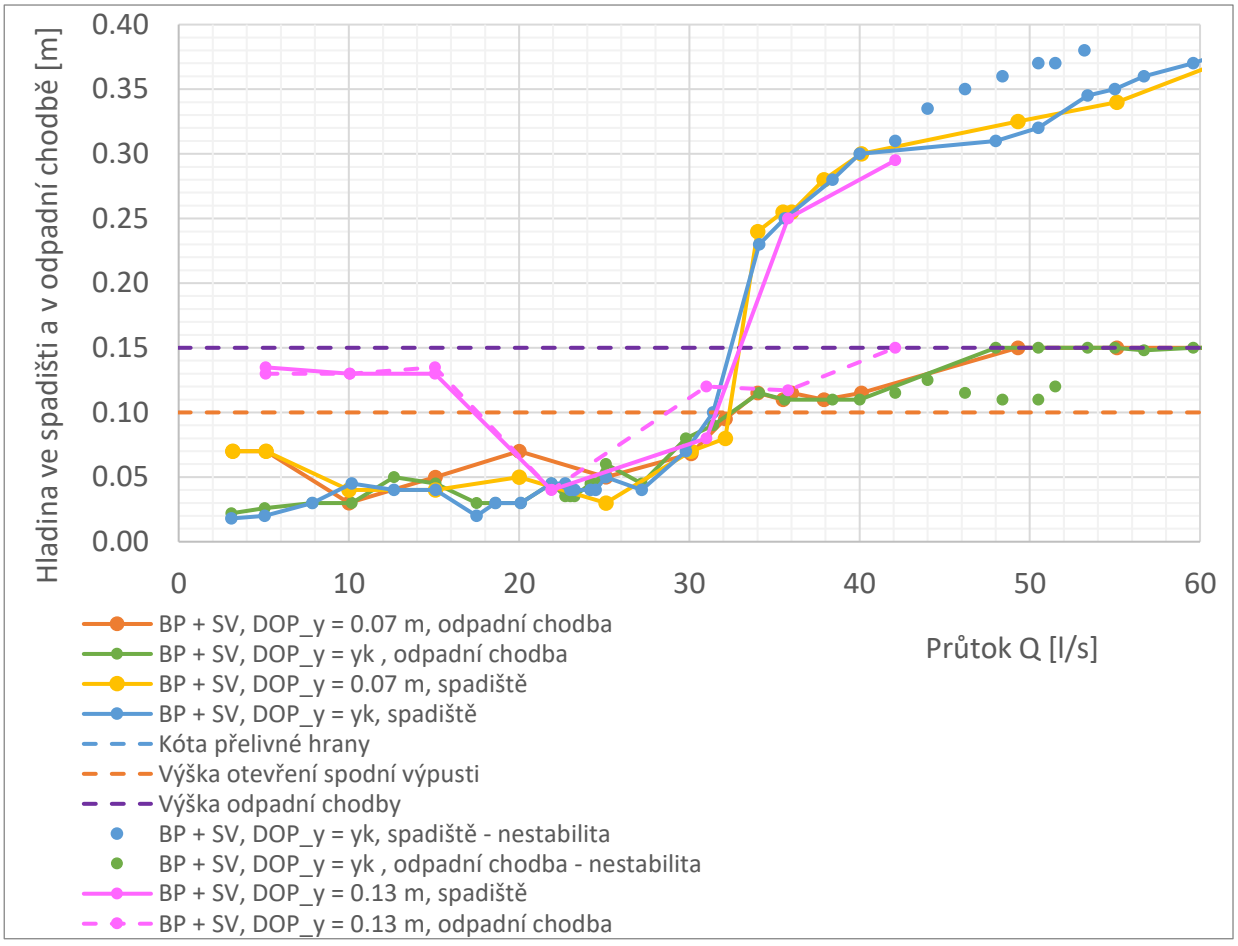
Obr. 97 – Průběh hladiny ve spadišti (výška otevření výpusti 0,06 m)
pro průtok 40,7 l/s – výpust i přeliv v provozu

Obr. 98 – Pohled na výtok z odpadu pro průtok 32,1 l/s pro dolní okrajovou podmínku y = 0,07 m
(výška otevření výpusti 0,1 m) - výpust i přeliv v provozu

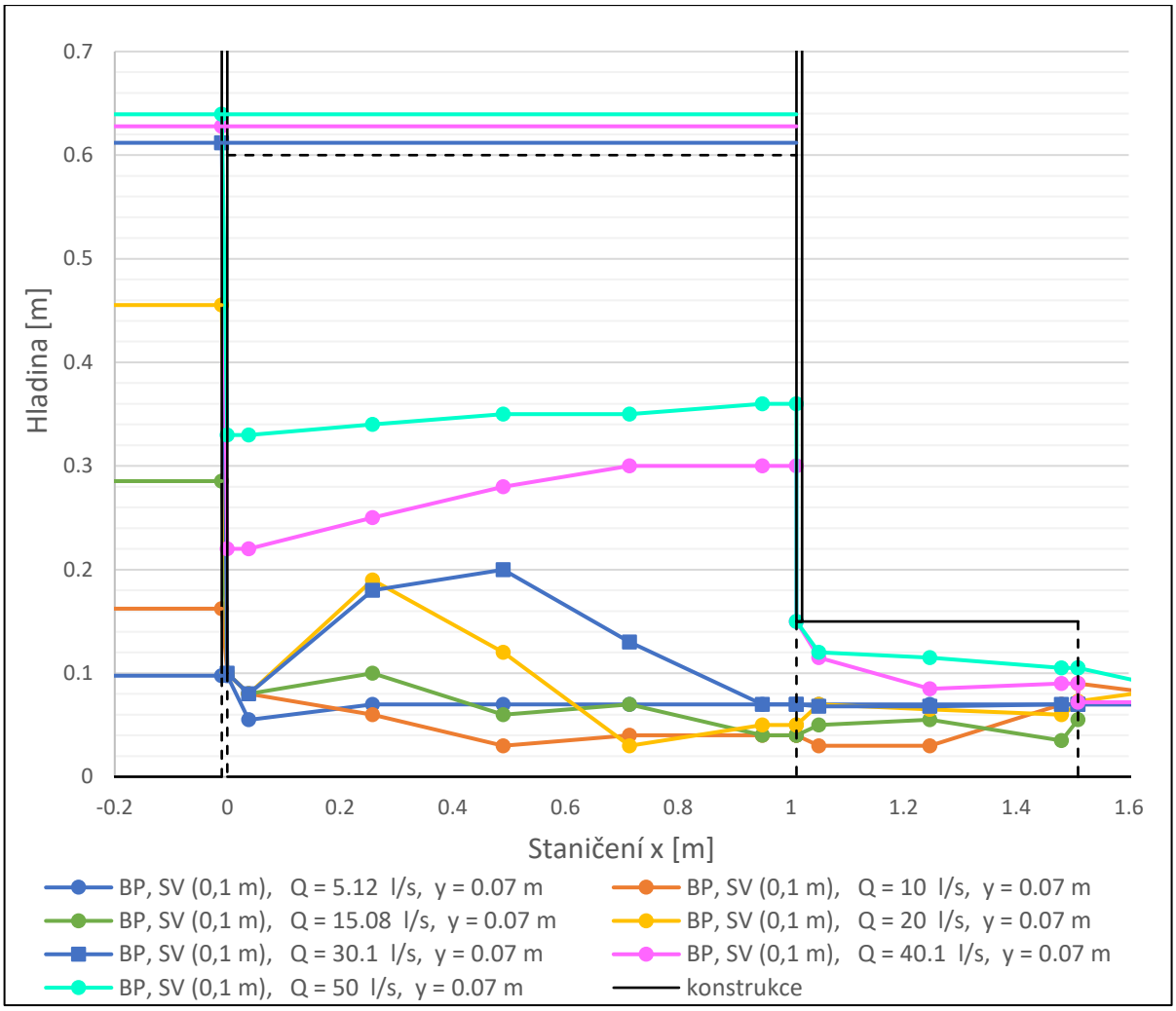


Obr. 99 – Pohled do spadiště pro průtok 32,1 l/s pro dolní okrajovou podmínku y = 0,07 m (výška otevření výpusti 0,1 m) - výpust i přeliv v provozu

