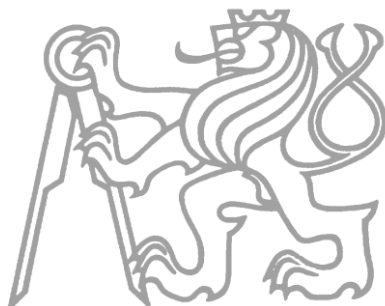


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA HYDRAULIKY A HYDROLOGIE



HYDRAULICKÉ ŘEŠENÍ SDRUŽENÉHO OBJEKTU NA STOKOVÉ SÍTI
V LOKALITĚ TÁBOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Tereza Regnerová

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Vojtěch Bareš, Ph.D.

Leden 2017



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

studijní program: Stavební inženýrství
studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby
akademický rok: 2016/2017

Jméno a příjmení diplomanta: Bc. Tereza Regnerová
Zadávací katedra: Katedra hydrauliky a hydrologie
Vedoucí diplomové práce: Ing. Vojtěch Bareš, Ph.D.
Název diplomové práce: Hydraulické řešení sdruženého objektu stokové sítě v lokalitě Tábor
Název diplomové práce
v anglickém jazyce: Hydraulics of sewer structure in city of Tábor

Rámcový obsah diplomové práce: Rešerše a kategorizace typů spadišť a odlehčovacích komor jednotné stokové sítě, rešerše dat z výzkumu obdobných objektů, rešerše základních kritérií návrhu a vstupních parametrů pro návrh, experimentální práce na fyzikálním modelu spadiště, měření hydraulických veličin a fotodokumentace, teoretické hydraulické výpočty, vyhodnocení výsledků, zobecnění výsledků a doporučení pro návrh objektů daného typu.

Datum zadání diplomové práce: 7.10.2016 Termín odevzdání: 8.1.2017
(vyplňte poslední den výuky přísl. semestru)

Diplomovou práci lze zapsat, kromě oboru A, v letním i zimním semestru.

Pokud student neodevzdal diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat diplomovou práci podruhé. Studentovi, který při opakovaném zápisu diplomovou práci neodevzdal v určeném termínu a tuto skutečnost řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, se ukončuje studium podle § 56 zákona o VŠ č. 111/1998 (SZŘ ČVUT čl 21, odst. 4).

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

.....
vedoucí diplomové práce

.....
vedoucí katedry

Zadání diplomové práce převzal dne: 7.10.2016

.....
diplomant

Formulář mtno vyhotovit ve 3 výtiscích – 1x katedra, 1x diplomant, 1x studijní odd. (zašle katedra)

Nejpozději do konce 2. týdne výuky v semestru odešle katedra 1 kopii zadání DP na studijní oddělení a provede zápis údajů týkajících se DP do databáze KOS.

DP zadává katedra nejpozději 1. týden semestru, v němž má student DP zapsanou.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně a veškeré podklady použité při jejím zpracování jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne 8. 1. 2017

Podpis:

Děkuji svému vedoucímu Ing. Vojtěchu Barešovi, Ph.D. za odborné vedení mé diplomové práce. Děkuji také všem, kteří se mnou spolupracovali na stavbě modelu, především Ing. Tomáši Pickovi, Ph.D. za odborné konzultace a pomoc. Na závěr chci poděkovat své rodině za podporu během studií.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá posouzením návrhu sruženého objektu na stokové síti ve městě Tábor. Jedná se o systém spadišť a odlehčovacích komor, který nahrazuje původní stavbu. Kvůli limitujícím místním podmínkám se jedná o atypické řešení a modelový výzkum je tedy jeho nutnou součástí. Cílem výzkumu je posouzení funkce spadiště, kapacity bočních sběrných kanálů a zhodnocení navrženého řešení, včetně vyjádření doporučujících návrhových variant.

Posouzení je založeno na teoretické rešerši, na jednodimenzionálním popisu rozhodujících hydraulických jevů a na metodách fyzikálního hydraulického výzkumu v modelovém měřítku 1:10. Numerické výsledky a experimentální výstupy ukazují výsledné hodnoty provzdušnění, trajektorie paprsku, účinnosti disipace energie ve spadišti, silové namáhání konstrukce vodním paprskem a příčné a podélné profily hladin. V závěru je provedeno vyhodnocení, na jehož základě je navrhovaný stav posouzen jako vyhovující, a jsou uvedena konkrétní doporučení pro optimalizaci návrhu.

Klíčová slova: boční přeliv, disipace energie, odlehčovací komora, provzdušnění, sběrný žlab, spadiště, trajektorie paprsku

Abstract

The subject of this diploma thesis is an assessment of designed compounded structure in the Tábor town. It is a system of drop manholes and overflows, which is supposed to replace the original structure. Due to limited space conditions the solution is atypical and model investigation is necessary. The aim of the research is to assess the function of drop manholes, capacity of side channels and evaluation of the designed solution including proposed modifications.

The assessment is based on the theoretical part of this thesis, on the one-dimensional expression of decisive hydraulic events and also on the physical investigation on the model in scale 1:10. Numerical results and experimental outcomes show the resulting values of air entrainment, jet trajectory, energy dissipation in drop manholes, loading of the structure by water jet and cross-sectional and longitudinal free-surface flow. In the conclusion, the evaluation is made. Therefore, the design is found applicable and the optimizing modifications are proposed.

Key words: air entrainment, drop manhole, energy dissipation, sewer overflow, side channel, water jet trajectory

Obsah

Obsah.....	6
1. Úvod.....	8
1.1 Cíle práce.....	9
1.2 Struktura práce	9
2. Literární rešerše	10
2.1 Kategorizace typů spadišť a odlehčovacích komor na jednotné stokové síti	10
2.1.1 Spadiště	10
2.1.1.1 Spadiště s přímým nátokem.....	10
2.1.1.2 Spadiště s vírovým nátokem.....	13
2.1.2 Odlehčovací komory	15
2.2 Teoretické řešení základních hydraulických jevů	18
2.2.1 Pro vzdušnění proudu.....	18
2.2.2 Trajektorie paprsku.....	20
2.2.3 Režimy dopadu paprsku	21
2.2.4 Účinnost tlumení energie.....	22
2.2.5 Sběrné kanály – podélný profil hladiny.....	24
2.2.6 Sběrné kanály – příčný profil hladiny	25
3. Fyzikální model.....	27
3.1 Stávající situace a návrhový stav.....	27
3.2 Modelové měřítko	28
3.3 Návrhové průtoky.....	29
3.4 Měřené veličiny	30
3.4.1 Průtokové stavy	30
3.4.2 Hloubky proudění.....	30
3.5 Popis fyzikálního modelu.....	30
3.5.1 Přítokové potrubí.....	30
3.5.2 Spadiště 1	32
3.5.2.1 Varianty řešení	32
3.5.3 Uklidňovací nádrž s přelivnou hranou, sběrný kanál	33
3.5.4 Spojovací potrubí	33
3.5.5 Spadiště 2	33
3.5.6 Rozdělovací komora s odlehčením, sběrný kanál	33
3.5.7 Odtokové potrubí.....	34
4. Výsledky měření.....	35
4.1 Přítokové potrubí.....	35
4.2 Spadiště 1	37

4.2.1	Varianty	41
4.3	Spadiště 2	44
4.4	Spojovací potrubí	47
4.5	Uklidňovací nádrž s bočním přelivem.....	48
4.6	Rozdělovací komora s bočním přelivem	53
4.7	Shrnutí výsledků.....	60
5.	Doporučení	61
6.	Závěr.....	62
7.	Literatura	63
8.	Seznam obrázků	65
9.	Seznam tabulek.....	67
10.	Seznam symbolů.....	68
	Příloha	71

1. Úvod

Stoková síť sloužící k odvedení srážkových a splaškových vod se skládá z mnoha objektů, z nichž každý plní svou specifickou funkci. Dispozice sítě je závislá na členitosti terénu a často je potřeba překonávat výrazný hydraulický spád, což vyžaduje objekty, jejichž funkcí je tlumení mechanické energie – spadiště. Při řešení konkrétní lokality je třeba zohledňovat vazby jednotlivých navazujících objektů. Výsledný návrh je vždy unikátní vzhledem k daným místním podmínkám, návrhovým požadavkům, geologii podloží a v neposlední řadě vzhledem k ekonomickému hledisku záležitosti.

Objekty na stokové síti jsou již po mnoho let předmětem zkoumání. Snahou je popsat hydraulické děje co možná nejpřesněji, aby byl výsledkem takový technický návrh, který by předešel jevům snižujícím funkčnost objektů. K problematice spadišť existuje celá řada literárních zdrojů. Přesto, jak zmiňuje Chanson [9], nebyla dosud spadiště systematicky prozkoumána a popsána.

V řešené lokalitě v Táboře se nachází objekt spadiště, který neplní dostatečně svou funkci. Stávající stav je nevyhovující z hydraulického hlediska. Při velkých srážkových událostech nezvládá provést průtok bez škod na přilehlých pozemcích. Cílem projektu je navrhnout vyhovující řešení a zlepšit odtokové poměry v dané lokalitě, včetně minimalizace zatížení recipientu – řeky Lužnice. Do spadiště přitéká voda velmi vysokou rychlostí, řešeným problémem je tedy především dostatečné tlumení energie ve spadišti a posouzení sil působících na stavební konstrukce. Součástí posouzení je řešení dvojího rozdělení průtoku v lokalitě podle požadavků provozovatele sítě. Proto projekt rovněž řeší odlehčení bočními přelivy a odtok vody pomocí bočních sběrných kanálů. Problém bočních sběrných kanálů byl v minulosti také řešen, přesto je v literatuře jen omezené množství experimentálních výzkumů na toto téma [14].

Pro posouzení návrhového řešení bylo přikročeno ke stavbě fyzikálního modelu, protože situační návrh projektu a dělení průtoků je natolik specifickou záležitostí, že vyžaduje modelové posouzení. Výpočet byl řešen pomocí 1D výpočetních postupů a shoda byla ověřena na modelových datech. K užití komplexnějších metod nebylo přistoupeno, protože jsou obtížně řešitelné a vyžadují množství vstupních a kalibračních dat a okrajových podmínek.

1.1 Cíle práce

Cílem práce je zkonstruování fyzikálního modelu sdruženého objektu, naměření hydraulických veličin a provedení vyhodnocení. Konkrétními aspekty, kterými se tato práce zabývá, jsou:

- provzdušnění proudu v přímém úseku potrubí
- trajektorie paprsku a rozměry spadišť
- zatížení stěny spadiště hydrodynamickou silou
- účinnost tlumení mechanické energie ve spadišti
- průběh hladin ve sběrných žlabech

1.2 Struktura práce

Práce se skládá z teoretické a praktické části. Kapitola 2 je literární rešerší a je rozdělena do dvou podkapitol. Podkapitola 2.1 je obecná rešerše o typech spadišť a odlehčovacích komor. Podkapitola 2.2 popisuje na základě provedených výzkumů problematiku řešení hydraulických jevů, které se vyskytují na podobných typech sdružených objektů. Výzkumy uvedené v teoretické části pak slouží jako východisko pro hydraulická řešení v části praktické.

Praktická část se skládá z kapitoly 3 a 4. Kapitola 3 představuje popis projektu a modelu, návrhové veličiny a volbu modelového měřítka. Kapitola 4 se věnuje výsledkům hydraulických výpočtů v jednotlivých objektech.

Závěr práce obsahuje výsledek posouzení funkce sdruženého objektu v návrhovém stavu včetně navržení úprav, které by vedly ke zlepšení. Součástí výsledků práce je i vyhodnocení návrhových variant.

2. Literární rešerše

2.1 Kategorizace typů spadišť a odlehčovacích komor na jednotné stokové síti

2.1.1 Spadiště

Spadiště je objekt na stokové síti umožňující překonat velký hydraulický spád, který by znamenal v případě překonání pomocí trubního vedení překročení rychlosti proudění nad nejvyšší přípustnou hodnotu. Pro proudění v jednotné kanalizační síti je maximální přípustná rychlost stanovena na 5 m/s, dle normy ČSN 75 6101 [3]. Při vyšších rychlostech může docházet k narušování materiálu stoky a tím vést ke zkrácení životnosti stavby. Druhým problémem je změna hydraulického režimu. V úseku s vysokými rychlostmi je bystrinný režim proudění, při zmírnění sklonu potrubí pod tímto úsekem však může dojít k přechodu do říčního režimu a ke vzniku vodního skoku, který může zapříčinit zahlcení průtočného profilu a vést ke změně na tlakový režim proudění [11].

Opatřením k regulaci sklonu, a tedy i rychlostí je skluz či spadiště. Skluz je objekt se speciálně uloženým potrubím z odolnějšího materiálu, zpravidla zakončeným objektem na tlumení mechanické energie proudu. Využití skluzu dovoluje vést stoku pod větším sklonem při dodržení rychlosti do 10 m/s [3]. Tato práce se skluzu zabývá pouze okrajově, jelikož přírodní potrubí do řešeného objektu je *de facto* skluzem z litinového potrubí. Více se tímto tématem ve svých pracích zabývá například H. Chanson [10] či M. Pfister a W. Hager [15].

Spadiště dovoluje zmírnit sklon stoky, čímž zmenšuje rychlost proudění. Mechanickou energii proudu tlumí dopadem na dno šachty a disipací energie v navazujícím úseku potrubí nebo v uklidňovací komoře.

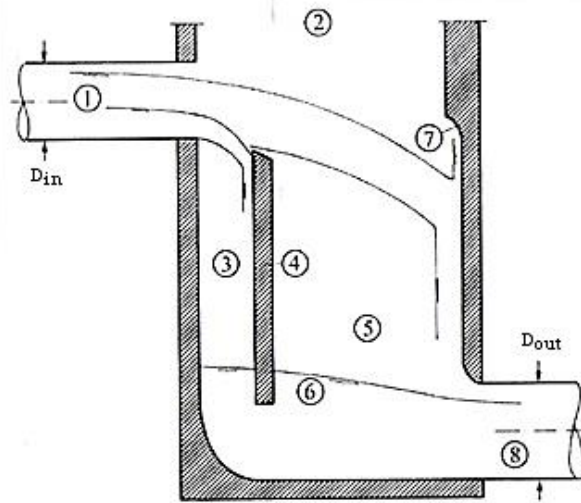
Norma doporučuje volit maximální výšku spadiště v závislosti na světlosti stoky, na níž je spadiště navrženo. Při jmenovité světlosti stoky DN 250 až DN 400 nemá výška spadiště přesahovat 4 m, při jmenovité světlosti stoky DN 500 až DN 600 výšku 3 m [3]. V praxi se v této škále pohybuje řada prefabrikovaných spadišť. Při jiných výškách a velikostech stok se navrhují atypické konstrukce, navržené v souladu s požadavky provozovatele stokové sítě, ty jsou ověřeny výsledky hydraulického výzkumu.

2.1.1.1 Spadiště s přímým nátokem

Spadiště s přímým nátokem bývají využívána pro převýšení do 7 metrů, v krajních případech pro převýšení až do 10 metrů. Pro překonání vyššího spádu je vhodnější využít jiné konstrukce, které omezují nežádoucí jevy, které se u spadišť s přímým nátokem objevují.

Norma doporučuje vybavení spadiště trubním obtokem pro převod malých vod za bezdeštného stavu (Obr. 1). Toto řešení je vhodné - hygienického hlediska – i z hlediska omezení hluku a zápachu. Dochází k menšímu rozstříku a provzdušnění proudu. Nejmenší jmenovitá světlost obtoku je DN 300.

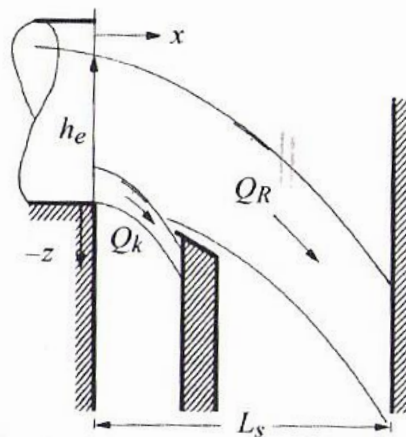
Požadavkem tohoto řešení je říční či slabě bystrinný režim proudění. Pro přítoky s vysokým Froudovým číslem, jako je tomu v řešeném projektu, je tento způsob řešení nevhodný. U spadišť na dešťové kanalizaci se vertikální obtok obvykle neprovádí.