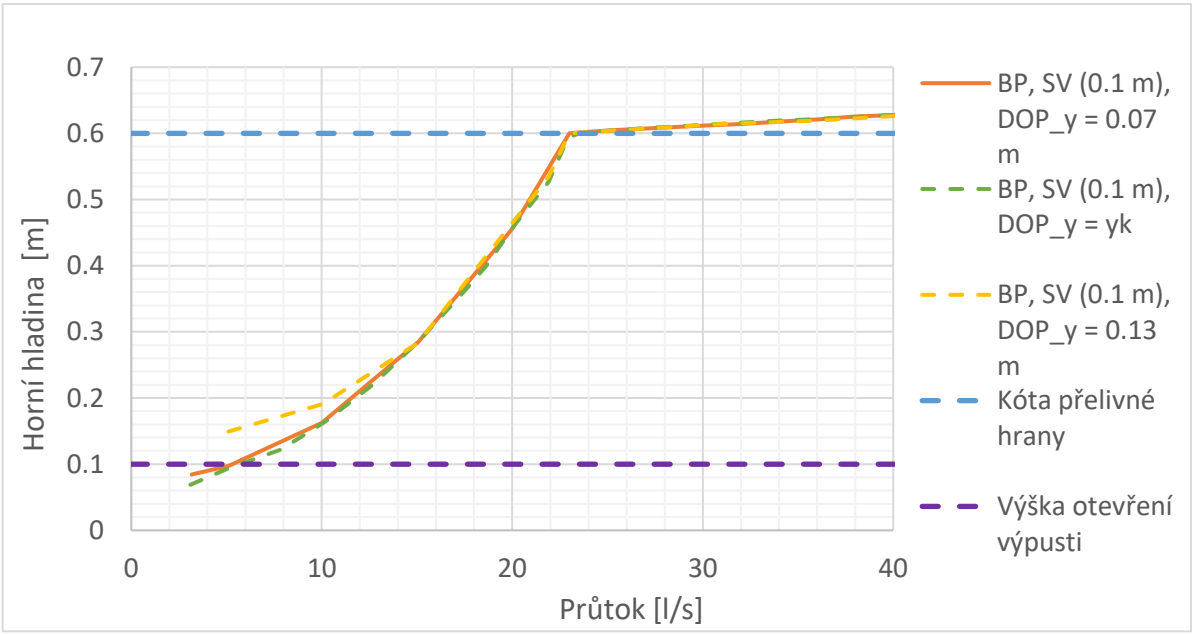
Příloha obsahuje grafy zobrazující konzumční křivku a závislost hladiny ve spadišti i v odpadním objektu pro příslušnou výšku otevření výpustí s ohledem na příslušné dolní okrajové podmínky.



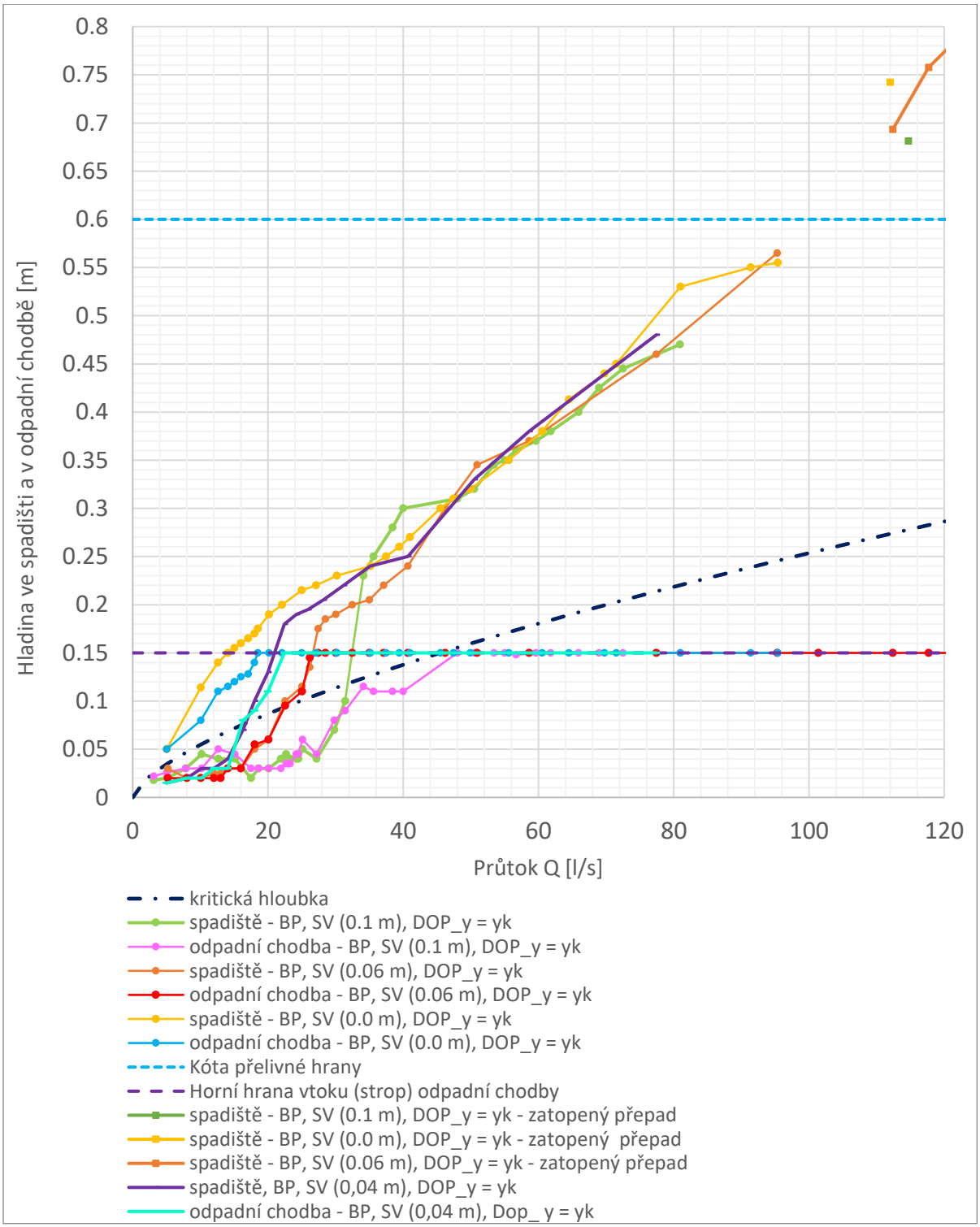
Graf 29 – Závislost hladiny ve spadišti (konec) a v odpadní chodbě (začátek) na průtoku pro experiment „bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí“ (výška otevření výpusti 0.1 m) pro různou dolní okrajovou podmínku včetně nestability proudění (vyznačení polohy viz Graf 6)



Graf 30 – Průběh hladiny ve sdruženém objektu (výška otevření výpusti 0,1 m) – pro dolní okrajovou podmíku y = 0,07 m

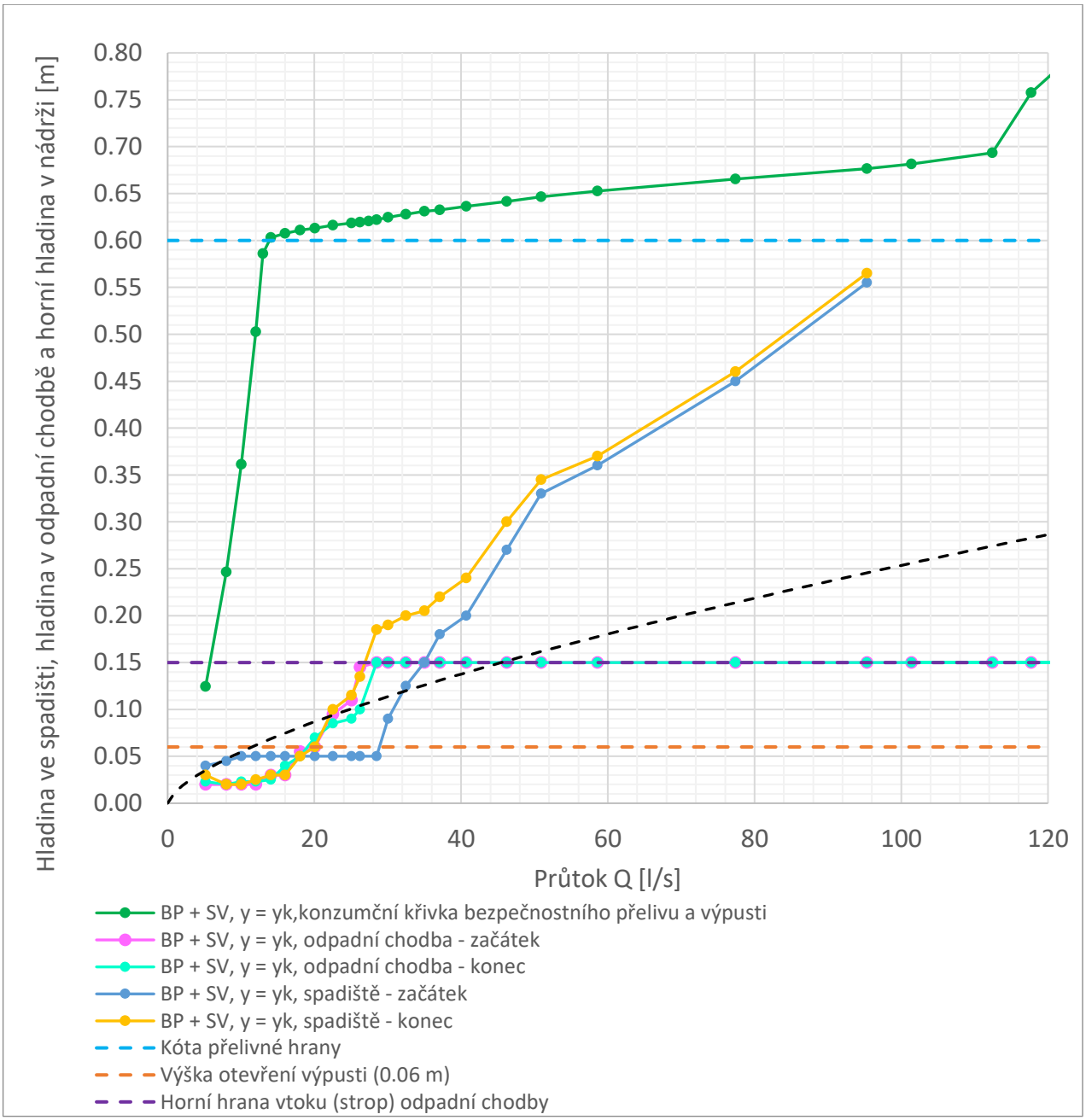


Graf 31 – Konzumční křivka sdruženého objektu (výška otevření výpusti 0,1 m) pro rozmezí průtoku 0 l/s až 60 l/s



Graf 32 – Závislost hladiny ve spadišti (konec) a v odpadní chodbě (začátek) na průtoku pro experiment bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí a s otevřenou výpustí (výška otevření výpusti 0.1 m, 0.06 m a 0,04 m) (vyznačení polohy viz Obr. 39)

Pozn: Do grafu pro zajímavost přidána i výška otevření výpusti 0,04 m. Tento experiment byl měřen na fyzikální model velice hrubě, proto se v diplomové práci data neinterpretují.



Graf 33 – Závislost hladiny ve spadišti (začátek, konec) a v odpadní chodbě (začátek, konec) na průtoku a konzumční křivka sdruženého objektu pro experiment bezpečnostní přeliv s otevřenou výpustí (výška otevření výpusti 0.06 m) (vyznačení polohy viz Obr. 39)

Vysvětlení legendy grafů

BP, SV (0,0 m)	označení experimentu bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí (výška otevření výpusti činí 0,0 m) nebo otevřenou výpustí (výška otevření výpusti činí 0,1 m nebo 0,06 m)
Q = 20.15 l/s	křivka zobrazuje průběh hladiny pro průtok 20,15 l/s
$y = y_k$ nebo DOP_y = y_k	dolní okrajová podmínka je rovna hladině kritické hloubky $y = y_k$
y = 0,07 m nebo DOP_y = 0,07 m	dolní okrajová podmínka je rovna hladině y = 0,07 m
y = 0,07 m nebo DOP_y = 0,13 m	dolní okrajová podmínka je rovna hladině y = 0,13 m
spadiště – konec	označení pozice pro vynesení křivky

Příloha 4 - Základní hydraulické rovnice

1. Popis používaných konstant na fyzikálním modelu

Veličiny jsou označeny na obrázku níže. Seznam veličin je následující:

- laboratorní žlab

  $b_ž$ šířka žlabu $b_ž = 1,0$ m

- výpust

  b_v šířka výpusti $b_v = 0,1$ m

  a výška výpusti a = 0,1 m

  a_v výška otevření výpusti $a_v = 0,1$ m nebo $a_v = 0,06$ m

- bezpečnostní přeliv

  $B_p = L_p$ délka přelivné hrany B = 1,01 m, celkem B = 2,02 m

  t tloušťka přelivné hrany t = 0,01 m

  s_h výška konstrukce přelivu od horní vody s = 0,06 m

  s_d výška konstrukce přelivu od dolní vody s = 0,06 m

- spadiště

  $b_š$ šířka spadiště $b_š = 0,25$ m

  $L_s = L_p$ délka spadiště $L_s = 1,01$ m

- odpadní chodba

  b_{od} šířka odpadní chodby $b_{od} = 0,25$ m

  a_{od} výška odpadní chodby $a_{od} = 0,15$ m

  L_{od} délka odpadní chodby $L_{od} = 0,51$ m

- průběh hladiny

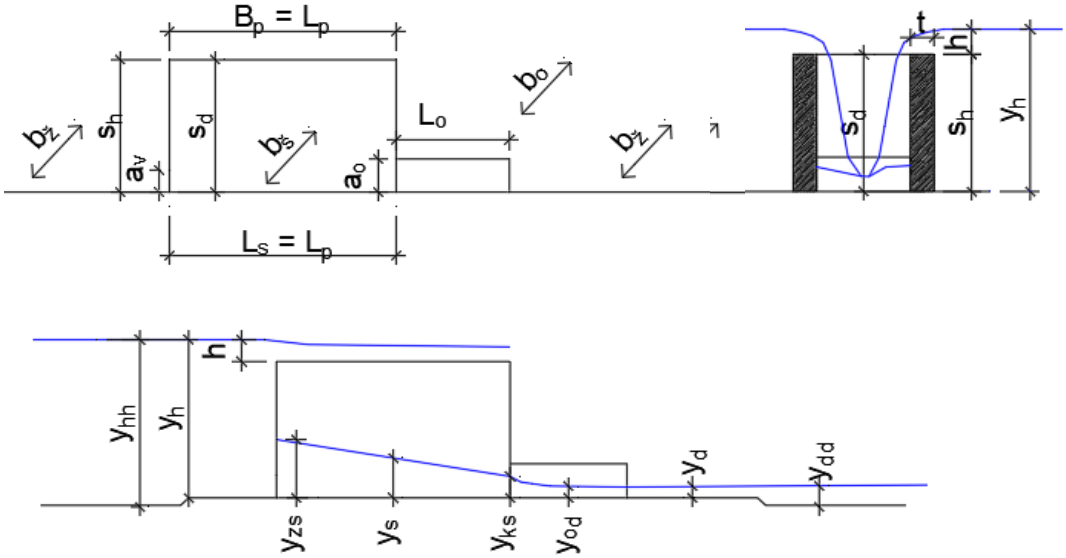
  y_h, y_d horní/dolní hladina

  y_{hh}, y_{dd} horní / dolní hloubka

  y_s hladina ve spadišti

  y_{od} hladina v odpadní chodbě

Pozn. Hladina je k srovnávací rovině, hloubka je vzdálenost od hladiny ke dnu



Obr. 100 – Označení veličin

- součinitelé, konstanty

  g gravitační zrychlení g = 9,81 m^2/s

  α Coriolisovo číslo (součinitel kinetické energie) – hodnota individuální

  n součinitel drsnosti n = 0,012

  Δ hydraulická drsnost Δ = 0,000 003

2. Stanovení režimu proudění, kritická hloubka a vodní skok

Na fyzikálním modelu vzniká ustálené proudění. Ustálené proudění se dělí na rovnoměrné, kdy průřezová rychlost a průtočný průřez zůstávají konstantní, a na nerovnoměrné proudění. [25] V otevřeném profilu se vytváří proudění o volné hladině, naopak v uzavřeném profilu vedle proudění o volné hladině vzniká i proudění v tlakovém režimu. Při proudění o volné hladině se rozlišuje nadkritický (bystřinný), kritický a podkritický (říční) režim proudění. Diplomová práce používá pro stanovení režimu proudění Froudovo číslo nebo porovnání hloubky průřezu s kritickou hloubkou daného průřezu. Froudovo číslo se stanoví ze vztahu: [26]

$$Fr = \frac{\alpha * v}{\sqrt{g * y_s}} = \frac{\alpha * v}{\sqrt{g * \frac{S}{B}}} = \frac{\alpha * Q}{S * \sqrt{g * \frac{S}{B}}} \qquad (2.1)$$

kde Q průtok [m^3/s]

v rychlost [m/s]

g gravitační zrychlení [m/s^2]

y_s střední hloubka průřezu [m]