Obr. 1 – Vzorový řez spadištěm/popis spadiště; 1 - přítokové potrubí, 2 - vstup do šachty, 3 - bezdeštný obtok, 4 - dělící stěna, 5 - spadišťová šachta, 6 - dno šachty/vodní polštář, 7 - deflektor, 8 - odtokové potrubí [7]

Na přítoku je možné připustit proudění říční i bystrinné. Při vyšším proudění – za dešťových průtoků - přeskakuje vodní paprsek obtokové potrubí a vtéká do hlavní šachty. Na stěně nad místem dopadu paprsku se obvykle používá prvek zvaný deflektor, který usměrňuje paprsek tak, aby se neodrážel směrem nahoru a nenamáhal zbytečně stropní konstrukci. Po dopadu na stěnu padá paprsek v podstatě kolmo na dno šachty. Tato konstrukce je výhodná z hlediska malé rychlosti na odtoku z uklidňovací nádrže.

Přítokové potrubí může být kruhové o různých průměrech vzhledem k rozměrům spadiště. Může být také řešeno jako kanál s obdélníkovým průřezem, jehož šířka odpovídá šířce spadiště [19].

Obr. 2 – Návrhové průtoky; Q_k – bezdeštný, Q_R – dešťový [7]

Pro návrh spadiště je důležité předem určit hodnotu návrhového bezdeštného a dešťového průtoku (Obr. 2). Parametry popisující přítokovou stoku jsou sklon i , Manningův součinitel drsnosti n a poloměr stoky D . Hloubka kritického proudění h_c , jakož i hloubka rovnoměrného proudění h_N se dají vypočítat pomocí těchto rovnic [7] (uvedené rovnice jsou odvozené pro kruhové potrubí):

$$y_N = 0,926 \cdot [1 - (1 - 3,11q_N)^{1/2}]^{1/2} \quad (2-1)$$

, kde y_N je poměr plnění stoky při rovnoměrném proudění, q_N je měrný průtok rovnoměrného proudění.

$$q_N = \frac{n \cdot Q}{i_0^{1/2} \cdot D^{8/3}} \quad (2-2)$$

$$h_N = y_N \cdot D \quad (2-3)$$

$$h_c = \left[\frac{Q}{(g \cdot D)^{1/2}} \right]^{1/2} \quad (2-4)$$

, kde Q je průtok, n je Manningův drsnostní součinitel, i_0 je sklon stoky, D je průměr stoky a g je tíhové zrychlení.

a hodnota Froudova čísla:

$$Fr = \frac{Q}{(g \cdot D \cdot h_N^4)^{1/2}} \quad (2-5)$$

Bezrozměrný průtokový součinitel spadiště, v případě vyjádření pro odtokové poměry nazývaný Froudovo číslo spadiště, se vyjadřuje jako [8]:

$$Q^* = \frac{Q}{\sqrt{g \cdot D_{in}^5}} \quad (2-6)$$

, kde Q je průtok, g je tíhové zrychlení a D_{in} je průměr přítokové stoky.

Hodnota Q^* pro maximální průtok byla vyčíslena na $Q^* = 1,44$.

V případě vyjádření Q^* ve vztahu k průměru odtokové stoky D_{out} se hovoří o Froudově čísle spadiště.

V případě velmi malých hodnot Q nebo Q^* má padající paprsek ve spadišti kruhový tvar a v tomto tvaru také dopadá na vodní hladinu. Při větších hodnotách získává paprsek tvar podkovy s otevřenými konci směřujícími ke vtokové stěně spadiště [16].

Prostor spadišťové šachty je nutné navrhovat v dostatečných rozměrech. Některá navržená spadiště nejsou efektivní právě kvůli nedodržení minimálních požadavků na rozměry.

Minimální doporučené rozměry:

- šířka spadišťové šachty ≥ 1 m
- délka spadišťové šachty ≥ 2 m
- rozměr obtoku $\geq 0,3$ m

Nejvyšší doporučená výška spadiště s přímým nátokem se uvádí 7 až 10 metrů. Při přesazení této výšky může docházet k těmto jevům:

- vysoká míra provzdušnění proudu
- pulzace proudění
- neefektivní tlumení energie
- hlučnost

Důležité je zvolit i dostatečný rozměr odtokového potrubí. Dolní voda výrazně ovlivňuje správné fungování spadiště. Je potřeba zajistit, aby potrubí mělo dostatečnou kapacitu, aby ani při provzdušněném proudění na odtoku nedošlo k zahlcení potrubí a přerušení přívodu vzduchu do prostoru spadiště.

2.1.1.2 Spadiště s vírovým nátokem

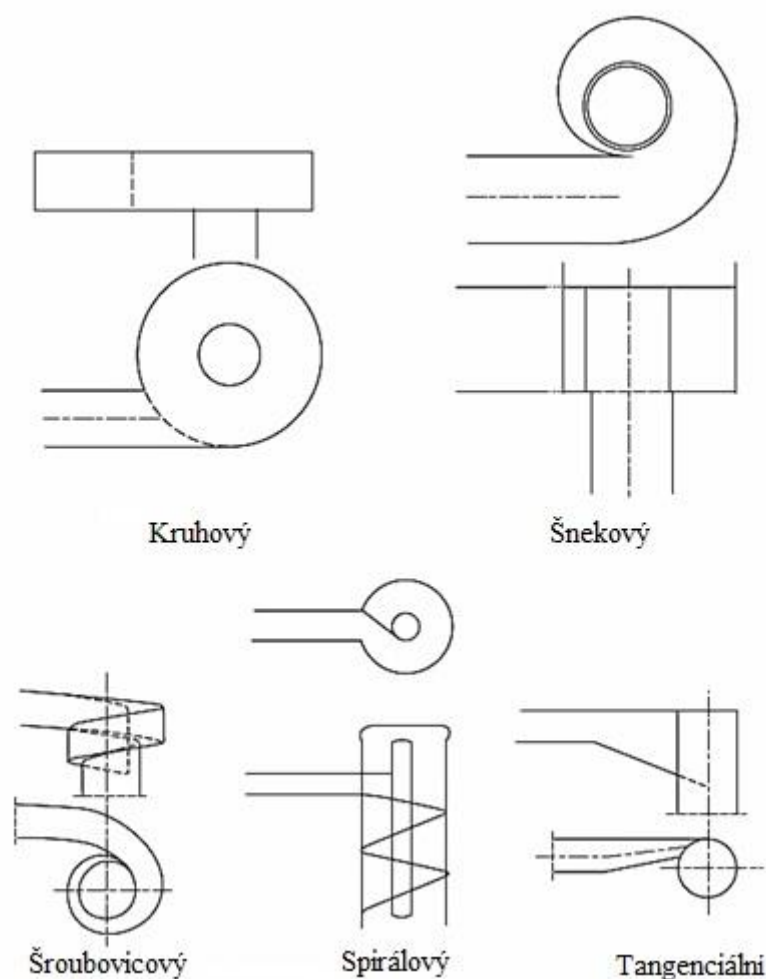
Spadiště s vírovým nátokem je vhodné použít pro převýšení větší než 5 metrů. Na rozdíl od spadišť s přímým nátokem, spadiště s vírovým nátokem využívá k tlumení energie tření mezi kapalinou a stěnou. Tato situace vzniká díky nátoku, kdy se voda pohybuje v kruhovém pohybu podél stěn šachty a vytváří uprostřed vzduchové jádro, jehož tlak je mírně vyšší než atmosférický. Tento typ

spadišť je charakteristický nižší mírou provzdušnění proudu, kapalná a plynná fáze zůstávají v šachtě rozděleny.

Pro správné fungování spadiště je nutné zajistit na přítoku stabilní říční ($Fr < 0,7$), nebo bystrinné proudění ($Fr > 1,5$). Geometrie návrhu se liší podle typu proudění na nátoku [19].

Existuje několik používaných typů nátoků (Obr. 3):

- kruhový
- tangenciální
- šroubovicový
- šnekový
- spirálový



Obr. 3 – Typy vírových nátoků [19]

Spadiště s vírovým nátokem je vhodným řešením pro překonání velkých spádových rozdílů. Nutnost zajištění stabilního bystrinného nebo říčního proudění znamená, že spadiště nejsou vhodná

pro větší množství průtoků. Řešením tohoto problému často bývá kombinace spadiště s vírovým nátokem s nějakou formou odlehčení pro bezdeštné průtoky.

Kvůli těmto vlastnostem není možné vírový typ spadiště využít ve zkoumané lokalitě v Táboře. Požadovaný spád je na minimální hranici použitelnosti pro tento typ spadišť a variabilita průtoků je velká.

2.1.2 Odlehčovací komory

Odlehčovací komora¹ odděluje přípustné množství vody ze stokové sítě do recipientu. Za sucha teče v jednotné stokové síti pouze splaškový průtok, při dešti jsou splašky několikanásobně zředěny. Z ekonomických důvodů jsou na stokových sítích navrhovány takové odlehčovací komory, které po dosažení určitého stupně zředění odvádějí část znečištěných vod do recipientu. Z celkového ročního dešťového odtoku je asi 60 % ošetřeno na ČOV. Zbýlých 40 % je vypouštěno odlehčovacemi komorami do recipientu. Z hlediska předčištění dešťového průtoku existují dva typy odlehčovacích komor. Odlehčovací komory, které jsou součástí retenčních objektů, jsou navrženy na větší počet přepadů, v průtočných nádržích probíhá sedimentace nerozpuštěných látek a oddělení plavenin česlemi. Přes tato odlehčení odtéká do recipientu 30 % celkového dešťového odtoku. Druhým typem jsou odlehčovací komory bez předčištění, které jsou v provozu pouze za nejvydatnějších dešťů. Bez jakéhokoli předčištění se do recipientu dostane 10 % celkového dešťového odtoku [13]. Retenční objekty se navrhují jako součást koncepce městského odvodnění. Slouží k zadržení vod z prvního splachu či části dešťového odtoku, které jsou po skončení deště a obnovení kapacity systému dopraveny na čistírnu odpadních vod.

Odlehčovací komory způsobují za deště velké zatížení pro recipient. Kvalitu vody recipientu snižuje látkové a mikrobiologické znečištění z městských stok i teplota vody přitékající ze stokové sítě.

Dříve bylo k návrhu odlehčovací komory přístupováno metodou ředícího poměru, ta ale nezohledňuje velikost osídlení odvodňovaného území, ani vodnost recipientu. V současnosti je snahou nahradit takzvanou emisní metodu metodou imisní. Imisní strategie je koncepční řešení, které stanovuje přípustné látkové znečištění pro prostředí, do kterého je znečištění vypouštěno [13].

V současnosti se používají tyto dva základní hydraulické principy odlehčení: [7]

- přeliv přes hranu, tj. komory s přelivem
- doskok vodního paprsku, tj. štěrbinové odlehčovací komory

¹ Neexistuje jednotné názvosloví – ve vodním zákoně se hovoří o ‘dešťových oddělovačích’, v návrhové normě ČSN EN 752 figurují ‘oddělovací komory’. Pro účely této práce byl vybrán termín starší, ale stále nejvyžívanější ‘odlehčovací komory’.

Princip šterbinové odlehčovací komory je založen na přítomnosti bystrinného režimu proudění. Za bezdeštného období propadá veškerý průtok do odváděcí stoky na čistírnu odpadních vod. Při dešťových průtocích je šterbina paprskem přeskakována, nebo se průtok dělí. V přímé trati pokračuje odlehčený průtok do recipientu. Problémy tohoto zařízení spočívají v riziku ucpání šterbiny plaveninami a přepadu splaškových vod do recipientu i v bezdeštném období [17]. Nevýhodou je i nulový retenční objem komory a zcela chybějící předčištění, které v tomto typu objektu není možno zříditi.

Odlehčovací komory s přelivnou hranou se dále dělí na dva typy:

- s nízkou přelivnou hranou, tj. přelivná hrana je pod kritickou hloubkou h_c
- s vysokou přelivnou hranou, tj. úroveň hrany je výš než kritická hloubka h_c

Přelivy s nízkou přelivnou hranou byly navrhovány kvůli možnosti návrhu kratší přelivné hrany. Nezpůsobují zpětné vzduť, ale hydraulicky jsou obtížně řešitelné. V současnosti není jejich návrh doporučován, pro průtoky v bystrinném režimu se raději volí šterbinová odlehčovací komora.

Přelivy s vysokou přelivnou hranou jsou používanějším typem, který zahrnuje několik výhod. Tyto přelivy se navrhují za říčního režimu proudění, protože úroveň přelivné hrany je vyšší, než je kritická hloubka. Optimální hodnota Froudova čísla pro zajištění stabilního režimu proudění je $Fr < 0,75$. Říční režim proudění a zároveň malý sklon dna vedou ke zpětnému vzduťi ve stoce, což může být nevýhodou, protože pak hrozí vzduťi do domovních přípojek. Při správném návrhu lze ale přeměnit nevýhodu ve výhodu – stoka v malém sklonu má velkou retenční kapacitu, která je postupně prázdněna po skončení deště. Další nevýhodou tohoto typu komor může být nízká rychlost proudění a riziko sedimentace splavenin. Mezi výhody patří skutečnost, že při stabilním říčním proudění se lze vyhnout vzniku vodního skoku jak v prostoru komory, tak i pod ní. V tomto typu komory je také stabilnější odtokové množství škrťicím objektem, protože se průtočná kapacita potrubí v tlakovém režimu mění v závislosti na výšce hladiny v komoře pouze nepatrně.

Přelivná hrana je vždy horizontální. Pozice přelivné hrany se liší podle situačního návrhu stoky. Může být čelní, boční, šikmá i zalomená. Délka přelivné hrany ovlivňuje výšku přepadového paprsku. Boční přeliv je jednoznačně výhodný, protože umožňuje navrhnout dlouhou přelivnou hranu při minimálním zvětšení rozměrů stavby. Boční přeliv lze navrhnout jako jedno- i oboustranný. Oboustranný přeliv poloviční délky však nedosahuje dvojnásobné kapacity průtočného množství přelivu jednostranného. Podle doporučení má být délka oboustranného přelivu zkrácena maximálně o 30 % [2].

Základní rovnice pro výpočet průtoku přes přelivnou hranu je [12]:

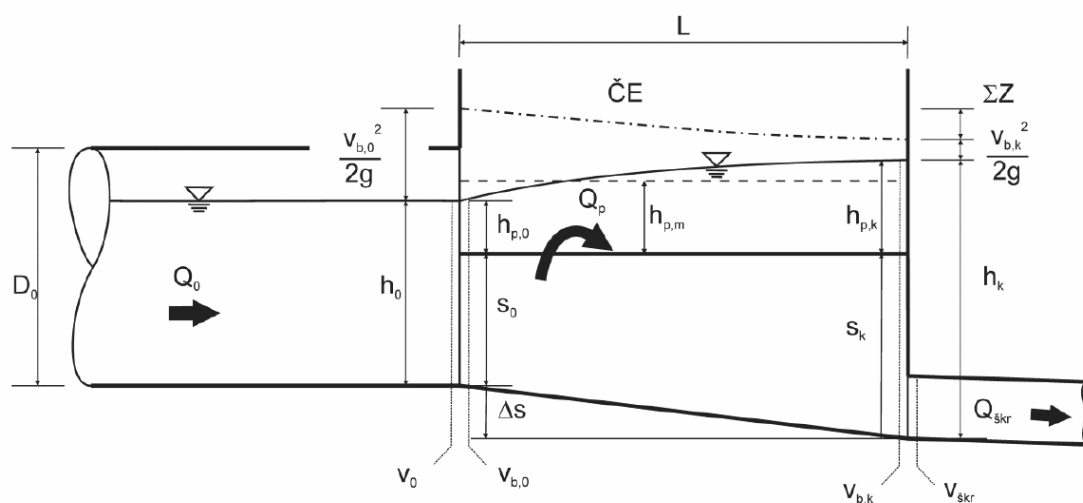
$$Q = m \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot H_0^{3/2} \quad (2-7)$$

, kde m je součinitel přepadu, b je délka přelivné hrany, g je tíhové zrychlení a H_0 je energetická výška přepadového paprsku. Schéma je na Obr. 4.