	S	průtočná plocha v průřezu	[m²]
	B	šířka v hladině	[m]
	Fr	Froudovo číslo	[-]
	a	Coriolisovo číslo	[-]

Pro obdélníkový profil se kritická hloubka stanoví ze vztahu: [26]

$$y_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha * Q^2}{g * b^2}} \tag{2.2}$$

kde	Q	průtok	[m³/s]
	g	gravitační zrychlení	[m/s²]
	b	šířka v hladině	[m]
	y	kritická hloubka	[-]
	a	Coriolisovo číslo	[-]

Nadkritický (říční) režim vzniká při hloubce průřezu menší než kritická hloubka ($y < y_k$) nebo Froudovo číslo menší než 1,0 ($Fr < 1,0$). Naopak podkritický (bystřinný) režim vzniká při hloubce průřezu větší než kritická hloubka ($y > y_k$) nebo Froudovo číslo větší než 1,0 ($Fr > 1,0$). Zdali hloubka průřezu se rovná kritické hloubce ($y = y_k$) nebo Froudovo číslo se rovná hodnotě 1,0 ($Fr = 1,0$), jedná se o kritický režim. [26] Podle režimu proudění se volí směr výpočtu. Pro říční režim se postupuje proti směru proudění, naopak při bystřinném režimu se postupuje ve směru proudění.

Na fyzikálním modelu se může vytvořit vodní skok při přechodu bystřinného proudění do říčního proudění. Pak je nutné zjistit, jaký typ vodního skoku vzniká a kde se utvoří. Nejčastější typ vodního skoku je vodní skok prostý a vlnovitý vodní skok. [26] Vzájemné hloubky vodního prostého skoku pro obdélníkové koryto se stanoví dle vztahu: [26]

$$y_2 = \frac{y_1}{2} * \left[\sqrt{1 + 8 * \frac{Q^2}{g * y_1^3 * B^2}} - 1\right] = \frac{y_1}{2} * \left[\sqrt{1 + 8 * Fr_1^3} - 1\right] \tag{2.3}$$

kde	y_2, y_1	vzájemná hloubka vodního skoku v profilu prvním (horním) nebo v profile druhém (dolním)	[m]
	Q	průtok	[m³/s]
	g	gravitační zrychlení	[m/s²]
	Fr	Froudovo číslo	[-]
	B	šířka v hladině	[m]

3. Coriolisovo číllo

Coriolisovo číslo představuje chybu způsobenou použitím průřezové rychlosti v profile, kde není rychlost konstantní. [25] Corilisovo číslo nabývá různých hodnot v závislosti n a okolnostech použití. Například pro prizmatická koryta se pohybuje v rozmezí 1,0 až 1,1, pro nepravidelná koryta se uvažuje hodnotou 1,3 až 1,8 nebo pro potrubí se hodnota pohybuje v rozmezí 1,0 až 1,1. [26] Při proudění ve spadišti nabývá Coriolisovo číslo podstatně vyšších hodnot, kdy může dosahovat až nad hodnotu 2,0. [12]

4. Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity vyjadřuje zákon zachování hmoty. Rovnice kontinuity pro proudovou trubici s uvažováním konstantního průtoku $Q = Q_1 = Q_2 = konst.$ má tvar: [25]

$$Q = S_2 * v_2 = S_1 * v_1 = S_x * v_x \quad (2\,4)$$

kde	Q	průtok	[m^3/s]
	S_x	průtočná plocha průřezu	[m^2]
	v_x	normálová složka průřezové rychlosti v průřezu	[m/s]

5. Věta o hybnosti

„*Věta o hybnosti se vtahuje na poměry na plochách ohraničujících určitý obor tekutiny, není nutno znát průběh proudění.*“ [25, p. 95] Věta o hybnosti říká, že „*přírůstek úhrnné hybnosti ve směru proudění je roven impulsu vnějších sil v daném směru.*“ [26, p. 56] Věta o hybnosti zní ve vektorovém tvaru pro ustálený průtok: [26]

$$\sum F^{\rightarrow} = \beta * \rho * Q * (v_2^{\rightarrow} - v_1^{\rightarrow}) \quad (2.5)$$

kde	$\Sigma F^{\rightarrow}$	součet vnějších sil v daném směru	[N]
	ρ	hustota kapaliny	[kg/m^3]
	Q	průtok	[m^3/s]
	$v_2^{\rightarrow}$	složka vektorové rychlosti v daném směru	[m/s]
	$v_1^{\rightarrow}$	složka vektorové rychlosti v daném směru	[m/s]
	β	Bousinesquovo číslo	[-]

6. Zákon zachování mechanické energie – Bernoulliho rovnice

Pro ustálené proudění skutečné nestlačitelné kapaliny platí rozšířená Bernoulliho energetická rovnice zapsaná ve výškovém tvaru s uvažováním ztráty mechanické energie v tvaru: [26]

$$h_E = h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \sum Z \quad (2.6)$$

kde	h_E	energetická výška v profilu	[m]
	$h_1,\ h_2$	polohová výška v horním, v dolním profilu	[m]
	$\frac{p_1}{\rho g}, \frac{p_2}{\rho g}$	tlaková výška v horním, dolním profilu	[m]
	$\frac{\alpha v_1^2}{2g}, \frac{\alpha v_2^2}{2g}$	rychlostní výška v horním, dolním profilu	[m]
	$\sum Z$	celkové ztráty mechanické energie	[m]

Při zavedení předpokladů se upraví rovnice na další vztahy, třeba rovnici pro výtok otvorem, rovnici pro přepad přes konstrukci či vztah nerovnoměrného proudění v korytě. Při výpočtu se zavádí relativní tlaky.

7. Celkové ztráty mechanické energie

Celkové ztráty mechanické energie ve výškovém tvaru Bernoulliho rovnice se skládají ze ztráty místní a ztráty třením: [26]

$$\sum Z = Z_m + Z_t \quad (2.7)$$

kde	$\sum Z$	celkové ztráty mechanické energie	[m]
	$\sum Z_t$	ztráty třením	[m]
	$\sum Z_m$	ztráty místní	[m]

Ztráty třením vznikají třením kapaliny o stěny koryta a vzájemným vnitřním třením mezi vrstvami kapaliny. Ztráty třením pro otevřené koryto se vyjadřují: [26]

$$Z_t = i_e * \Delta L = \frac{Q^2}{S^2 * C^2 * R} * \Delta L = \frac{Q^2}{K^2} * \Delta L \quad (2.8)$$

kde	$\sum Z_t$	ztráty třením	[m]
	i_e	sklon čáry energie	[-]
	ΔL	délka úseku mezi profily	[m]
	Q	průtok	[m^3/s]
	K	modul průtoku	[m/s^3]

Modul průtoku se stanoví podle vztahu: [26]

$$K = S * C * R^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

kde	K	modul průtoku	[m/s^3]
	S	průtočná plocha	[m^2]
	C	rychlostní součinitel	[$m^{0,5}/s$]
	R	hydraulický poloměr $R = \frac{S}{O}$	[m]
	O	omočený obvod	[m]

Charakteristiky S, C, R a O se stanoví z průměrného průřezu danou průměrnou hloubkou $y_p = \frac{y_1+y_2}{2}$. Rychlostní součinitel C se určí podle vztahu Manninga s podmínkou platnosti součinitele drsnosti n > 0,011 a hydraulického poloměru 0,3 m < R < 5 m: [26]

$$C = \frac{1}{n} * R^{\frac{1}{6}} \qquad (2.\ 10)$$

kde	C	Chezyho rychlostní součinitel	[$m^{0.5}/s$]
	n	drsnostní součinitel (součinitel drsnosti)	[-]
	R	hydraulický poloměr	[m]