Energetická výška H_0 se vyjádří jako:

$$H_0 = h + \frac{v_0^2}{2 \cdot g} \quad (2-8)$$

, kde h je přepadová výška paprsku a v_0 je přítoková rychlost.



Obr. 4 – Schéma bočního přelivu s vysokou přelivnou hranou [17]

2.2 Teoretické řešení základních hydraulických jevů

Ve sdruženém objektu, který je předmětem této práce, se vyskytuje řada různých hydraulických jevů. Jedná se především o dvě spadiště s různými režimy na přítoku, provzdušnění proudů, boční přelivy a sběrné kanály odlehčovacích komor. Tato rešerše zahrnuje více témat, ale zabývá se především hydraulickým popisem spadišť a bočních sběrných kanálů.

2.2.1 Provzdušnění proudů

S ohledem na předmět zkoumání se řeší provzdušnění proudů v potrubí s přímou trati při velkých sklonech, ke kterému dochází na přítoku do objektu Spadiště 1.

Provzdušnění proudů vzniká v oblastech s vysokými rychlostmi proudění. Když dosáhne turbulentní mezní vrstva přibližně hloubky proudění, nastává provzdušňování proudů. Počáteční bod provzdušnění je bod, ve kterém tloušťka turbulentní mezní vrstvy dosáhne hloubky proudění. Provzdušnění proudů je zkoumáno, protože má velký vliv na hloubku proudění a kapacitu stoky. Míra provzdušnění je nezbytným parametrem pro určení dimenze stoky [18]. Hodnoty, na kterých provzdušnění záleží, jsou pak především: drsnost a sklon stoky, rozměr stoky a rychlost proudění.

Výpočet koncentrace provzdušnění v částečně plněných profilech uvedl ve své práci Rao [6]. Koncentrace C je vyjádřena pro obdélníkový profil v závislosti na Froudově čísle.

$$C = 1 - \frac{1}{\frac{1,35}{K} \cdot Fr^{1,5} + 1} \quad (2-9)$$

, kde K je drsnost koryta podle Stricklera a Fr je Froudovo číslo.

Volkart odvodil parametry odtoku provzdušněného proudů pro kruhový profil z hydraulického poloměru R , namísto použití Froudova čísla. K popsání provzdušněného proudů využívá Boussiensqovo číslo ve tvaru:

$$B = \frac{v}{\sqrt{g \cdot R}} \quad (2-10)$$

, kde v je rychlost proudění, g tíhové zrychlení a R hydraulický poloměr.

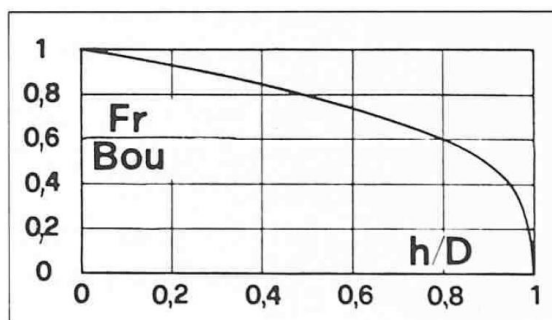
Vzájemný vztah Boussiensquova a Froudova čísla se dá popsat závislostí na středovém úhlu plnění potrubí ε .

$$\frac{B}{Fr} = \left(\frac{\varepsilon}{\sin \varepsilon} \right)^{0,5} \quad (2-11)$$

Poměr plnění v závislosti na středovém úhlu se vyjádří jako:

$$\frac{h}{D} = \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos \varepsilon) \quad (2-12)$$

Na Obr. 5 je zobrazen obecný funkční vztah mezi poměrem plnění a poměrem Boussinesqova a Froudova čísla. Při velmi malém poměru plnění se dá uvažovat $Fr \approx B$. Pro vyšší hodnoty je Froudovo číslo vždy menší než Boussinesqovo.



Obr. 5 – Vztah Froudova a Boussinesqova čísla [6]

Porovnáním výsledků Volkartových experimentů s jinými autory (jejichž odvození je platné pro obdélníkové průtočné profily) vychází, že za stejných hodnot Froudova čísla je koncentrace provzdušnění v kruhových profilech menší než v obdélníkových profilech.

Volkartovy experimenty, kterých bylo provedeno několik desítek, vedly k vyjádření obecné rovnice pro koncentraci provzdušnění proudu C . Experimenty byly provedeny pro dvoufázové proudění s následujícími parametry: $0,11 < i_0 < 0,956$; $1,5 < Q < 1913$ l/s; $0,11 < D < 0,7$ m. Dosahované rychlosti smíšeného proudu byly $1,72 < v < 10,54$ m/s.

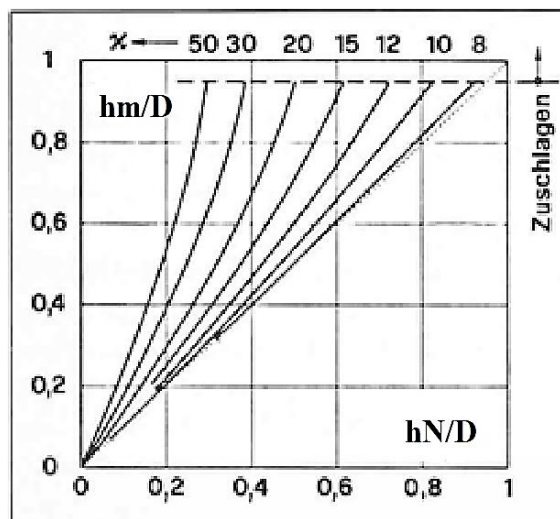
$$C = 1 - \frac{1}{0,02 \cdot (B-6)^{3/2} + 1} \quad (2-13)$$

Z této rovnice vyplývá, že počátek provzdušňování proudu nastává v případě, kdy B ($C=0$) = 6.

Koncentraci provzdušnění je možno vyjádřit i pomocí parametru $\chi = K i_0^{1/2} D^{1/6} g^{-1/2}$, který zahrnuje pouze popisné parametry přítokového profilu a byl odvozen z Boussinesqova čísla. Poměr plnění potrubí pro provzdušněný proud (h_m/D) se odečte z nomogramu (Obr. 6) při známém poměru plnění neprovzdušněného proudu (h_N/D). K provzdušnění proudu začne docházet při hodnotách vyšších $\chi \approx 8$.

Pro provzdušněný proud byla z nomogramu odvozena rovnice, která zahrnuje poměr plnění potrubí provzdušněného a neprovzdušněného proudu a parametr χ :

$$\frac{h_m}{D} = \frac{1}{4} \cdot \chi^{2/3} \cdot \left(\frac{h_N}{D}\right)^{10/9} \quad (2-14)$$

Obr. 6 – Nomogram χ [6]

2.2.2 Trajektorie paprsku

Pro návrh spadiště je důležité určit trajektorii paprsku. Při výpočtu trajektorie lze postupovat jako při výpočtu teoretického tvaru výtokového paprsku (tzv. šikmý vrh). Parametry popisující trajektorii jsou tyto [12]:

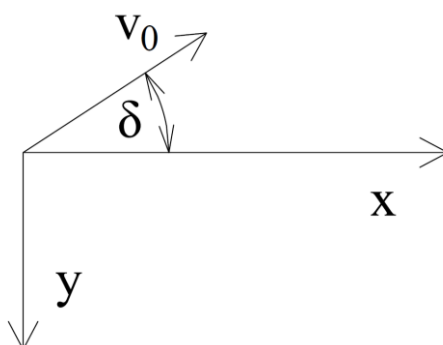
$$x = v_0 \cdot t \cdot \cos \delta \quad (2-15)$$

$$y = v_0 \cdot t \cdot \sin \delta - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \quad (2-16)$$

, kde v_0 je přítoková rychlost, t je čas měření, g je tíhové zrychlení a δ je úhel naklonění stoky.

Sečtením těchto rovnic vzniká rovnice nezávislá na čase t a vyjadřující polohu x, y souřadnic paprsku (Obr. 7).

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \delta - \frac{1}{2} \cdot \frac{g \cdot x^2}{v_0^2 \cdot \cos^2 \delta} \quad (2-17)$$



Obr. 7 – Souřadný systém

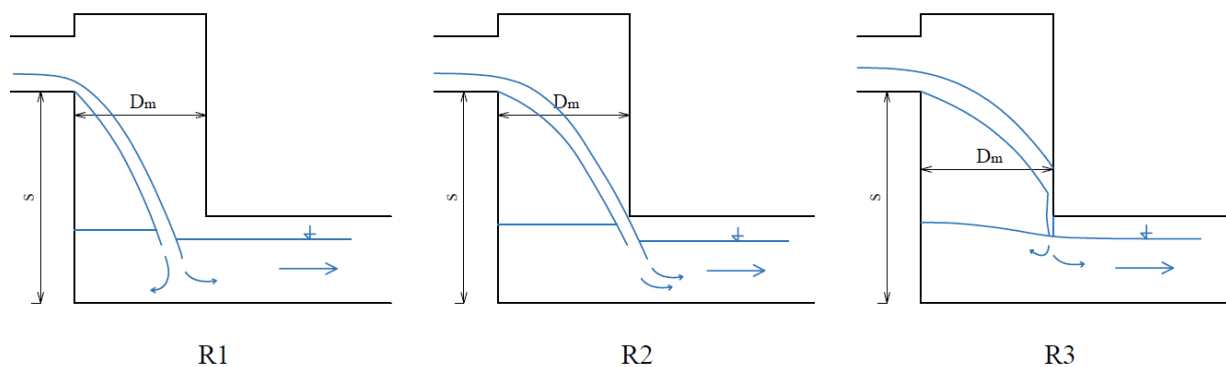
Pomocí rovnice (2-17) lze určit dopadovou pozici paprsku nebo jeho polohu ve spadišti.

2.2.3 Režimy dopadu paprsku

Pro řešení hydraulických vlastností spadiště je potřeba především určit pozici dopadu vodního paprsku, protože ta je pro další postup klíčová. Díky tomu je možné popsat režim spadiště a chování vody v dopadové šachtě. Výpočet souřadnice dopadu byl uveden v předcházející kapitole.

Hydraulické vlastnosti spadiště významně ovlivňuje místo dopadu paprsku proudu. Byly definovány tři režimy, které definují dopadovou pozici paprsku (Obr. 8) [5]. Rozdělení je závislé na průtoku a rozměrech spadiště.

- Režim *R1* se objevuje při malých průtocích, vodní paprsek z přítokového potrubí dopadá přímo do dolní vody. V dolní vodě dochází ve velké míře ke tvorbě vzduchových bublin.
- Režim *R2* se objevuje při středních průtocích. Vodní paprsek dopadá přímo na hladinu dolní vody v místě mezi vtokem do odtokového potrubí a podhledem potrubí. Způsobuje vzduť hladiny dolní vody na dně spadiště a neklidnou hladinu v odtokovém potrubí. Nepříznivá je i skutečnost, že vodní paprsek může způsobovat vymílání dopadové a podhledové hrany. Provzdušnění dolní vody není příliš velké.
- Režim *R3* vzniká při největších průtocích, vodní paprsek naráží na protější stěnu spadiště nad odtokovým potrubím. V místě dopadu dochází k odrazu vodního paprsku



Obr. 8 – Režimy dopadu

Dále je v rámci režimů definováno ještě několik subrežimů. Chanson [9] popisuje subrežimy *R1a* a *R1b* pro obdélníkové přítokové potrubí, Granata [5] *R2a*, *R2b*, *R2c*; *R3a* a *R3b* pro spadiště s kruhovým průřezem.

- Subrežim *R1a*: krajní proudnice vodního paprsku se při volném pádu přibližují, až vytvoří středový hřbet.
- Režim *R1b*: při vyšších průtocích, než je předchozí, se proudnice nepřiblíží a nedojde k vytvoření středového hřbetu.

- Režim *R2a*: část vody dopadá a odtéká odtokovou stoukou, část vody se odráží do dolního prostoru spadiště, kde tvoří vzdušnou vlnu.
- Režim *R2b*: celý vodní paprsek dopadá do odtokového potrubí. Dochází k menšímu tlumení energie a větší rychlosti v odtokovém potrubí.
- Režim *R2c*: část paprsku dopadá přímo do odtokového potrubí, část naráží na stěnu spadiště a hranu odtokového potrubí.
- Režim *R3a*: voda dopadající na stěnu spadiště se částečně odráží od stěny a částečně padá po stěně spadiště do dolní vody a tvoří clonu nad odtokovým potrubím, která omezuje odtok z prostoru spadiště.
- Režim *R3b*: při průtocích s vysokým Froudeovým číslem narazí vodní paprsek na protilehlou zeď ve výšce téměř stejné jako je výška přítoku. V případě spadiště s kruhovým průřezem se paprsek spirálovitě stáčí podél stěny spadiště.

Přechod mezi režimy je popsán pomocí dopadového součinitele I . Tento součinitel je bezrozměrný a popisuje vodní paprsek jako hmotný bod s rychlostí v_0 . Dopadový součinitel spojuje bezrozměrnou relativní výšku spadiště $S=s/D_m$ a přítokovou rychlostní výšku $v_0^2/2g$. Součinitel je vyjádřen pro bystrinné proudění v přítokovém potrubí.

$$I = \sqrt{\frac{2 \cdot s}{g}} \cdot \frac{v_0}{D_m} \quad (2-18)$$

, kde s je výška spadiště, g je tíhové zrychlení, v_0 je rychlost v přítokovém potrubí a D_m je vodorovná vzdálenost dopadové plochy od vtokové hrany.

Přechodové hodnoty I mezi jednotlivými režimy byly získány z experimentálního výzkumu:

$I \approx 0,6$ přechod mezi *R1* a *R2*

$I \approx 0,95$ přechod mezi *R2* a *R3*

2.2.4 Účinnost tlumení energie

Dostatečné tlumení mechanické energie proudu je stěžejní funkcí spadišť. Vyčíslení účinnosti spadiště závisí především na výšce spadišťového stupně a rychlostech proudění v přítokovém a odtokovém potrubí.

Účinek tlumení je způsobený ztrátou energie při dopadu na dno šachty (režim *R1*) nebo rozstříknutím proudu při dopadu na stěnu spadiště, třením a dopadem na dno (režim *R3*). Nejméně účinný je režim *R2*, kdy vodní paprsek dopadá do odtokového potrubí a může způsobovat nežádoucí děje [5].

Relativní účinnost tlumení vody je definována jako:

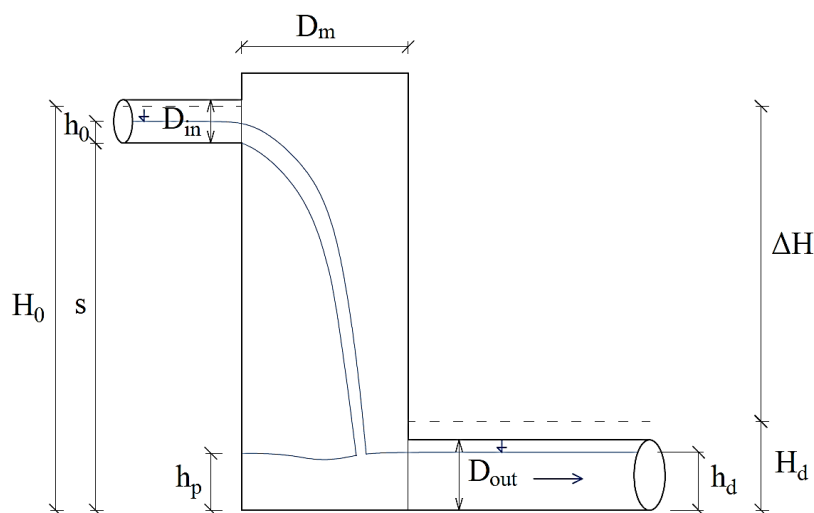
$$\eta = \frac{H_0 - H_d}{H_0} \quad (2-19)$$

, kde H_0 je energetická výška v přítokovém potrubí a H_d je energetická výška v odtokovém potrubí.

$$H_0 = s + h_0 + \frac{v_0^2}{2g} \quad (2-20)$$

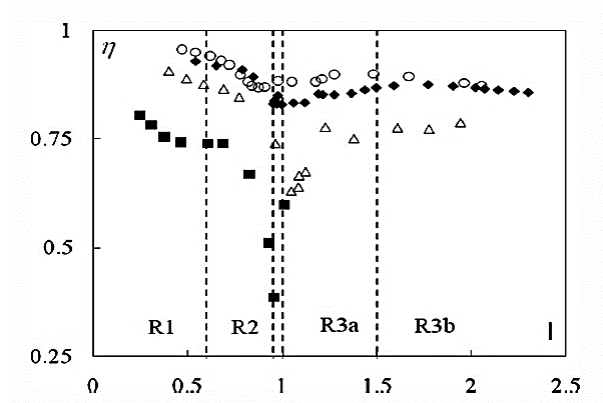
$$H_d = h_d + \frac{v_d^2}{2g} \quad (2-21)$$

, kde s je výška spadiště, h_0 je výška hladiny na přítoku, v_0 je rychlost proudění na přítoku, h_d je výška hladiny na odtoku a v_d je rychlost proudění na odtoku.