Případně se stanoví rychlostní součinitel podle vztahu Pavlovskij s podmínkou platnosti 0,011 < n < 0,04 a 0,1 m < R < 3,0 m: [26]

$$C = \frac{1}{n} * R^{P} \qquad (2.11)$$

kde	C	Chezyho rychlostní součinitel	[$m^{0.5}/s$]
	n	drsnostní součinitel (součinitel drsnosti)	[-]
	R	hydraulický poloměr	[m]
	p	exponent	
		$p = 2{,}5 * \sqrt{n} - 0{,}13 - 0{,}75 * \sqrt{R} * (\sqrt{n} - 0{,}1)$	[-]

Ztráty třením při tlakovém režimu proudění pro uzavřený profil se zavádí ve tvaru: [26]

$$Z_t = i_e * dL = \lambda \frac{L}{D} \frac{v_x^2}{2g} \lambda = \frac{L}{4R} \frac{v_x^2}{2g} \qquad (2.\ 12)$$

kde	$\sum Z_t$	ztráty třením	[m]
	λ	součinitel tření	[-]
	L	délka potrubí spodní výpusti (mezi profily)	[m]
	D	průměr potrubí výpusti D = 4*R	[m]
	R	hydraulický poloměr	[m]
	v_x	rychlost v potrubí výpusti	[m/s]
	g	gravitační zrychlení	[m/s^2]

V diplomové práci se součinitel ztráty třením stanoví podle vzorce s širším rozsahem platnosti, aby byly splněny podmínky platnosti vzorce ve všech situacích. Pro stanovení součinitele ztráty třením se volí vztah podle Frenkela: [26]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 * log\left[\left(\frac{6{,}81}{Re}\right)^{0{,}9} + \left(\frac{\Delta}{3{,}7*D}\right)^{1}\right] \quad \text{s podmínkou Re} > 4 * 10^3 \qquad (2.\ 13)$$

kde	λ	součinitel tření	[-]
	D	průměr výpusti D = 4*R	[m]
	Re	Reynoldsovo číslo	[-]
	Δ	hydraulická drsnost potrubí (pro plast/sklo 0,000003)	[m]

Reynoldsovo číslo definuje vztah: [26]

$$Re = \frac{vD}{\nu_x} = \frac{v*4R}{\nu_x} \quad (2.14)$$

kde	ν	kinematická viskozita (závislá na teplotě vody)	[m^2/s]
	D	průměr výpusti D = 4∗R	[m]
	v_x	rychlost v potrubí výpusti	[m/s]
	R	hydraulický poloměr	[m]

Mezi Chézyho rychlostním součinitelem, součinitelem tření a součinitelem drsnosti platí vztah: [26]

$$\frac{v}{v*} = \frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{n*\sqrt{g}} = \sqrt{\frac{8}{\lambda}} \quad (2.15)$$

kde	C	Chezyho rychlostní součinitel	[$m^{0.5}/s$]
	n	drsnostní součinitel	[-]
	R	hydraulický poloměr	[m]
	λ	součinitel tření	[-]
	v	rychlost	[m/s]
	v*	třecí rychlost	[m/s]

Ztráty místní vznikají důsledkem deformace rychlostního pole, které se mění při existenci změny lokálních poměrů, jako při zúžení nebo rozšíření. Ztráty místní se vyjadřují jako část rychlostní výšky: [26]

$$\sum Z_m = \sum(\zeta_x \frac{v_x^2}{2g}) \quad (2.16)$$

kde	Z_m	ztráty místní	[m]
	ζ_x	součinitel místní ztráty	[-]
	v_x	rychlost v profilu ztráty	[m/s]
	g	gravitační zrychlení	[m/s^2]

Pro otevřená koryta jsou ztráty místní nejčastěji způsobena změnou průřezu. Ztráty změnou průřezu se vyjadřují podle vztahu:

$$Z_m = \zeta_m * \left|\alpha * \frac{v_d^2 - v_h^2}{2g}\right| = \pm\zeta_m * (\alpha * \frac{v_d^2 - v_h^2}{2g}) \quad (2.17)$$

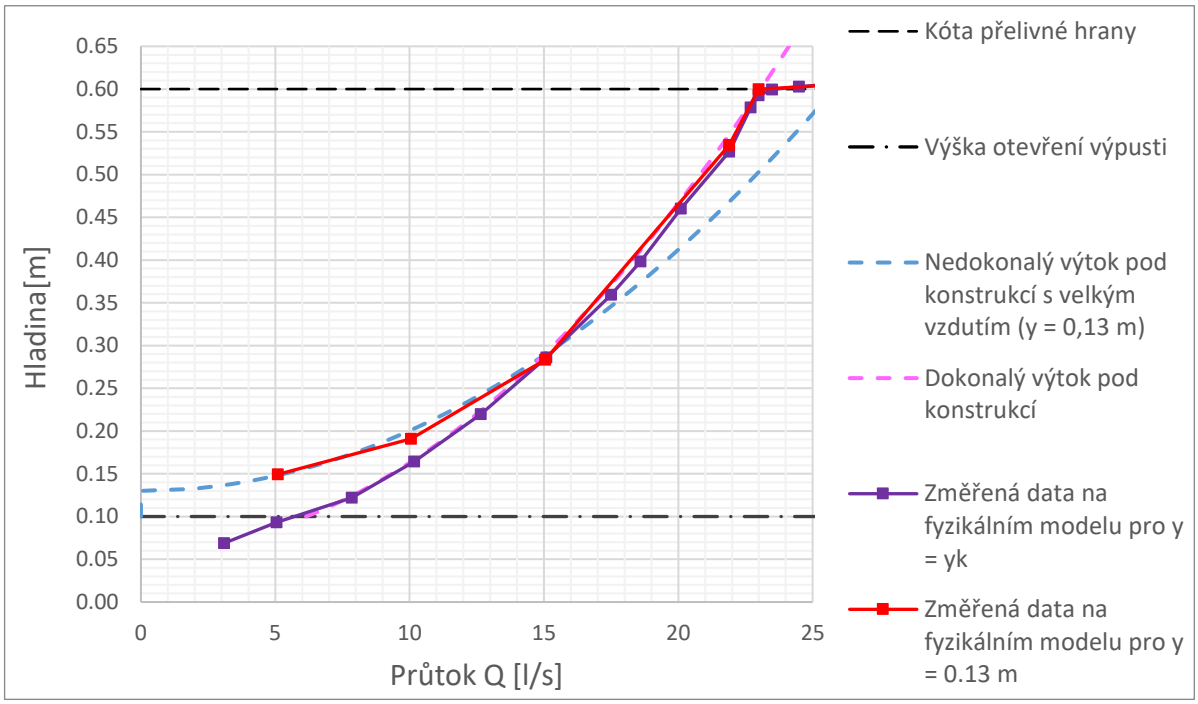
kde	Z_m	ztráty místní	[m]
	ζ_x	součinitel místní ztráty	[-]
	v_d	rychlost v dolním profilu	[m/s]
	v_h	rychlost v horním profilu	[m/s]
	g	gravitační zrychlení	[m/s^2]

Příloha 5 – Doplňkové výpočty

Jelikož nebyla změřena dolní okrajová podmínka hloubky dolní vody pro obě výšky otevření výpusti 0,1 m a 0,06 m, nebylo možné zcela posoudit vliv zpětného vzdutí dolní vody na průběh hladiny ve sdruženém objektu a na kapacitu sdruženého objektu. I přesto se provedl pro ukázku výpočet vlivu zpětného vzdutí na průběh konzumční křivky výpusti pro výšku otevření výpusti 0,1 m a výpočet se uvedl v Příloze 5, mimo hlavní část textu jako jeho doplněk.