Obr. 9 – Účinnost spadiště, schéma

Nejvyšší účinnosti je dosahováno v režimu $R1$, kdy je nízké Froudovo číslo a kinetická energie proudu v poměru ke spádu je nízká. V režimu $R2$ se účinnost tlumení energie snižuje, v přechodu mezi režimy $R2$ a $R3$ se nacházejí minimální hodnoty účinnosti. Po přechodu na režim $R3a$ se účinnost tlumení skokově zvyšuje a roste. Z Obr. 10 je také patrné, jak je účinnost tlumení závislá na výšce spadišťového stupně s . Spadiště s malou výškou dosahují menších účinností. V důsledku menších hodnot s není dosaženo oblastí s vyšším rychlostním gradientem (I).



Obr. 10 – Účinnost tlumení energie v závislosti na režimu dopadu paprsku pro různé výšky spadiště, ■ je nejmenší výška, ○ je největší [5]

Účinnost tlumení energie neovlivňuje tak výrazně hloubka dolní vody, jako spíše směr odtoku. Z experimentů s odtokovou stokou v úhlu 90° a 180° je zřejmé, že odtok kolmý ke směru přítoku (90°) má lepší výsledky účinnosti tlumení energie [9].

2.2.5 Sběrné kanály – podélný profil hladiny

Popis podélného profilu hladiny v korytě slouží k určení návrhových rozměrů stavby či k ověření kapacity návrhu.

Pro proudění v korytě s rovnoměrným bočním přítokem lze vyjádřit rovnici průběhu hladin ve tvaru [7]:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{i_0 - i_E - \left[2 - \frac{U \cdot \cos \Phi}{V} \right] \cdot \frac{Q \cdot Q'}{g \cdot S^2} + \frac{Q^2}{g \cdot S^3} \cdot \frac{\partial S}{\partial x}}{1 - Fr^2} \quad (2-22)$$

, kde i_0 je podélný sklon kanálu, i_E je sklon čáry energie, U je rychlost přepadajícího paprsku, V je průřezová rychlost v korytě, Φ je úhel, pod kterým dochází k přepadu, Q je úsekový průtok v korytě, Q' je měrný průtok na přelivu, g je tíhové zrychlení, S je průřezová plocha a Fr je Froudovo číslo.

Tvar rovnice vychází z pohybové rovnice pro ustálené nerovnoměrné proudění. Vliv příčného proudění je zahrnut ve členu QQ'/gS^2 . Člen $Q^2/gS^3 \cdot \partial S/\partial x$ zohledňuje změnu příčného průřezu.

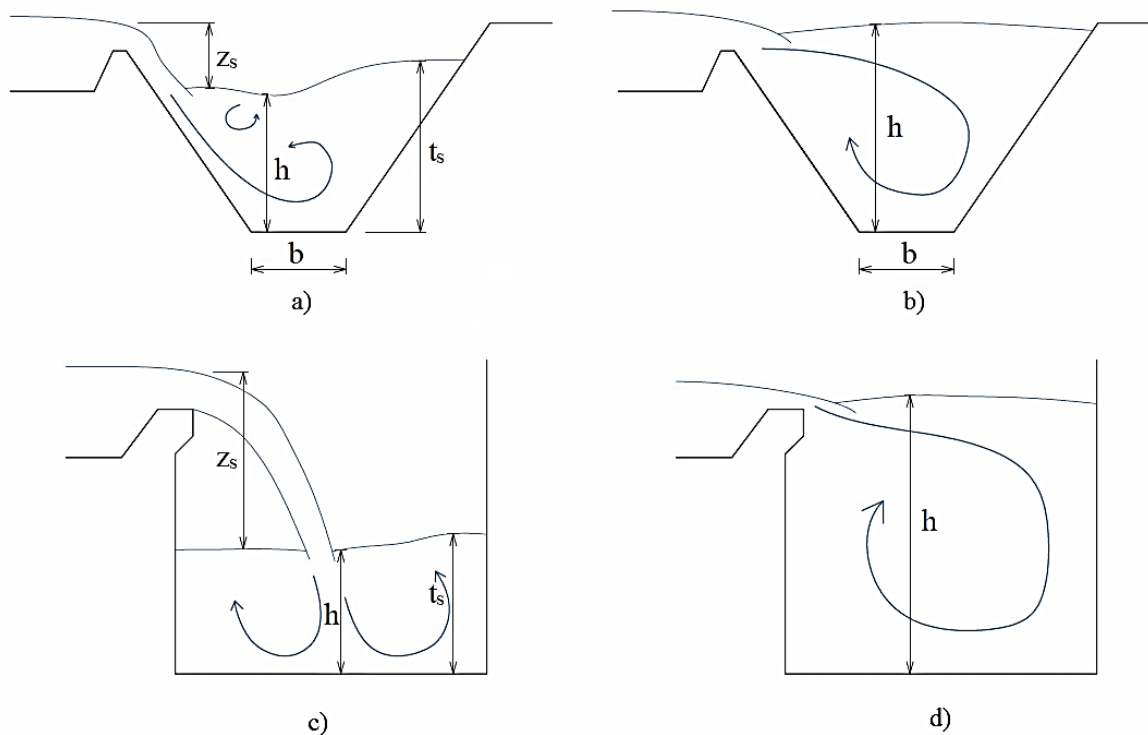
Člen $[2 - U \cos \Phi / V]$ ovlivňuje rovnici z hlediska směru nátok. Pokud je směr proudnic na přelivné hraně kolmý k ose sběrného kanálu, je $\Phi = 90^\circ$ a $U \cos \Phi / V = 0$ a člen nabývá maximální hodnoty.

Výpočet podélného proudění probíhá tzv. metodou po úsecích. Pro stanovení okrajových podmínek je určující režim proudění ve sběrném kanále. V případě bystrinného proudění postupuje výpočet shora. V případě říčního proudění je postup výpočtu zdola a okrajovou podmínku tvoří hloubka kritického proudění.

2.2.6 Sběrné kanály – příčný profil hladiny

Proudění ve sběrných kanálech je ovlivňováno jak podélným přítokem přes přelivnou hranu, tak i prouděním v příčném průřezu. V kanálech s poměrně mírným sklonem dna mohou vzniknout dva „základní typy proudění“ [14]:

- Při malých průtocích nebo při malých hloubkách v kanálu vznikne proudění se dvěma víry orientovanými ve směru podélné osy kanálu. Proud přepadající přes přeliv směřuje ke dnu kanálu, vynořuje se na druhé straně a vytváří primární silný vír. Sekundární vír vzniká mezi padajícím paprskem z přelivné hrany a tělesem primárního víru. (Obr. 11 a), c))
- Při velkých průtocích nebo při větších hloubkách se vytvoří pouze jeden vír. (Obr. 11 b), d))



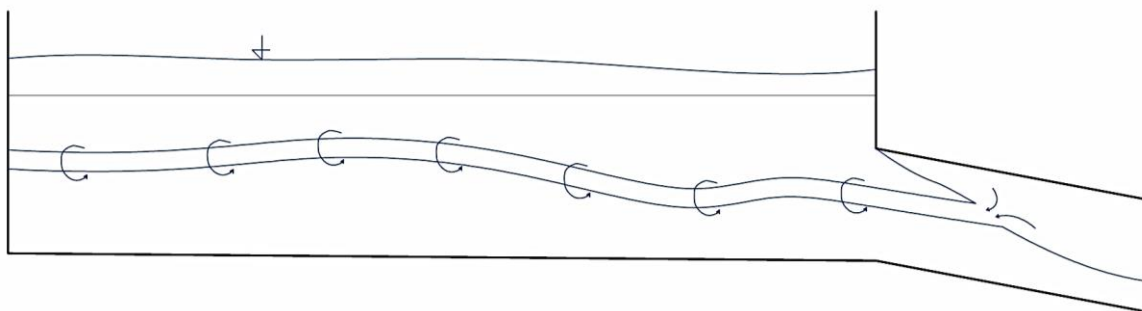
Obr. 11 – Lichoběžníkový a obdélníkový průřez; a), c) – vznik dvou vírů; b), d) – vznik jednoho víru

Při vzniku pouze jednoho víru je povrch hladiny relativně hladký, zatímco při proudění s dvěma víry se na povrchu objevují turbulentní útvary.

Výška hladiny v příčném průřezu t_s je největší na opačné straně, než je přelivná hrana. Vzniká vlivem proudění (viz Obr. 11 a), c)) a vyskytuje se u prvního případu se dvěma víry.

Při velkých průtocích může vzniknout vír se vzduchovým jádrem (Obr. 12). Tento vír se vytvoří jako výsledek velkých tangenciálních rychlostí v příčném profilu proudění. Hodnota tlaku v jádře víru

klesne pod hodnotu atmosférického tlaku, a to až v takové míře, že při snaze vyrovnat tlakový rozdíl začne vír přisávat vzduch z prostoru dolní vody. Dle Helmholtzova teorému [20] končí vír v horní části koryta v bodě na stěně koryta (slepý konec nebo „dead-end“).



Obr. 12 – Schéma víru se vzduchovým jádrem

Pro popis příčného profilu hladiny byly z uskutečněných experimentů odvozeny rovnice pro obdélníkový a lichoběžníkový průřezový profil.

Rovnice popisující příčný profil hladiny ve žlabu obdélníkového průřezu je:

$$\frac{t_s}{h} = 1 + \gamma \cdot \frac{q \cdot U_s}{g \cdot h^2} \quad (2-23)$$

, kde t_s je maximální hloubka v korytě, h je srovnávací hloubka, γ je součinitel proporcionality, q je měrný průtok a U_s je průřezová rychlost.

Součinitel proporcionality dosahuje hodnot $\gamma \approx 1 \div 1,5$.

Rovnice popisující příčný profil hladiny ve žlabu lichoběžníkového průřezu je:

$$\frac{t_s}{h} = 1 + 5,5 \cdot \left[\frac{q^2}{g \cdot h^2 \cdot O} \cdot \left(\frac{z_s}{h} \right)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (2-24)$$

, kde t_s je maximální hloubka v korytě, h je srovnávací hloubka, q je měrný průtok na přelivu, g je tíhové zrychlení, O je omočený obvod a z_s je rozdíl hladin na přelivu a v korytě.

Popis obdélníkového a lichoběžníkového profilu se od sebe liší použitými parametry. Tvar hladiny obdélníkového profilu závisí na rychlosti a měrném průtoku v korytě, zatímco lichoběžníkový profil závisí na měrném průtoku, omočeném obvodu a výškách hladin.

3. Fyzikální model

3.1 Stávající situace a návrhový stav

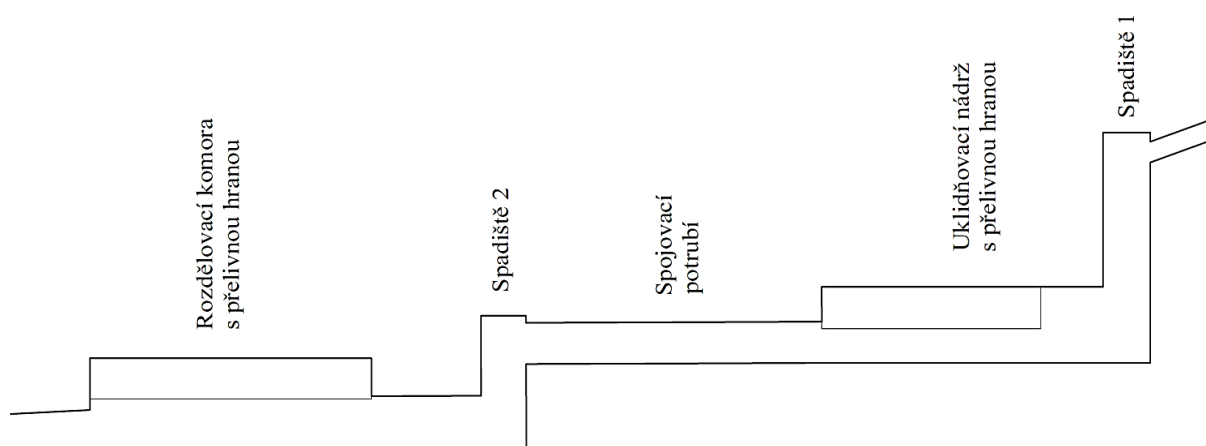
Stávající stav objektu vypadá takto: funkci rozdělování průtoku tvoří pouze jeden objekt, a to odlehčovací komora. Nicméně se jedná o jímku se stálým nadržáním, která plní funkci tlumení energie nedostatečně. Do komory přitékají dvě stoky:

- stoka LT DN 600 ve sklonu 33 %, maximální návrhový průtok $Q_{\max} = 2310$ l/s
- stoka DN 400, $Q_{\max} = 413$ l/s

Odlehčovací komora by měla rozdělovat průtok do tří stok:

- stoka DN 300, která vede na Areálovou ČOV, $Q_{\max} = 140$ l/s
- stoka DN 300, která vede na ČOV Klokoty, $Q_{\max} = 78$ l/s
- stoka DN 500, odlehčovací stoka, ústí do Lužnice

Toto rozdělení průtoků je platné i pro návrhový stav. Při návrhu bylo potřeba přihlédnout k mnoha aspektům a výsledný sdružený objekt je proto jedním z řady návrhů, které byly vypracovány.



Obr. 13 – Schéma navrhovaného sdruženého objektu

Stoka LT DN 600 natéká do objektu Spadiště 1, disipace energie se odehrává v objektu Uklidňovací nádrž, který zároveň slouží jako odlehčovací komora. Odtud vede stoka DN 300 přes šrtící objekt na Areálovou ČOV, dešťový průtok přepadá do sběrného žlabu a spojovací stokou DN 1200 odtéká do objektu Spadiště 2. Do Spadiště 2 přitéká také stoka DN 400. Dále průtok pokračuje na objekt Rozdělovací komora. Odtud vede stoka DN 300 na ČOV Klokoty. Část průtoku se zachytí v plánované retenční nádrži, zde řešeno pouze výsekovým modelem, zbývající odpadní voda přepadá do sběrného žlabu a odtokovou stokou DN 1100 odtéká do recipientu.

Model je zkonstruován ve zmenšeném měřítku 1:10 (viz 3.2). Návrhové průtoky viz 3.3.

3.2 Modelové měřítko

Pro správný návrh fyzikálního modelu je stěžejní volba adekvátního měřítka tak, aby byla zachována hydraulická podobnost mezi modelem a prototypem. Modelové měřítko se určuje na základě mechanické podobnosti. Mechanická podobnost předpokládá rovnováhu mezi všemi působícími silami. Úplné mechanické podobnosti ale nelze dosáhnout, proto je třeba zvolit síly, které jsou pro zkoumaný hydraulický jev určující. Mechanická podobnost je tvořena geometrickou, kinematickou a dynamickou podobností.

Metodou rozměrové analýzy lze odvodit devět bezrozměrných čísel, pro které lze vyjádřit devět rovnic měřítek. Pro zkoumaný typ proudění nejvíce vyhovuje Froudovo kritérium dynamické podobnosti, kde převažující účinek mají síly tíže, tedy gravitační a setrvačné. Při zachování hodnoty Froudova čísla pro model i prototyp lze zaručit jejich podobnost. Toto kritérium je vhodné pro modely proudění s volnou hladinou. Při zachování stejné hodnoty Froudova čísla na modelu i prototypu je zajištěn shodný režim proudění a stejný poměr rozhodujících sil.