Graf 34 zobrazuje závislost průtoku na změřené horní hladině pro dolní okrajovou podmínku y = 0,13 m. Dále zobrazuje závislost průtoku na teoreticky stanovené horní hladině pro postup nedokonalým výtokem pod konstrukcí – velké vzdutí a dokonalý výtok pod konstrukcí. Součinitelé pro nedokonalý výtok pod konstrukcí nabývají hodnoty $\mu = 0{,}82$, $\varepsilon = 1$, $\xi_m = 0{,}5$, $\xi_t = 0$, $\alpha = 1$, $g = 9{,}81\ m/s^2$, $b_v = 0{,}1$ m i $a_v = 0{,}1$ m. Součinitelé pro dokonalý výtok pod konstrukcí činí $\mu = 0{,}7$ a $\varepsilon = 0{,}7$.

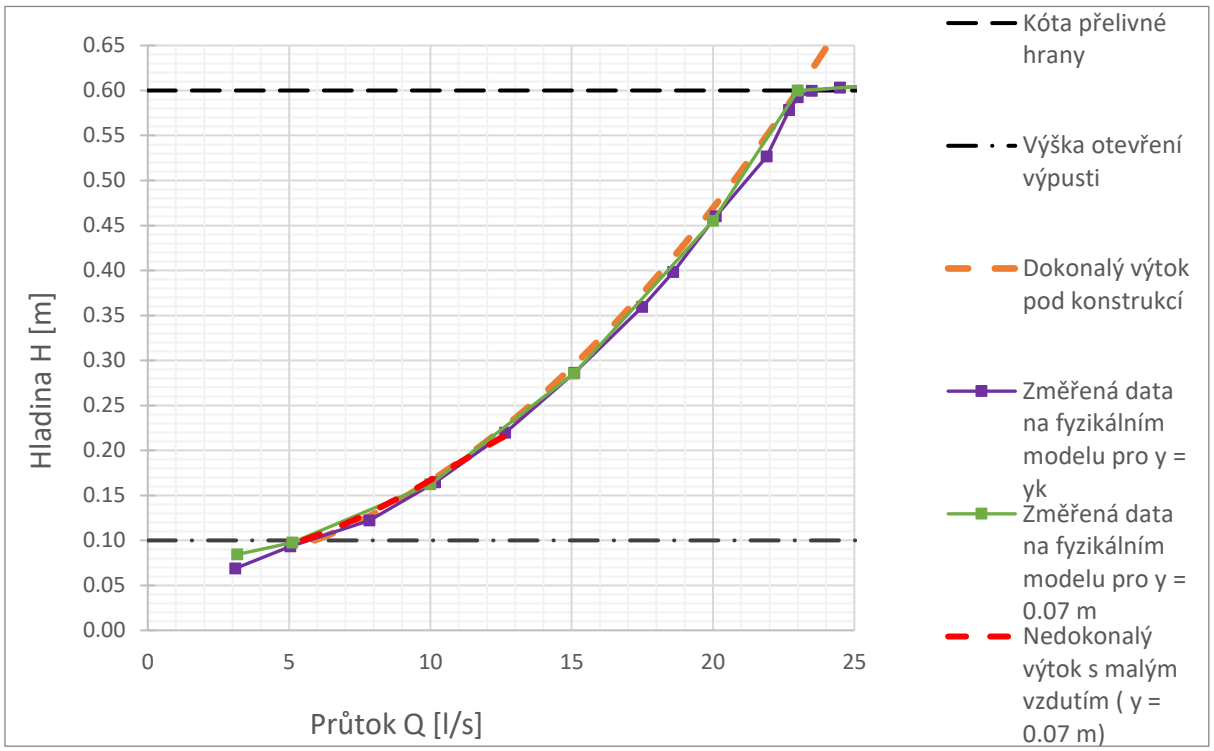
Pro nižší průtoky teoreticky stanovená křivka pro nedokonalý výtok velkým vzdutím kopíruje průběh změřené křivky. Avšak od určitého průtoku se průběh teoreticky stanovené křivky nedokonalého výtoku liší od průběhu změřené křivky. Na fyzikálním modelu proud výpustí přetlačuje zpětné vzdutí dolní vody natolik, že přechází nedokonalý výtok pod konstrukcí až na dokonalý výtok pod konstrukcí. Proud výpustí odtlačuje vodu dále po proudu, kde vzniká vodní skok. Proto i v tomto momentě kopíruje průběh křivky změřených dat křivku dokonalého výtoku.



Graf 34 – Konzumční křivka výpusti pro dolní okrajovou podmínku y = 0,13 m

Graf 35 zobrazuje závislost průtoku na změřené horní hladině pro dolní okrajovou podmínku y = 0,07 m. Dále zobrazuje závislost průtoku na teoreticky stanovené horní hladině pro postup nedokonalým výtokem pod konstrukcí – malé vzdutí a dokonalý výtok pod konstrukcí. Součinitelé pro nedokonalý výtok pod konstrukcí nabývají hodnoty $\mu = 0{,}64$, $\varepsilon = 0{,}65$, $\xi_m = 0{,}03$, $\xi_t = 0$, $\alpha = 1$, $g = 9{,}81\ m/s^2$, $b_v = 0{,}1$ m i $a_v = 0{,}1$ m. Součinitelé pro dokonalý výtok pod konstrukcí činí $\mu = 0{,}7$ a $\varepsilon = 0{,}7$.

Protože změřený průběh hladiny pro dolní okrajovou podmínku y = 0,07 m kopíruje průběh změřené hladiny pro dolní okrajovou podmínku y= yk, usuzuje se, že se za výtokem výpustí se tvoří hloubka blízká zúžené hloubce. Do určitého průtoku křivka změřených dat kopíruje průběh teoretické křivky pro nedokonalý výtok pod konstrukcí s malým vzdutím. Od určitého průtoku proud výpustí odtlačuje dolní vodu dále po proudu, čímž vzniká zúžená hloubka a nedokonalý výtok přechází na dokonalý výtok pod konstrukcí. Dále po proudu se tvoří vodní skok ve sdruženém objektu nebo těsně za výtokem z odpadu.

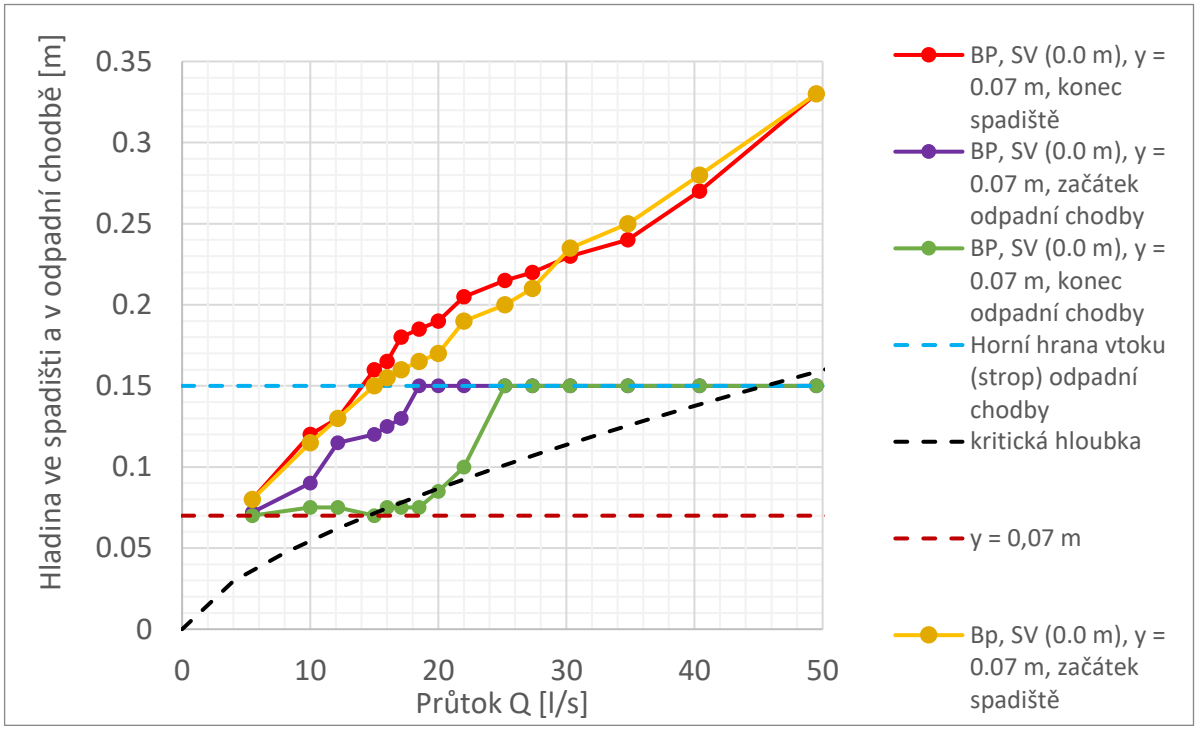


Graf 35 – Konzumční křivka výpusti pro dolní okrajovou podmínku y = 0,07 m

Příloha 6 – Doplňkové výpočty

Jelikož nebyla změřena dolní okrajová podmínka hloubky dolní vody jiná než y = 0.07 m, nebylo možné zcela posoudit vliv zpětného vzdutí dolní vody na průběh hladiny ve sdruženém objektu a na kapacitu sdruženého objektu. I přesto se provedl pro ukázku výpočet vlivu zpětného vzdutí na průběh hladiny ve spadišti a v odpadní chodbě pro stav nezahlceného vtoku odpadní chodby. Při výpočtu se přebraly předpoklady a závěry z výpočtu pro dolní okrajovou podmínku y = y_k. Výpočet se uvedl v Příloze 6, mimo hlavní část textu jako jeho doplněk.

Při stanovení průběhu hladiny ve spadišti a v odpadní chodbě se vycházelo z výchozího profilu na konci odpadní chodby. Pokud byla kritická hloubka y_k nižší než hloubka dolní vody y = 0,07 m, pak se jako výchozí hloubka volila hloubka dolní vody y = 0,07 m. V opačném případě se jako výchozí hloubka volila kritická hloubka. Graf 36 zobrazuje závislost hladiny ve spadišti (konec spadiště) a v odpadní chodbě (začátek a konec odpadní chodby) na průtoku (poloha vyznačena na Obr. 39).



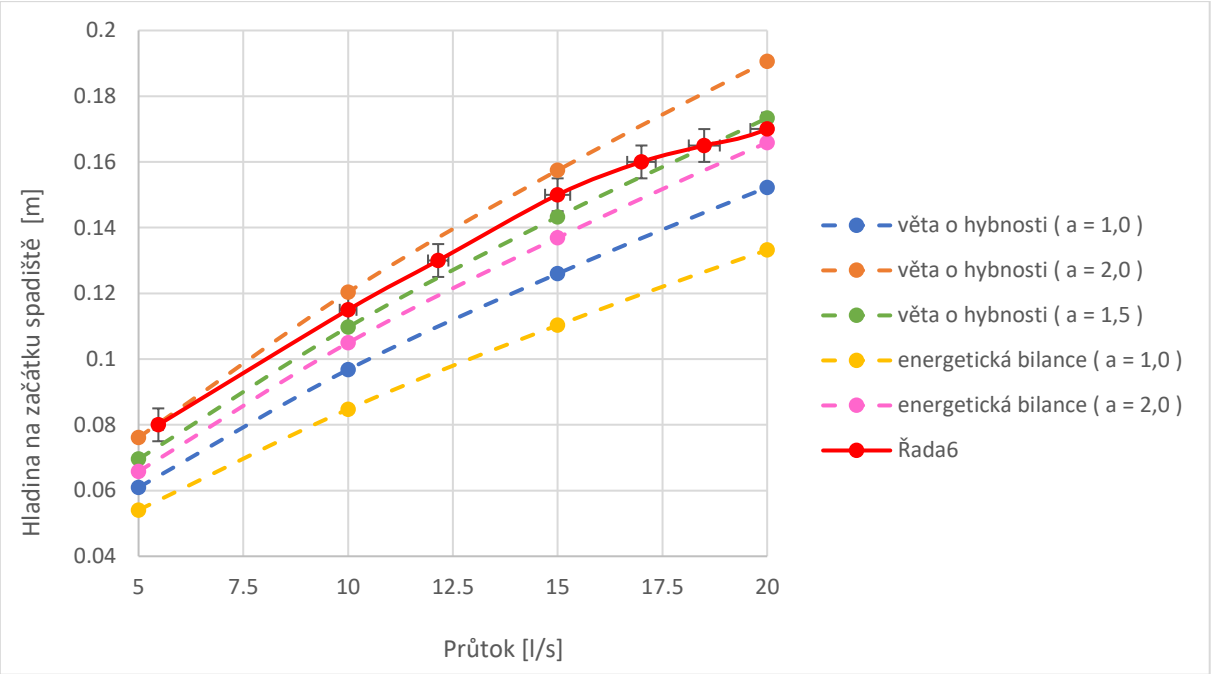
Graf 36 – Závislost změřené hladiny ve spadišti (začátek, konec) a v odpadu (začátek, konec) na průtoku

Graf 37 zobrazuje průběh hladiny ve spadišti a v odpadní chodbě pro postup energetické bilance a pro postup věty o hybnosti ve spadišti (pro Cor. číslo α = 1,0/1,5/2,0), dále průběh hladiny v odpadní chodbě pro postup energetické bilance (metody po úsecích, pro Cor. číslo a =1,0) a změřený průběh hladiny pro průtok Q = 10 l/s. Graf 38 porovnává změřenou hladinu (hloubku) na začátku spadiště s hladinami (hloubkami) stanovenými zmíněnými výpočetními postupy.

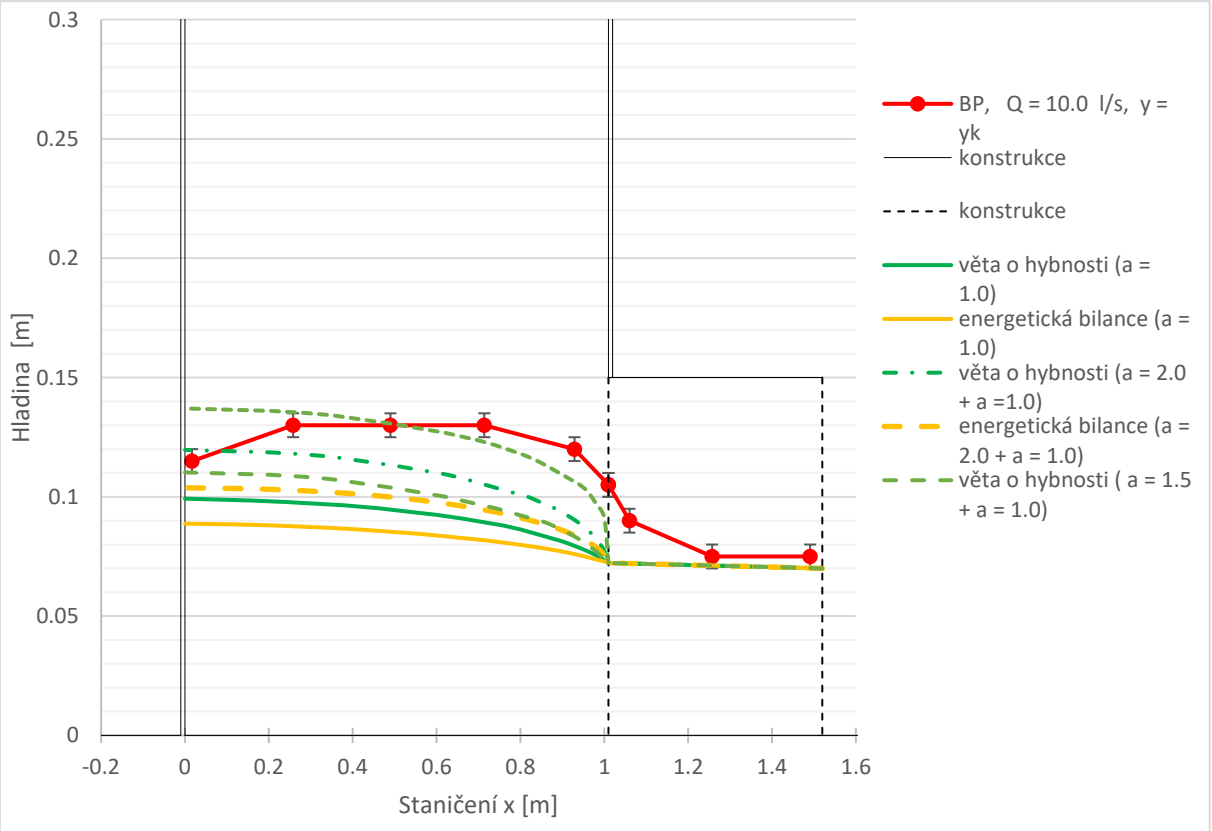
Z grafů vyplývá následující. Teoretický průběh hladiny v odpadní chodbě lze nejen stanovit postupy pro nerovnoměrné proudění o volné hladině (př. metoda po úsecích), ale rovněž i postupy založenými na větě o hybnosti za splnění dříve uvedených předpokladů. Jako pro dolní okrajovou podmínku $y = y_k$, se netvoří na rozmezí spadiště a odpadu stejná změřená hloubka jako teoretická hloubka. Teoretický průběh v odpadní chodbě nekoresponduje se změřeným průběhem hladiny.