Froudův zákon vyjadřuje:

$$M_{Fr} = \frac{M_v^2}{M_g \cdot M_L} = 1 \quad (3-1)$$

Protože zpravidla platí $M_g=1$, pak lze vyjádřit měřítko rychlostí:

$$M_v = M_L^{1/2} \quad (3-2)$$

A odvodit průtokové měřítko:

$$Q = v \cdot S \Rightarrow M_Q = M_v \cdot M_L^2 = M_L^{1/2} \cdot M_L^2 = M_L^{5/2} \quad (3-3)$$

V následující tabulce (Tab. 1) jsou přehledně sepsány měřítka modelové podobnosti a modelová měřítka.

Tab. 1 – Měřítka modelových veličin

Veličina	Značka	Jednotka	Měřítka podobnosti	Modelové měřítko
Délka	L	m	M_L	1:10
Plocha	S	m^2	M_L^2	1:100
Objem	V	m^3	M_L^3	1:1000
Čas	t	s	$M_L^{1/2}$	1:3,16
Rychlost	v	m/s	$M_L^{1/2}$	1:3,16
Průtok	Q	m^3/s	$M_L^{5/2}$	1:316
Síla	F	$kg \cdot m/s^2$	M_L^3	1:1000
Sklon	i	-	1	1:1

3.3 Návrhové průtoky

Návrhové průtoky, na které byl sdružený objekt navržen, byly převzaty z průvodní zprávy dodané projektantem a vychází z Generelu odvodnění města Tábor.

Hodnoty, na které je model navržen a pro které byla ověřena jeho funkčnost, jsou následující:

Přítoková stoka DN 600:

$$\text{Maximální návrhový průtok } Q_{\max} = 2310 \text{ l/s}, \quad Q_{M \max} = 7,31 \text{ l/s}$$

Splaškový (bezdeštný) průtok $Q_a = 12,2 \text{ l/s}$, $Q_{M a} = 0,04 \text{ l/s}$, tento průtok nebyl na fyzikálním modelu měřen, jelikož je jeho hodnota nižší než rozlišovací hodnota průtokoměru.

Přítoková stoka DN 300 (boční přítok do objektu Spadiště 2 z odlehčení):

$$Q_{\text{odlehčení}} = 413 \text{ l/s}, \quad Q_{M \text{ odlehčení}} = 1,31 \text{ l/s}$$

Odtok DN 300 na Areálovou ČOV (z objektu Spadiště 1):

$$Q_{O1} = 140 \text{ l/s}, \quad Q_{M O1} = 0,45 \text{ l/s}$$

Odtok DN 200 na ČOV Klokoty (z objektu Retenční nádrž):

$$Q_{O2} = 78 \text{ l/s}, \quad Q_{M O2} = 0,25 \text{ l/s}$$

Návrhových stavů bylo zvoleno sedm a jejich přehled je v následující tabulce (Tab. 2):

Tab. 2 – Přehled návrhových průtoků

Název	Průtok Q_P [l/s]	Průtok Q_M [l/s]	
Q_1	140	0,45	
Q_2	500	1,58	
Q_3	1000	3,16	
Q_4	1500	4,74	
Q_5	2000	6,33	
Q_6	2310	7,31	Pouze přítok na Spadiště 1
Q_{\max}	2310+413	8,62	Do objektu Spadiště 1 přitéká průtok $Q_6 = 2310 \text{ l/s}$, zároveň do objektu Spadiště 2 přitéká boční přítok $Q_{\text{odlehčení}} = 413 \text{ l/s}$.

3.4 Měřené veličiny

3.4.1 Průtokové stavy

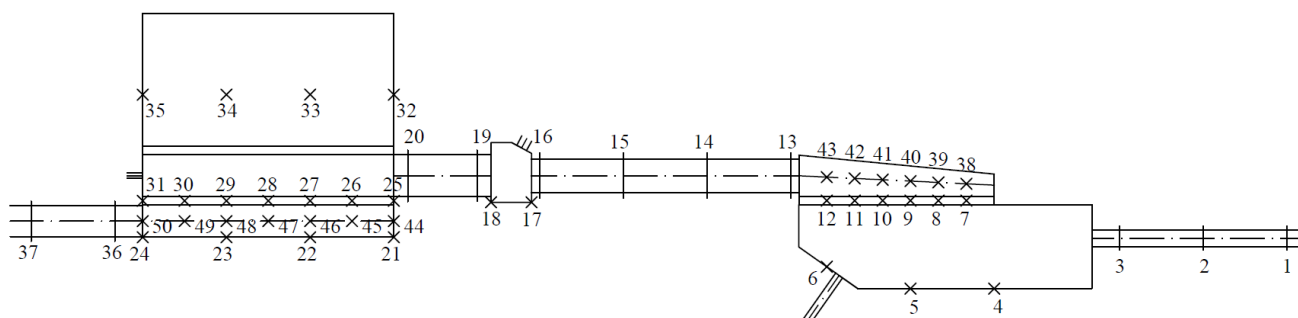
Měření průtokových stavů na modelu bylo zajištěno pomocí průtokoměrů Krohne Waterflux 3000 s vyhodnocovací jednotkou IFC100, které byly umístěny na přívodním potrubí do nádrže a na nátoku do modelu.

Na bočním přítoku do objektu Spadiště 2 byl měřen průtok pomocí průtokoměru Badger Meter M1500, s průměrem DN 50.

Odtok na Areálovou čistírnu z uklidňovací nádrže a odtok na čistírnu v Klokotech z retenční nádrže byly měřeny objemovou metodou.

3.4.2 Hloubky proudění

Hloubky proudění byly měřeny pomocí čtení ze stabilně umístěných měřítka vně konstrukce modelu a pomocí hrotového měřítka. Umístění měřících bodů je patrné z následujícího schématu.



Obr. 14 – Schéma měřících bodů

3.5 Popis fyzikálního modelu

Model byl vytvořen převážně z transparentního PVC a závitovými tyčemi připevněn ke kovové konstrukci.

Uvedené rozměry jsou uvažovány pro modelové měřítko.

3.5.1 Přítokové potrubí

Přítokové potrubí je kruhové o průměru DN 60 v modelovém měřítku, 600 mm ve skutečnosti. Potrubí ústí do objektu spadiště ve sklonu 33 %. Na vrcholovém bodě stoky je provedeno zavzdušnění. Reálně není známo, jak horní úsek přítokové stoky vypadá a zda je stoka zavzdušněna. Délka stoky není v projektu definována, nicméně není pro model určující. Dostatečná energetická výška byla zajištěna hladinou vody v nádrži.

Konzumční křivka

Výpočet teoretické konzumční křivky a její porovnání s měřenými hodnotami na modelu ověřuje věrohodnost modelu.

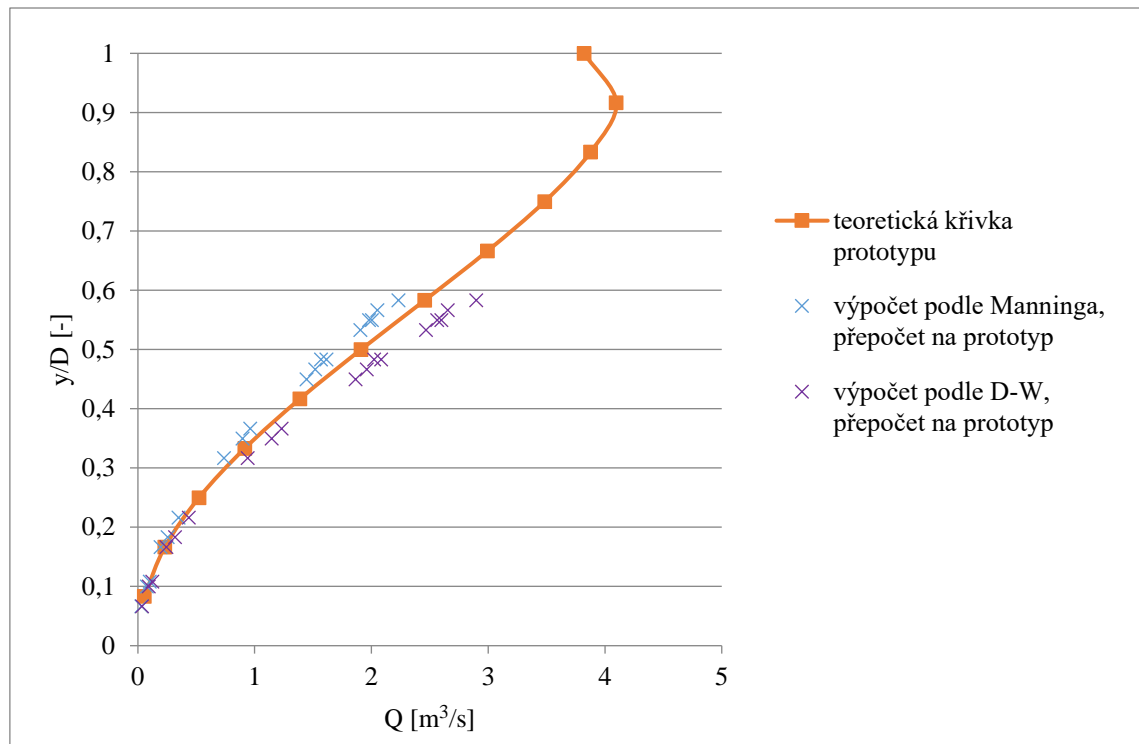
V následující tabulce jsou zahrnuty měřené hloubky pro jednotlivé návrhové průtoky, vypočítané hodnoty rychlosti proudění a hodnoty Reynoldsova čísla. Hloubky jsou měřené v měřících bodech č. 1-3. Pro výpočet byl použit Chézyho rychlostní součinitel vyjádřený podle Manninga.

Přítokové potrubí je kruhového profilu s modelovým rozměrem $D = 0,06$ m, je z průhledného PVC, Manningův drsnostní součinitel potrubí je uvažován $n = 0,009$ s/m^{1/3}. Hodnota relativní drsnosti Δ/D je vyjádřena ve tvaru $\Delta/4R$. Potrubí je částečně plněné a relativní drsnost nezávisí na průměru potrubí. Pro jeho popis se použije výraz upravený pro proudění v otevřených korytech. Relativní drsnost vychází v hodnotách 2 až 10×10^{-5} . Hodnoty Reynoldsova čísla jsou $9,5 \times 10^3$ až 2×10^5 a potrubí tedy vychází hydraulicky hladké. Pro ověření byla vyjádřena konzumční křivka pro hladké potrubí podle vztahů Darcy-Weisbacha. Výsledný tvar křivky odpovídá teoretické výpočtové křivce. Pro stejné hodnoty plnění potrubí vychází větší průtočné množství.

V měřítku prototypu má potrubí rozměr $D = 0,6$ m a sklon $i_0 = 0,33$. Stoka je ze svařované oceli s drsnostním součinitelem $n = 0,012$ s/m^{1/3}. Hodnota relativní drsnosti $\Delta/4R$ je 0,8 až 4×10^{-3} . Hodnoty Reynoldsova čísla jsou rovny 0,5 až $8,5 \times 10^6$, proudění se nachází v kvadratické oblasti ztrát třením.

Tab. 3 – Konzumční křivka modelu a prototypu

Model						Prototyp			
		Manning		Darcy-Weisbach		Q [m ³ /s]	h [m]	v [m/s]	Re [-]
Q [m ³ /s]	h [m]	v [m/s]	Re [-]	v [m/s]	Re [-]				
0,00044	0,004	1,20	9,48E+03	1,48	1,14E+04	0,05	0,050	4,83	4,72E+05
	0,007	1,94	3,13E+04	2,46	3,87E+04	0,23	0,100	7,45	1,40E+06
	0,006	1,66	2,12E+04	2,09	2,61E+04	0,52	0,150	9,47	2,54E+06
0,00158	0,010	2,01	3,41E+04	2,56	4,23E+04	0,92	0,200	11,10	3,79E+06
	0,013	2,44	5,55E+04	3,15	6,97E+04	1,39	0,250	12,44	5,03E+06
	0,011	2,27	4,63E+04	2,92	5,79E+04	1,91	0,300	13,51	6,19E+06
0,00316	0,021	3,22	1,11E+05	4,24	1,42E+05	2,46	0,350	14,35	7,20E+06
	0,022	3,24	1,13E+05	4,27	1,45E+05	3,00	0,400	14,96	7,98E+06
	0,019	3,04	9,66E+04	3,99	1,23E+05	3,48	0,450	15,32	8,47E+06
0,00474	0,027	3,71	1,58E+05	4,93	2,04E+05	3,88	0,500	15,40	8,57E+06
	0,029	3,77	1,66E+05	5,03	2,14E+05	4,10	0,550	15,09	8,16E+06
	0,028	3,71	1,59E+05	4,94	2,05E+05	3,82	0,600	13,51	6,19E+06
0,00632	0,032	3,93	1,84E+05	5,26	2,38E+05				
	0,033	3,98	1,89E+05	5,33	2,45E+05				
	0,029	3,67	1,54E+05	4,88	1,99E+05				
0,00730	0,034	3,93	1,83E+05	5,25	2,37E+05				
	0,035	4,12	2,07E+05	5,53	2,68E+05				
	0,033	3,93	1,83E+05	5,25	2,37E+05				



Obr. 15 - Konzumní křivka přítokového potrubí, měřítko prototypu

3.5.2 Spadiště 1

Spadiště je přímé s kolmým přítokem a rozměry 300 x 150 mm v modelových rozměrech. Výška spadiště ode dna k ústí přítokového potrubí činí 583 mm. Celková výška ode dna po strop je 670 mm. V rámci řešení variant dopadové desky byl strop spadiště zvýšen o 100 mm. Dalším možným řešením je vytvořit stropní klenbu.

Při stavbě modelu byl 5 cm pod vyústěním přítokové stoky umístěn zavzdušňovací otvor, aby v prostoru spadiště nedocházelo k nechtěným jevům. Jedná se o místo, které je nejméně zatěžováno dopadající vodou.

3.5.2.1 Varianty řešení

Z návrhového hlediska bylo zkoumáno několik variant dopadové desky. Při prvotním návrhu hladké stěny bylo zjištěno, že se značná část proudu odráží směrem vzhůru, což by mohlo způsobovat poškození stropní části objektu a zároveň klást omezení na konstrukční možnosti. Z tohoto důvodu bylo zkonstruováno pět dalších variant dopadové desky s využitím prvků, které měly roztržít paprsek a usměrnit jeho směr. Tlumící prvky jsou v rozměrech odpovídajícím rozměrům kamenů, které by byly vsazeny do dopadové desky. Velikost výstupku prvku je 10 mm v modelovém měřítku. Prvky jsou rovnány do různých uspořádání.

3.5.3 Uklidňovací nádrž s přelivnou hranou, sběrný kanál

Uklidňovací nádrž má lichoběžníkový tvar a slouží k několika účelům. Předně jako dopadové místo a uklidnění pod spadišťovou šachtou, dále rozděluje průtok na Areálovou čistírnu odpadních vod a do odlehčení. Na Areálovou ČOV má odtékat maximální průtok 0,44 l/s, který bude zajištěn vírovým ventilem.

Při průtoku většího množství vod je objekt vybaven boční přelivnou hranou o délce 700 mm. Přeliv je vytvořen se zaoblenou hranou, jeho výška ode dna nádrže je 100 mm. Po přepadu voda odtéká sběrným kanálem ve tvaru U, který je navržen jako neprizmatický. Jeho šířka lineárně roste od 80 do 120 mm. Kanál je ve sklonu 0,4 %. Ústí do spojovacího potrubí.

3.5.4 Spojovací potrubí

Spojovací potrubí je kruhového profilu s průměrem DN 120. Délka potrubí je 950 mm a sklon 0,3 %.

3.5.5 Spadiště 2

Spadiště 2 slouží jako výškový stupeň z dispozičního řešení a zároveň jako spojovací šachta dvou stok.

Do spadiště přitéká spojovací potrubí DN 120 a potrubí DN 30. Potrubí DN 30 nemá známý sklon, návrhový průtok je stanoven na 1,31 l/s. Tento průtok je zahrnut pouze do maximálního návrhového stavu, v jiných případech není uvažován. V modelovém řešení je nátok DN30 v podélné ose toku osově obrácen oproti prototypu, aby bylo možné pozorovat hydraulické jevy z jedné strany modelu. Tato úprava by neměla funkci spadiště nijak ovlivňovat.

Spadiště má lichoběžníkový půdorys s hlavními rozměry 243,5 x 213,5 mm. Světlá výška je 383 mm a výška spadišťového stupně 242 mm.

Ze spadiště pokračuje potrubí DN 150 o délce 348 mm do rozdělovací komory.

3.5.6 Rozdělovací komora s odlehčením, sběrný kanál

Tento objekt má několik funkcí, jedná se o rozdělování průtoku na čistírnu odpadních vod Klokoty, do plánované záchytné dešťové nádrže ve vedlejší trati a odlehčení vod do recipientu.

Přítokové potrubí ústí do žlabu o šířce 160 mm se sklonem 2 %. Odtud vede potrubí DN 30 na Čistírnu odpadních vod Klokoty, maximální návrhový průtok ve škrťací trati je navržen na 0,25 l/s. Po obou stranách žlabu jsou přelivné hrany. Pravá nižší hrana o výšce 110 mm vede do retence. Levá hrana je vysoká 140 mm a zajišťuje odtok srážkových vod po naplnění retenční kapacity záchytné nádrže. Navazující sběrný kanál je prizmatický ve tvaru U, široký 110 mm a vede ve sklonu 2 %.

Navrhovaný retenční prostor není součástí modelového výzkumu. Při stavbě modelu byl zohledněn výsekový model.

3.5.7 Odtokové potrubí

Odtokové potrubí je průměru DN 110 a vede pod sklonem 4,6 %.

4. Výsledky měření

4.1 Přítokové potrubí

V přítokovém potrubí bylo měřeno šest návrhových průtoků Q_1 až Q_6 . Sklon stoky je $i_0 = 0,33$.

Režim proudění

Režim proudění je vypočítán pomocí rovnice (2-5). Výsledné hodnoty jsou v následující tabulce:

Tab. 4 – Režim proudění

Model			Prototyp		
Q [m ³ /s]	h _N [m]	Fr [-]	Q [m ³ /s]	h _N [m]	Fr [-]
0,00044	0,008	9,47	0,14	0,074	10,43
0,00158	0,015	9,22	0,50	0,142	10,18
0,00316	0,022	8,84	1,00	0,205	9,81
0,00474	0,027	8,43	1,50	0,256	9,41
0,00632	0,032	7,96	2,00	0,303	8,96
0,00730	0,035	7,63	2,31	0,332	8,65

Režim proudění v přítokovém potrubí vychází jako bystrinný.

Provzdušnění proudu

Výpočet provzdušnění proudu vychází z rovnice (2-13) odvozené Volkartem. Z rovnice vyplývá, že se proud začne provzdušňovat, pokud bude hodnota Boussinesqova čísla větší nebo rovna šesti ($B \geq 6$). V případě prototypu vychází hodnota $B = 8,6 \div 11,4$, proud bude provzdušněný.

V modelovém případě vychází hodnota $B = 7,5 \div 10,3$, proud by měl být provzdušněný.

Vyčíslení parametru χ , který není závislý na plnicím poměru potrubí, vede ke stejným výsledkům.

$$\chi_P = 14,0 > \chi = 8 \quad \Rightarrow \quad \text{proud bude provzdušněný}$$

$$\chi_M = 12,8 > \chi = 8 \quad \Rightarrow \quad \text{proud bude provzdušněný}$$

Nicméně na modelu nebylo provzdušnění proudu pozorováno. Důvodem může být, že Volkartovo vyjádření koncentrace provzdušnění je pro hydraulicky drsné potrubí. V případě modelu se ale jedná o potrubí hydraulicky hladké. To bylo ověřeno výrazem [4]:

$$\frac{u_* \cdot k_s}{\nu} < 5 \quad (4-1)$$

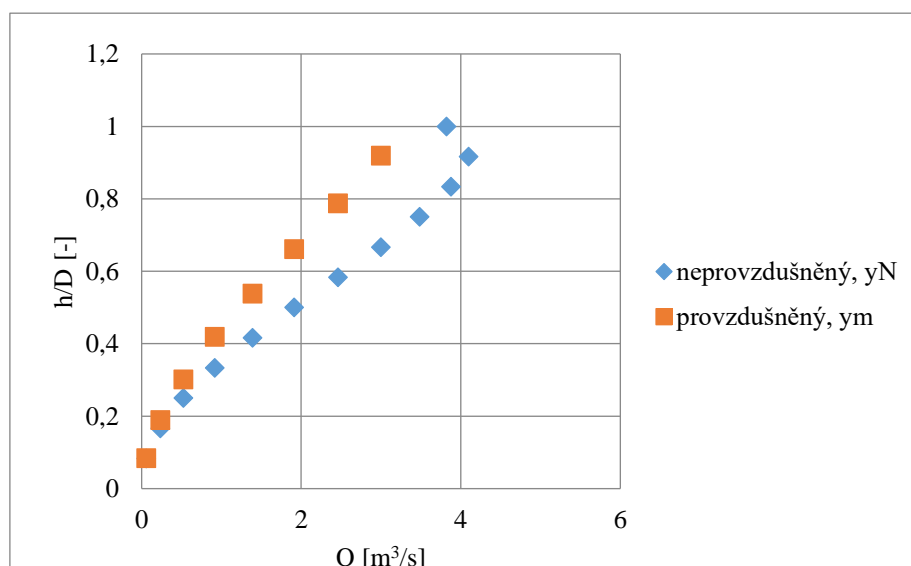
, kde u_* je třecí rychlost, k_s je drsnost potrubí a ν je kinematičká viskozita. Drsnost potrubí je uvažována $k_s = 0,001$ mm. Kinematičká viskozita $\nu = 1,31 \times 10^{-6}$ m²/s.

Protože výsledky provzdušnění na modelu nesouhlasí s pozorováním, lze usoudit, že pro ně daný vztah není platný. Provzdušnění proudu proto bylo spočítáno pouze pro přítokové potrubí v měřítku prototypu.

Pro měřítko prototypu vychází procento provzdušnění pro maximální návrhový průtok $Q_6 = 2310$ l/s až 35 %. Hodnota plnění potrubí pro provzdušněný proud byla vypočítána z rovnice (2-14). Na Obr. 16 je teoretická konzumní křivka neprovzdušněného proudu v přítokovém potrubí porovnána s konzumní křivkou provzdušněného proudu.

Tab. 5 – Provzdušnění proudu, prototyp

Prototyp						
h [m]	h/D [-]	Q [m ³ /s]	y _N [m]	y _m [m]	h _m /h _N [-]	C [%]
0,05	0,083	0,054	0,077	0,084	1,094	9,4
0,10	0,167	0,231	0,160	0,189	1,186	18,6
0,15	0,250	0,523	0,243	0,302	1,243	24,3
0,20	0,333	0,916	0,326	0,419	1,284	28,4
0,25	0,417	1,387	0,409	0,538	1,317	31,7
0,30	0,500	1,911	0,492	0,661	1,344	34,4
0,35	0,583	2,458	0,576	0,788	1,368	36,8
0,40	0,667	2,995	0,661	0,919	1,389	38,9
0,45	0,750	3,484				
0,50	0,833	3,876				
0,55	0,917	4,098				
0,60	1,000	3,821				



Obr. 16 – Konzumní křivka provzdušněného a neprovzdušněného proudu, prototyp

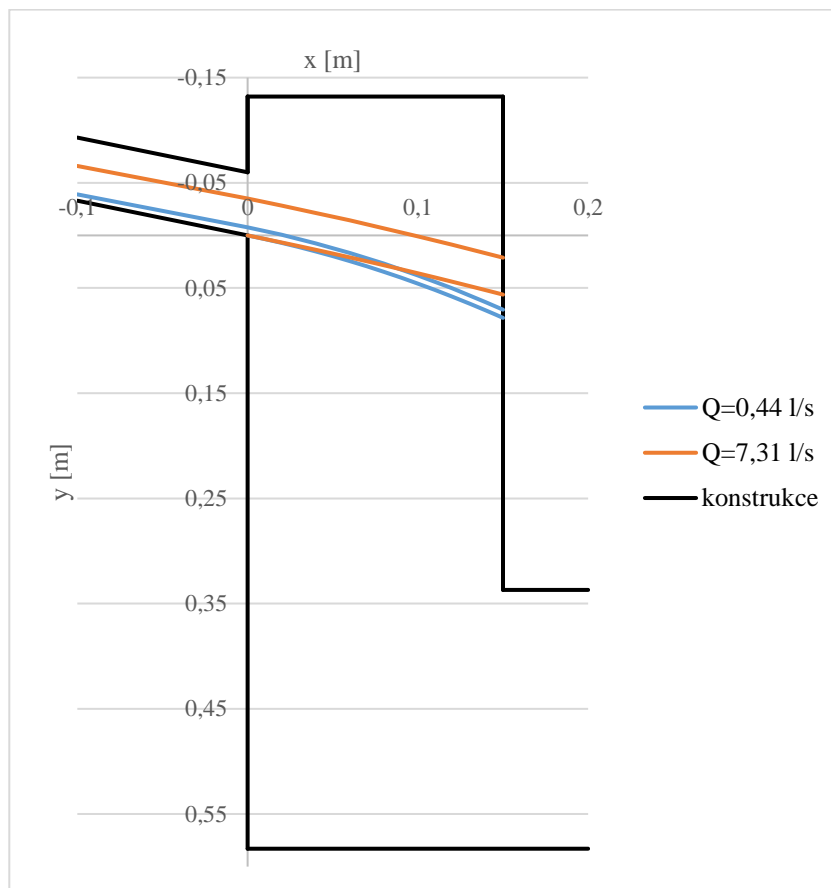
4.2 Spadiště 1

Trajektorie paprsku

Výpočet trajektorie paprsku byl proveden pro všechny návrhové průtoky, tedy Q_1 až Q_6 . Výpočet je řešen úpravou rovnic pro výpočet šikmého vrhu na výslednou rovnici (2-17).

Hodnota výtokového úhlu je $\delta = -18,26^\circ$.

Na Obr. 17 jsou trajektorie pro minimální a maximální návrhový průtok.



Obr. 17 – Trajektorie paprsku pro $Q_1=0,44$ l/s a $Q_6=7,31$ l/s

Režim dopadu paprsku

Klasifikace režimu dopadu paprsku byla provedena pomocí kapitoly 2.2.2. Vzhledem k tomu, že za všech návrhových průtoků dopadá vodní paprsek na protilehlou stěnu spadiště a hodnota Froudova čísla je velmi vysoká, je režim dopadu *R3b*.

Režim dopadu paprsku lze posoudit podle dopadového součinitele I , pokud je režim proudění v přítokovém potrubí bystrinný. Pro tento případ je toto posouzení možné. Výpočet je podle rovnice (2-18). Výška spadiště $s = 0,583$ m, vzdálenost dopadové plochy $D_m = 0,15$ m.

Hraniční hodnoty pro přechod mezi režimy jsou:

$I \approx 0,6$ přechod mezi *R1* a *R2*

$I \approx 0,95$ přechod mezi R2 a R3

Výsledné hodnoty součinitele I jsou v následující tabulce. Výsledky se shodují s pozorováním, pro všechny návrhové průtoky je režim dopadu paprsku R3.

Tab. 6 – Dopadový součinitel

Q [m ³ /s]	v [m/s]	I [-]
0,44	2,06	4,73
1,58	2,89	6,64
3,16	3,47	7,98
4,74	3,85	8,85
6,32	4,12	9,47
7,30	4,25	9,76

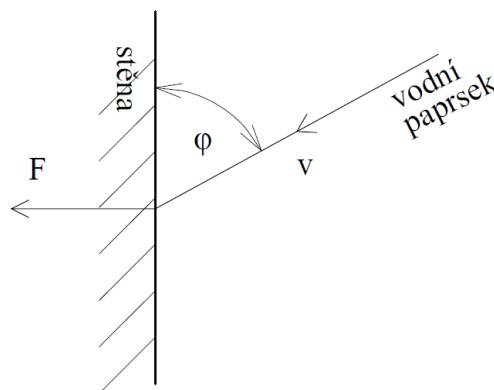
Zatížení stěny spadiště od vodního paprsku

Síla vodního paprsku se při dopadu na stěnu spadiště koncentruje na velmi malou plochu a může představovat velké bodové zatížení na konstrukci. Výpočet hydrodynamické síly působící na konstrukci byl proveden na základě aplikace věty o hybnosti proudu kapaliny [1]. Výsledná rovnice pro zkoumaný případ je:

$$F = \rho \cdot Q \cdot v \cdot \sin \varphi \quad (4-2)$$

, kde ρ je měrná hmotnost vody, Q je průtok, v je rychlost a φ je úhel dopadu paprsku na stěnu.

Schéma dopadového úhlu φ je na následujícím obrázku.



Obr. 18 – Schéma dopadu paprsku na kolmou stěnu

Výsledná působící síla na konstrukci pro všechny návrhové průtoky je uvedena v následující tabulce v měřítku prototypu. Rychlost dopadu paprsku na konstrukci byla pro zjednodušení uvažována jako rychlost v přítokovém potrubí.

Tab. 7 – Zatížení stěny spadiště, měřítko modelu a prototypu

Q [l/s]	φ [°]	F_M [N]	F_P [kN]
0,44	55,9	0,608	0,608
1,58	62,6	3,181	3,181
3,16	65,3	8,736	8,736
4,74	66,4	16,144	16,144
6,32	67,1	21,362	21,362
7,30	67,3	26,492	26,492

Při maximálním návrhovém průtoku vychází zatížení stěny spadiště silou 26,5 N v modelovém měřítku, v případě prototypu vychází zatížení stěny přepočtem podle Froudova zákona podobnosti 26,5 kN.

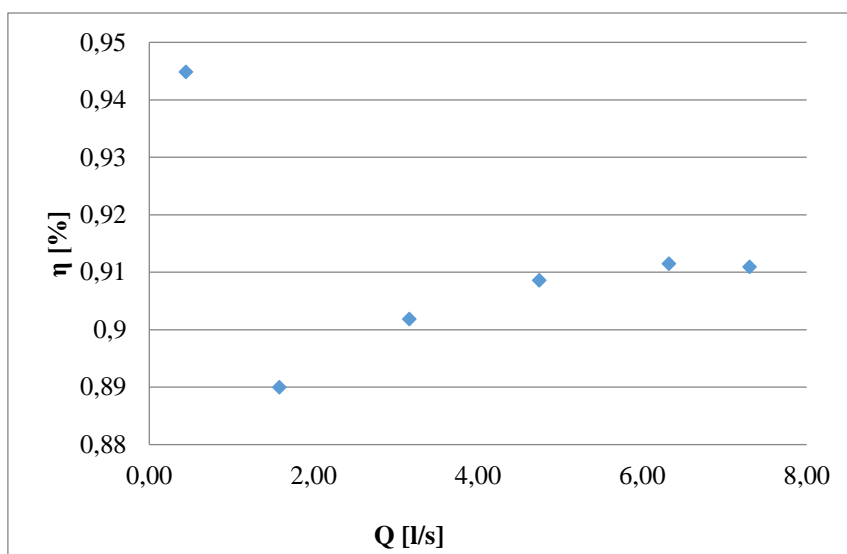
Účinnost tlumení energie

Jedním z úkolů této práce je posouzení tlumících účinků navrženého spadiště. Účinnost tlumení η je ukazatelem funkčnosti tlumení mechanické energie v objektu. Výpočet vychází ze vztahů v kapitole 2.2.4.

Výška spadiště s je 0,583 m. Hladina h_0 je hloubka rovnoměrného proudění v přítokovém potrubí. Hladina h_d je měřená hloubka v uklidňovací komoře na začátku přelivné hrany.