Taktéž teoretický průběh hladiny ve spadišti nekoresponduje s průběhem hladiny změřené na fyzikálním modelu. Pokud by se uvažoval pro stanovení hodnoty Coriolisova čísla jako výchozí předpoklad začátek spadiště, pro postup věty o hybnosti by Coriolisovo číslo nabývalo hodnoty mezi $\alpha = 1,5$ až $\alpha = 2,0$. Ale kdyby se uvažoval pro stanovení hodnoty Coriolisova čísla jako výchozí předpoklad průběh hladiny ve spadišti po celé jeho délce, nabývalo by Corioliosvo číslo mnohem vyšší hodnoty. Pro postup energetické bilance nabývá Coriolisovo číslo dokonce nad hodnotu $\alpha = 2$. Pro stanovení teoretického průběhu hladiny ve spadišti je lepší aplikovat postup založený na větě o hybnosti než na energetické bilanci. Zásadním důvodem je vytvoření nerovnoměrného prostorového proudění. Ke konci odpadní chodby se změřený průběh hladiny na modelu přibližuje k teoreticky stanovenému průběhu hladiny v odpadní chodbě.

Graf 39 porovnává teoreticky stanovenou hloubku v profilu napojení odpadní chodby na spadiště (aplikace metody po úsecích v odpadním objektu, výchozí hloubka $y= y_k$, pro Cor. číslo $\alpha = 1,0/ 1,5/ 2,0$), dále teoreticky stanovenou hloubku pro hloubku dolní vody $y = 0.07$ m (aplikace metody po úsecích v odpadním objektu, výchozí hloubka $y= 0.07$ m, pro Cor. číslo $\alpha = 1,0$) a změřenou hloubku na fyzikálním modelu (konec spadiště, začátek odpadu). Graf dále zobrazuje křivku hloubky odpovídající dvojnásobnému průtoku a křivky s doporučenými násobky kritické hloubky dle směrnice. Změřený průběh hladiny se přibližuje k průběhu křivky dvojnásobku kritické hloubky. Protože se liší hodnota teoreticky stanovené hloubky od změřené hloubky na modelu v profilu napojení odpadu na spadiště, je na straně bezpečnosti zvážit doporučení pro návrh sdruženého objektu. Rozdílnost změřeného průběhu hladiny s křivkami doporučených hodnot je dána konstrukčním řešením fyzikálního modelu a vlastnostmi proudění.



Graf 37 – Porovnání teoretické hladiny na začátku spadiště pro různé postupy se změřenou



Graf 38 – Teoretický průběh hladiny stanovený různými postupy a změřený průběh hladiny

Vysvětlení legendy grafů č. 17 až č. 20

věta o hybnosti (a = 1,5 + a = 1,0)

pro výpočet ve spadišti se použil postup Ven te Chow s hodnotou Coriolisova čísla α = 1,5 a pro výpočet v odpadní chodbě se použila metoda po úsecích s hodnotou Coriolisova čísla α = 1,0

věta o hybnosti (a = 1,5)

pro výpočet ve spadišti se použil postup Ven te Chow s hodnotou Coriolisova čísla α = 1,5 a pro výpočet v odpadní chodbě se použila metoda po úsecích s hodnotou Coriolisova čísla α = 1,5

energetická bilance (a = 2,0 + a = 1,0)

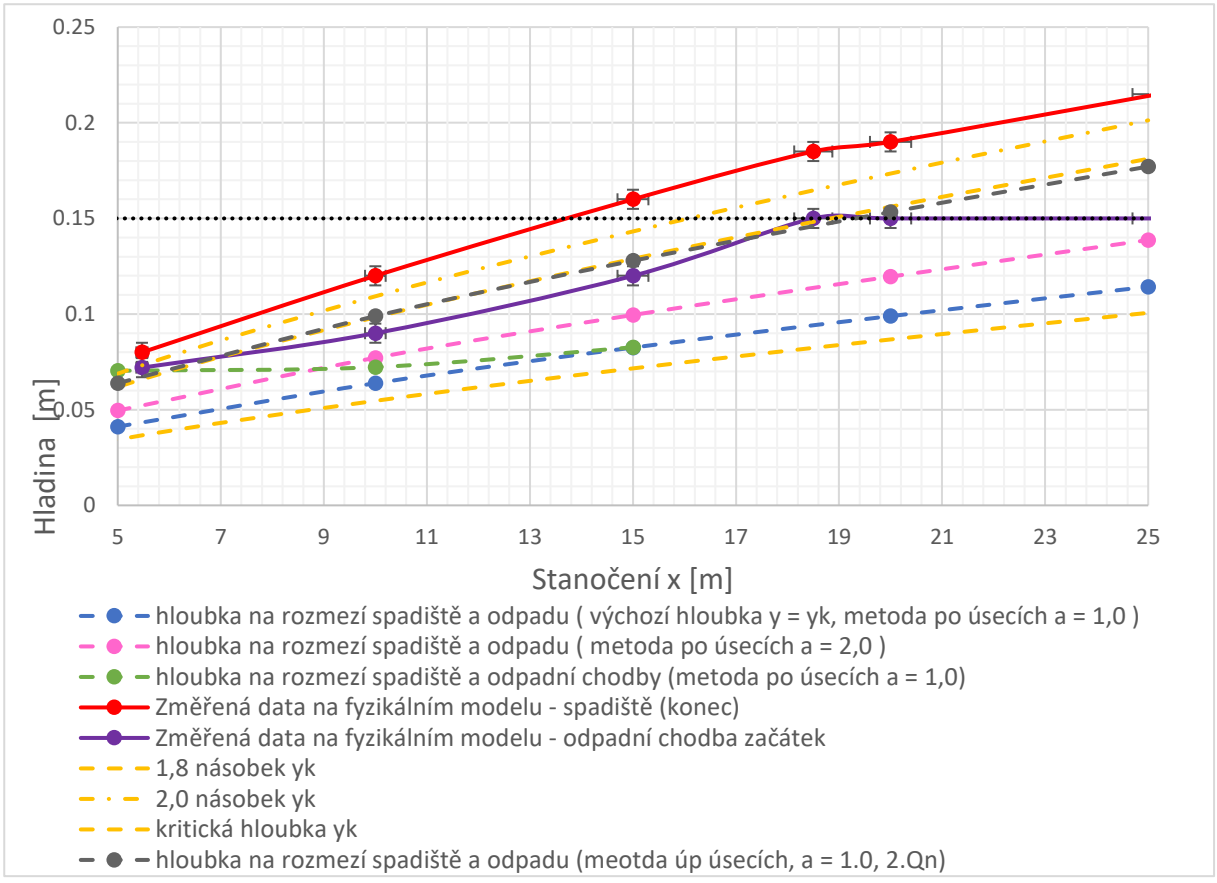
pro výpočet ve spadišti se použil postup energetické bilance s Coriolisova čísla α = 2,0 a pro výpočet v odpadní chodbě se použila metoda po úsecích s hodnotou Coriolisova čísla α = 1,0

energetická bilance (a = 1,0)

pro výpočet ve spadišti se použil postup energetické bilance s Coriolisova čísla α = 1,0 a pro výpočet v odpadní chodbě se použila metoda po úsecích s hodnotou Coriolisova čísla α = 1,0

BP, Q = 10,0 l/s, y = yk

experiment „bezpečnostní přeliv se zavřenou výpustí“, průtok 10 l/s, dolní okrajová podmínka y= yk



Graf 39 – Teoretický i změřený průběh hladiny na začátku odpadní chodby (rozmezí spadiště a odpadní chodby) a doporučená hloubka hloubky spadiště dle směrnice v závislosti na průtoku