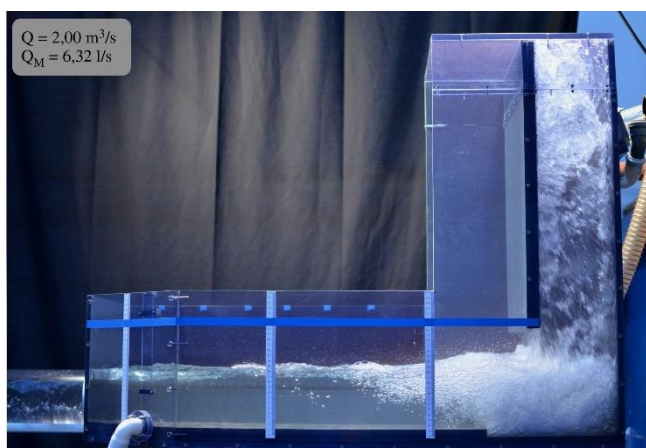
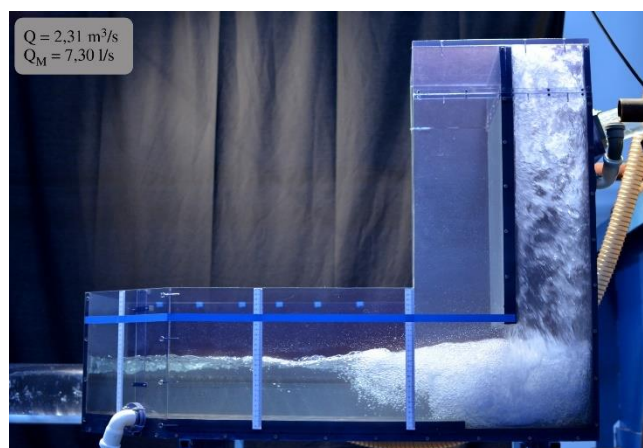
Tab. 8 – Účinnost, model

Q [l/s]	H_0 [m]	H_d [m]	η [%]
0,44	0,76	0,04	0,945
1,58	0,97	0,11	0,890
3,16	1,17	0,11	0,902
4,74	1,31	0,12	0,909
6,32	1,43	0,13	0,912
7,30	1,49	0,13	0,911



Obr. 19 – Účinnost tlumení energie, model

Účinnost tlumení kinetické energie proudu se pohybuje ve velmi vysokých hodnotách. Z křivky účinnosti se vymyká pouze hodnota pro průtok $Q_1 = 0,44$ l/s. Pro tento průtok je hodnota účinnosti nejvyšší. Je to zapříčiněno malou hloubkou vody v uklidňovací komoře. Pro tento průtok totiž platí, že $Q_{\text{přítok}} = Q_{\text{odtok}}$ na Areálovou ČOV. Hladina v uklidňovací nádrži zůstává konstantní a nedochází k přepadu přes přelivnou hranu do odlehčení.

Obr. 20 – Tlumení energie, průtok Q_5 Obr. 21 – Tlumení energie, průtok Q_6

Z obrázků 20 a 21 je vidět, že utlumení mechanické energie proběhne bez problému.

4.2.1 Varianty

Bylo vytvořeno šest variant dopadové desky (viz 3.5.2.1). Varianty se liší rozměry desky a tvarem a polohou výstupků.

Pozici dopadu paprsku lze vypočítat z trajektorie proudu. V následující tabulce jsou pro jednotlivé průtoky dopočítány hodnoty y -ové souřadnice bodu dopadu. Hodnota $y = 0$ se nachází v úrovni dna přítokového potrubí v bodě výtoku do spadiště (viz souř. systém Obr. 7).

Tab. 9 – Souřadnice dopadu paprsku

Q [l/s]	y [m]
0,44	0,075
1,58	0,057
3,16	0,049
4,74	0,044
6,32	0,041
7,30	0,039

Na následujících fotografiích je vidět objekt Spadiště 1 za návrhového průtoku $Q_2 = 1,58$ l/s a pro všechny varianty dopadové desky 1 až 6. Na tomto průtoku je nejlépe vidět, jak se vodní paprsek po dopadu na stěnu spadiště chová.

Varianta 1 je hladká dopadová deska o výšce 464 mm. Paprsek se po dopadu dělí, část se odráží směrem vzhůru a naráží do stropní konstrukce. Zbylá část paprsku sklouzne po hladké desce do ukliďňovací nádrže.

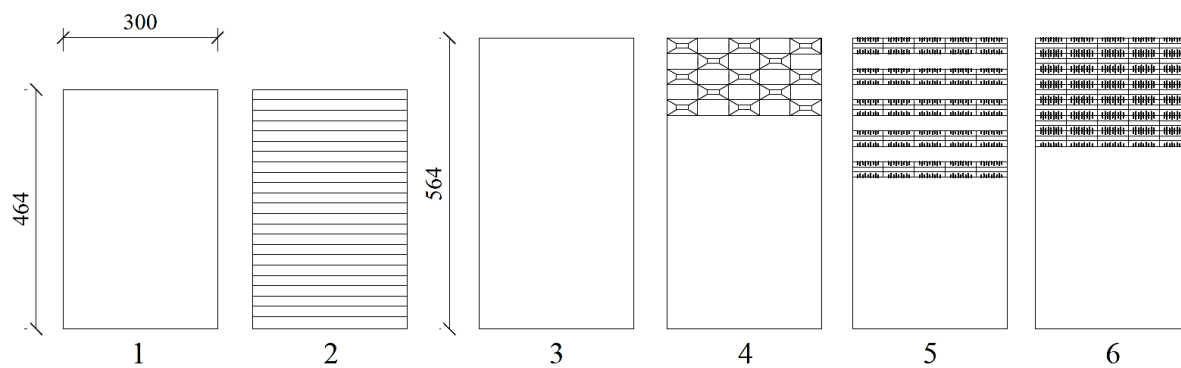
Při variantě 2 byly na desku přidány příčné lišty. Menší podíl paprsku se odráží směrem ke stropu. Ve vertikální šachtě spadiště je voda silně propěňná, což je důsledkem roztržení paprsku na dopadové stěně.

Varianta 3 přinesla zvýšení stropu o 100 mm a opět hladkou dopadovou desku. Zkoumalo se, zda by zvýšení stropu nebylo možným řešením. Toto opatření se ukázalo jako bezpředmětné. Mohlo by fungovat, ale varianta má velké prostorové nároky a finančně je nevýhodná. Samotné posunutí stropní konstrukce je tedy neefektivní.

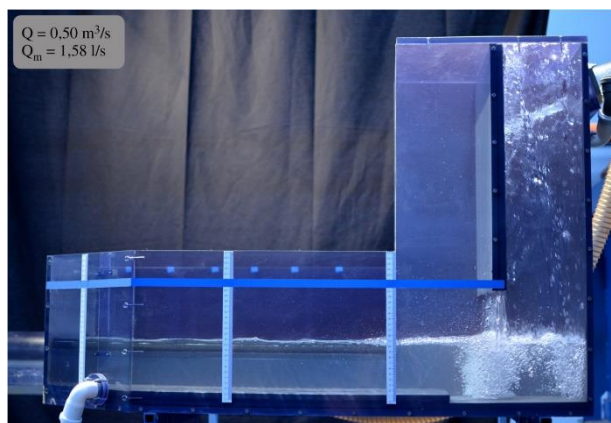
Varianta 4 jsou šachovnicově vyskládané prvky ve tvaru komolého jehlanu. Při této variantě se paprsek odráží a poměrně velká část směřuje k levému hornímu rohu spadiště. Může to být způsobeno špatným umístěním prvků, nicméně v tomto uspořádání není varianta 4 vhodnou volbou.

Varianta 5 představuje opět příčné lišty, tentokrát se zkosenými hranami. Lišty jsou na celé horní polovině desky, paprsek na ně dopadá. Proud odražený dolů je silně propěňný.

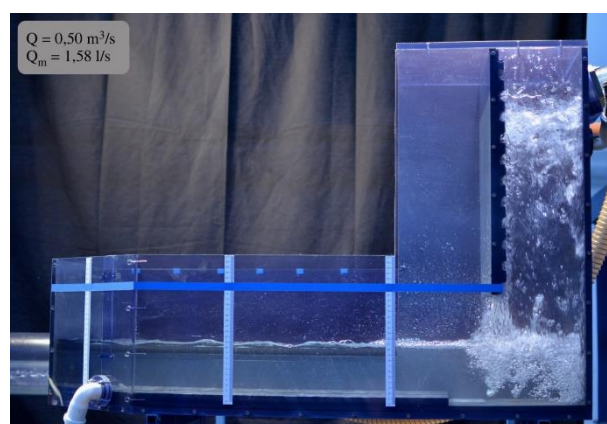
Varianta 6 je tvořena příčnými lištami, které začínají nad místem dopadu paprsku. Proud odražený vzhůru je lištami usměrněn. Po spodní hladké části dopadové desky voda sklouzne a snižuje se tak propěnění vody ve spadišťové šachtě. Z trajektorie paprsku (Tab. 9) lze určit pozici dopadu, nad níž se odrazníky umístí.



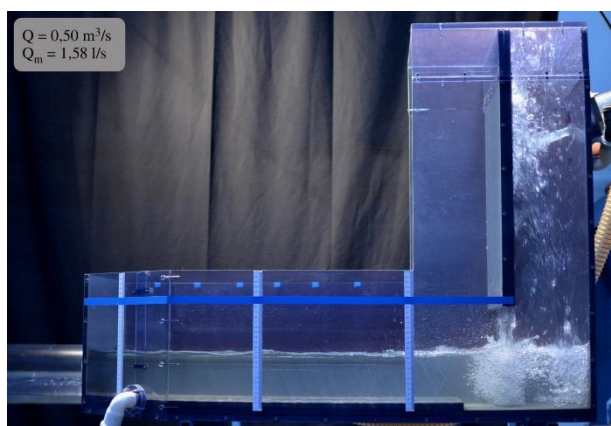
Obr. 22 – Varianty dopadové desky 1-6



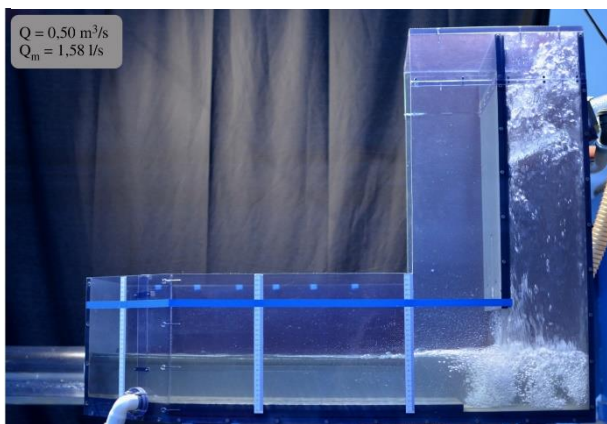
Obr. 23 – Spadiště 1, varianta 1, $Q_2 = 1,58 \text{ l/s}$



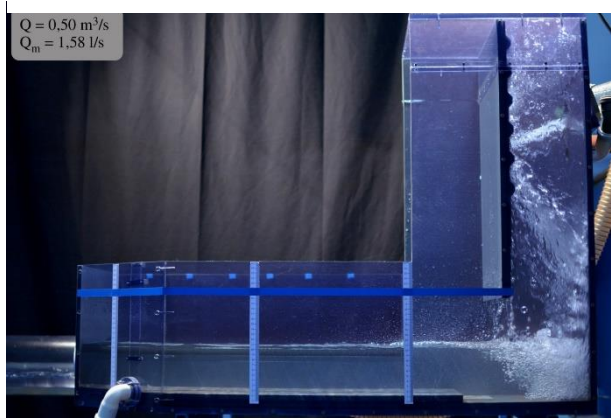
Obr. 24 – Spadiště 1, varianta 2, $Q_2 = 1,58 \text{ l/s}$



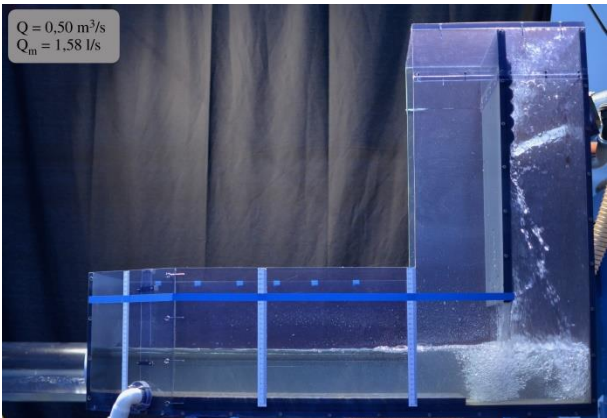
Obr. 25 – Spadiště 1, varianta 3, $Q_2 = 1,58 \text{ l/s}$



Obr. 26 – Spadiště 1, varianta 4, $Q_2 = 1,58 \text{ l/s}$



Obr. 27 – Spadiště 1, varianta 5, $Q_2 = 1,58 \text{ l/s}$



Obr. 28 – Spadiště 1, varianta 6, $Q_2 = 1,58 \text{ l/s}$

4.3 Spadiště 2

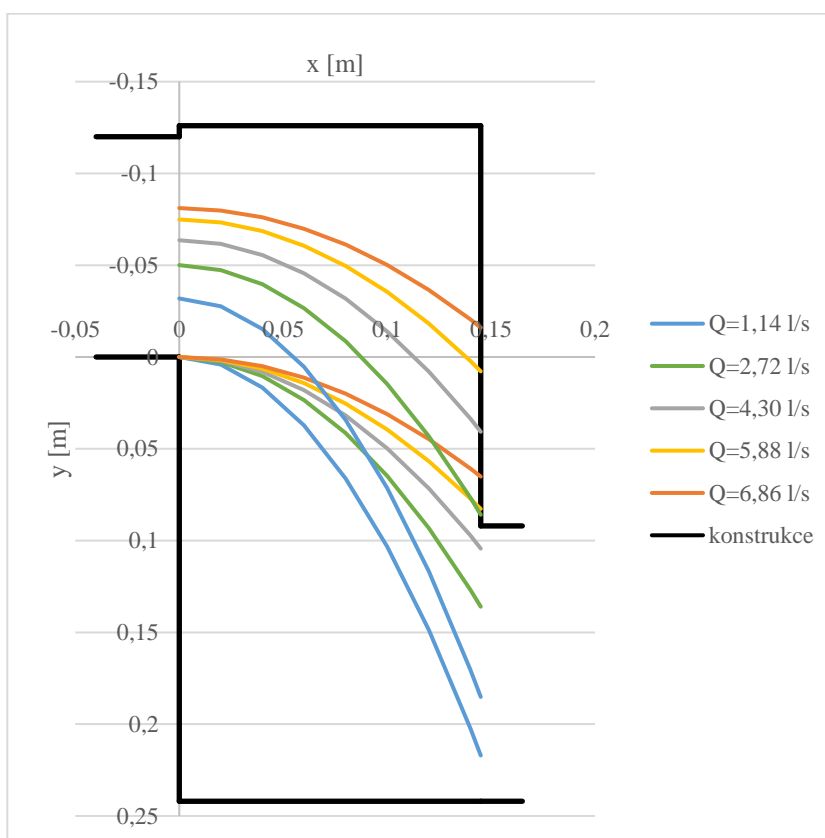
Rozměry tohoto spadiště vycházejí z předběžného návrhu. V průběhu měřících prací na modelu vznikl požadavek upravit půdorysné rozměry spadiště tak, aby dopadající paprsek nedopadal na protilehlou stěnu, ale do dolní vody. Tento úkol řešen v odstavci *Úprava rozměrů spadiště* v této kapitole. Výsledná hodnota nebyla na modelu ověřována.

Trajektorie paprsku

Výpočet trajektorie vodního paprsku vychází ze stejných vztahů jako v objektu Spadiště 1. Výsledné hodnoty se velmi dobře shodují s modelovými výsledky. Výpočet byl proveden pro návrhové průtoky Q_2 až Q_6 . Hodnoty návrhových průtoků jsou nižší než ve Spadišti 1. Je to z toho důvodu, že se průtok dělí a 0,44 l/s odtéká (na ČOV).

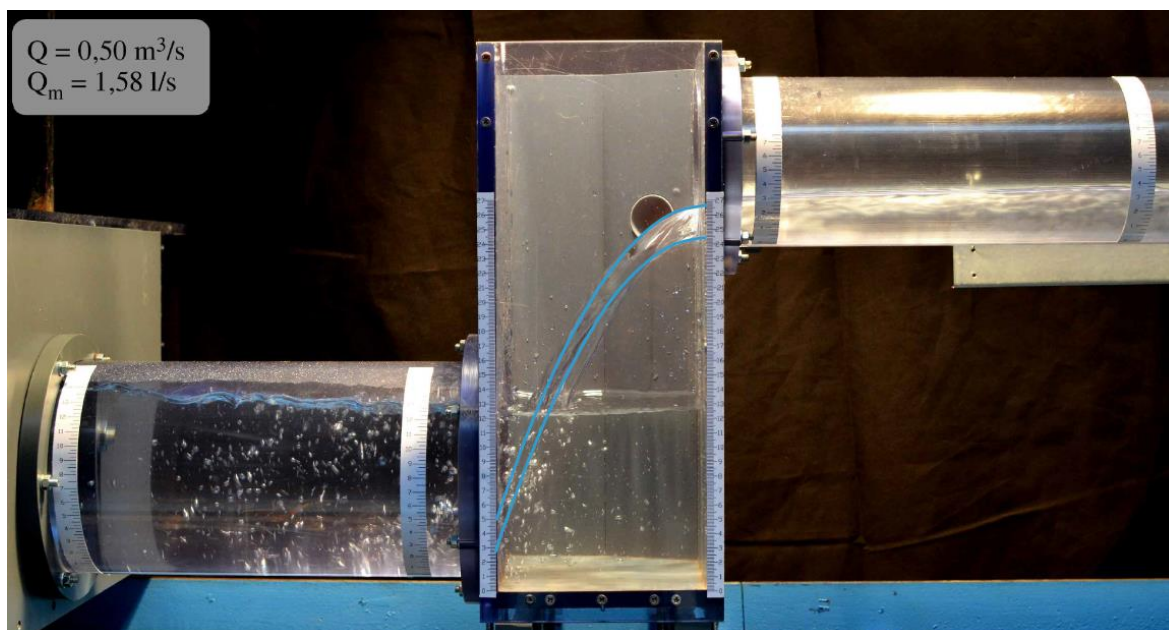
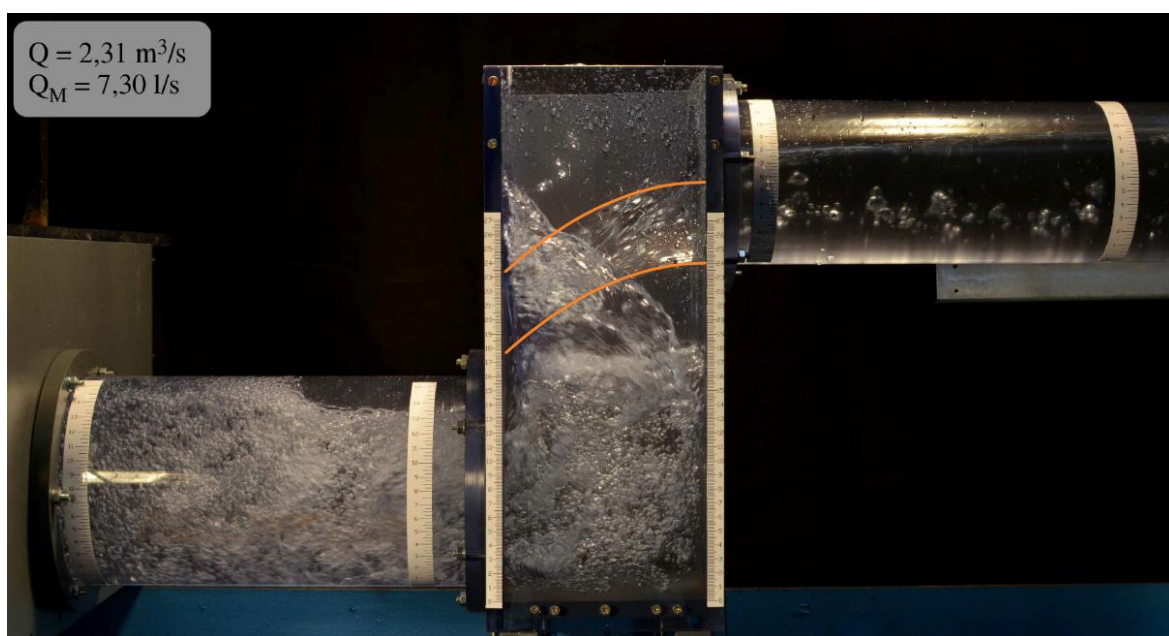
Výchozí hodnotou pro horní obálku trajektorie paprsku je kritická hloubka proudění h_c , která na přelivné hraně nastává (hodnoty viz 4.4).

Hodnota výtokového úhlu je $\delta = -0,17^\circ$.



Obr. 29 – Trajektorie paprsku pro Q_2 až Q_6 , Spadiště 2

Kontrola shody výpočtu trajektorie a modelových hodnot je vidět na obrázcích 30 a 31.

Obr. 30 – Trajektorie paprsku, $Q=1,58 \text{ l/s}$ Obr. 31 – Trajektorie paprsku, $Q=7,31 \text{ l/s}$

Režim dopadu paprsku

Z výpočtu trajektorie vodního paprsku je možné odvodit režim dopadu paprsku (podle rozdělení viz Kap. 2.2.3).

- $Q_2 = 1,14 \text{ l/s}$ => režim *R1*
- $Q_3 = 2,72 \text{ l/s}$ => režim *R2a*
- $Q_4 = 4,30 \text{ l/s}$ => režim *R2c*
- $Q_5 = 5,88 \text{ l/s}$ => režim *R3*
- $Q_6 = 6,86 \text{ l/s}$ => režim *R3*

Ověření režimu dopadového součinitele I nelze provést, proudění ve spojovací stoce je v říčním režimu. Dopadový součinitel I je vyjádřen jen pro bystrinné proudění.

Úprava rozměrů spadiště

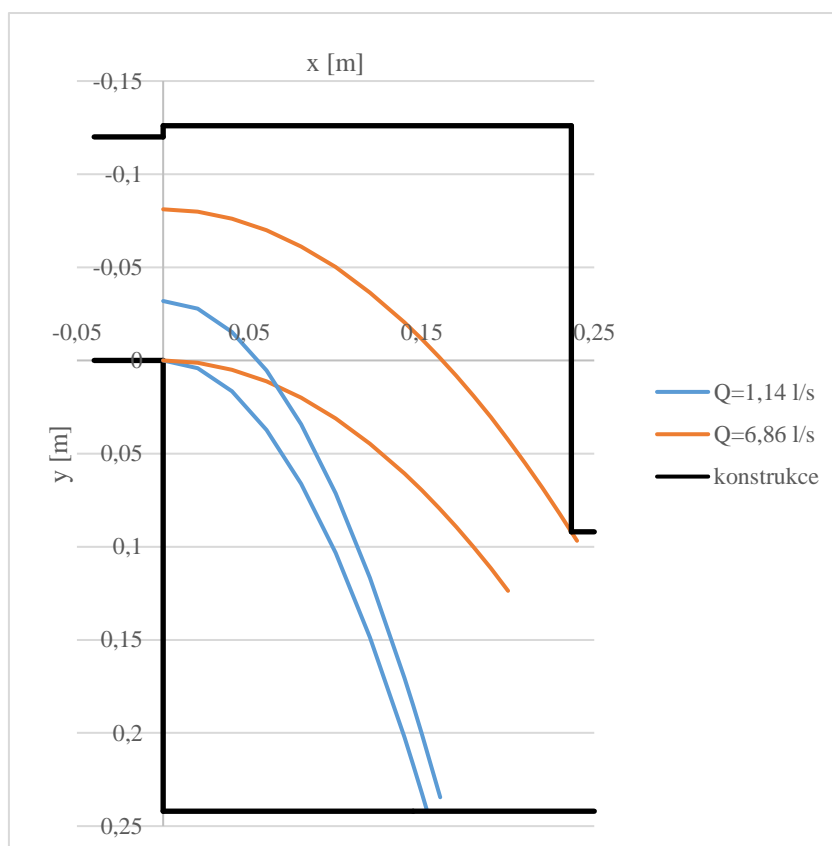
Zadání provozovatele objektu bylo navrhnout takové rozměry spadiště, aby nemohlo dojít k poškození konstrukce. Tedy aby vodní paprsek nedopadal na stěnu spadiště, a to ani částečně. Cílem tedy je navrhnout takovou délku spadiště, aby byl režim dopadu paprsku v mezích $R1$ až $R2b$. Původní délka spadiště (vodorovná vzdálenost mezi vtokovou hranou a dopadovou stěnou) je 0,145 m.

Při zachování stávajícího průměru odtokového potrubí DN 150 je hledána taková souřadnice x , aby souřadnice $y = 0,092$ m (viz souřadný systém Obr. 29). Bod $y = 0,092$ m je rohovým bodem, kde se vrchol odtokového potrubí napojuje na stěnu spadiště, dle použitého souřadného systému. Pro stejné výchozí hodnoty jako při výpočtu trajektorie paprsku je pro danou hodnotu y dopočítána souřadnice x .

Tab. 10 – Souřadnice x dopadu paprsku pro hodnotu $y = 0,092$ m

Q [l/s]	x [m]
1,14	0,110
2,72	0,148
4,30	0,177
5,88	0,206
6,86	0,237

Pro maximální návrhový průtok Q_6 je výsledná hodnota 0,237 m. Při prodloužení spadiště alespoň o 0,092 m nebude docházet k poškození konstrukce. Na Obr. 32 je schéma Spadiště 2 s upravenými rozměry a maximálním a minimálním návrhovým průtokem.



Obr. 32 – Trajektorie maximálního a minimálního návrhového průtoku, upravené rozměry spadiště

4.4 Spojovací potrubí

Určení režimu proudění ve spojovacím potrubí mezi objekty Uklidňovací nádrž a Spadiště 2 je důležité z hlediska stanovení okrajových podmínek pro další hydraulické výpočty.

Výpočet je proveden pro návrhové hodnoty průtoku Q_2 až Q_6 .

Režim proudění

Spojovací potrubí je za všech průtoků v říčním režimu proudění.

Tab. 11 – Režim proudění, spojovací potrubí

Q [l/s]	h_N [m]	Fr [-]	h_c [m]
1,14	0,033	0,95	0,032
2,72	0,053	0,91	0,050
4,30	0,069	0,85	0,064
5,88	0,088	0,73	0,075
6,86	0,102	0,61	0,081

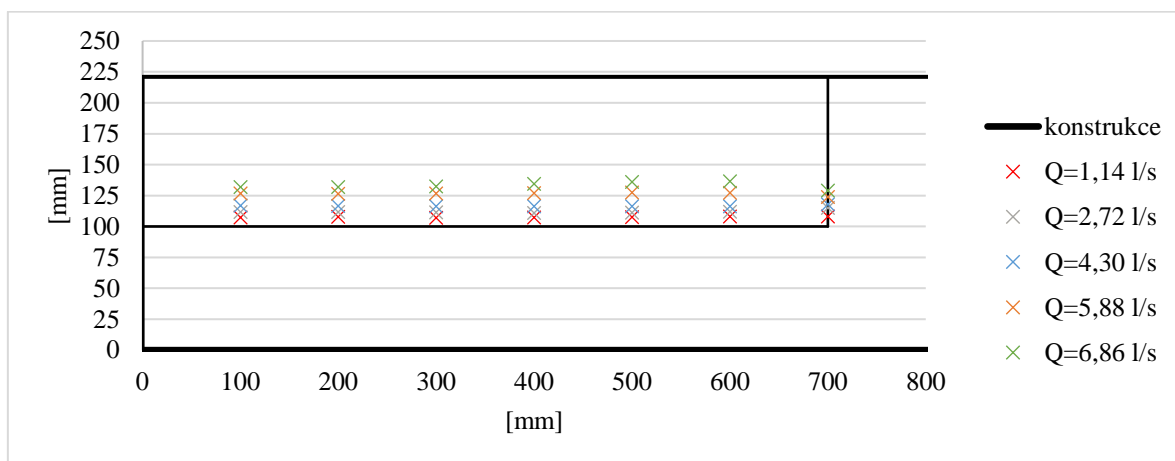
4.5 Uklidňovací nádrž s bočním přelivem

Hlavním úkolem bylo počítání podélného a příčného profilu hladin ve sběrném žlabu podle vztahů již experimentálně vyzkoušených. Účelem bylo porovnat teoretickou křivku hladiny s hodnotami naměřenými na modelu a ověřit jejich shodu. Samotný přepad přes přelivnou hranu je (při specifickém průtoku na 1 bm délky přelivu 300 l/s) velmi stabilní a rovnoměrný.

Sběrný žlab je neprizmatický, směrem ke spojovacímu potrubí se rozšiřuje. V příčném řezu má tvar U profilu a podélný sklon 0,4 %.

Podélný profil hladiny na přelivné hraně

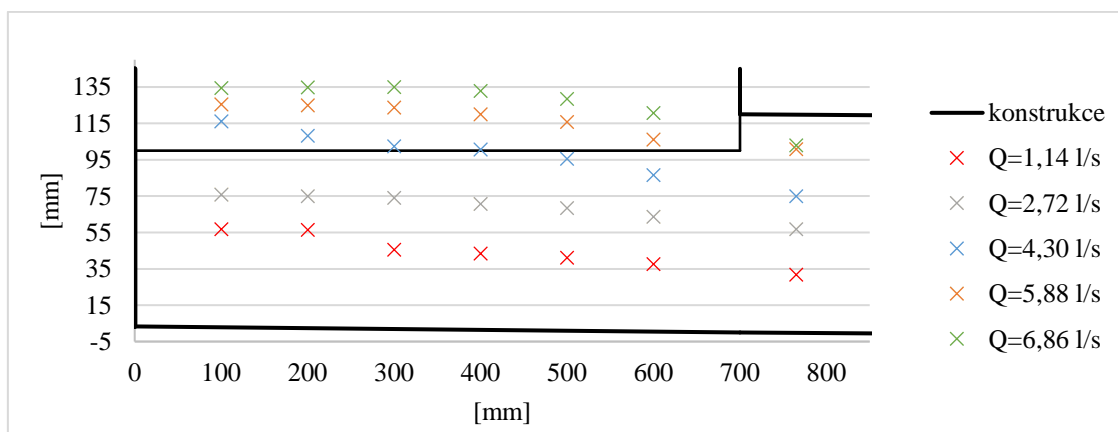
Zaměření podélného profilu hladiny na přelivné hraně bylo provedeno pro průtoky Q_2 až Q_6 v měřících bodech 7 až 12.



Obr. 33 - Průběh hladiny na přelivné hraně, Uklidňovací nádrž, data z měření

Podélný profil hladiny ve sběrném žlabu – experimentální data

Zaměření podélného profilu hladiny ve sběrném žlabu bylo provedeno pro průtoky Q_2 až Q_6 v měřících bodech 38 až 43.



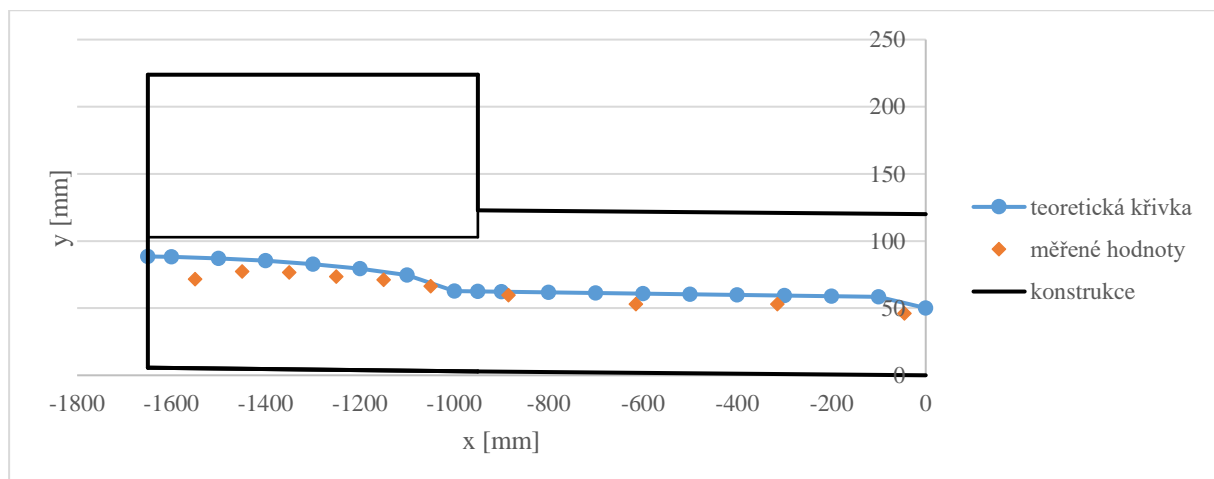
Obr. 34 - Průběh hladiny ve sběrném žlabu, Uklidňovací nádrž, data z měření

Podélný profil hladiny ve sběrném žlabu

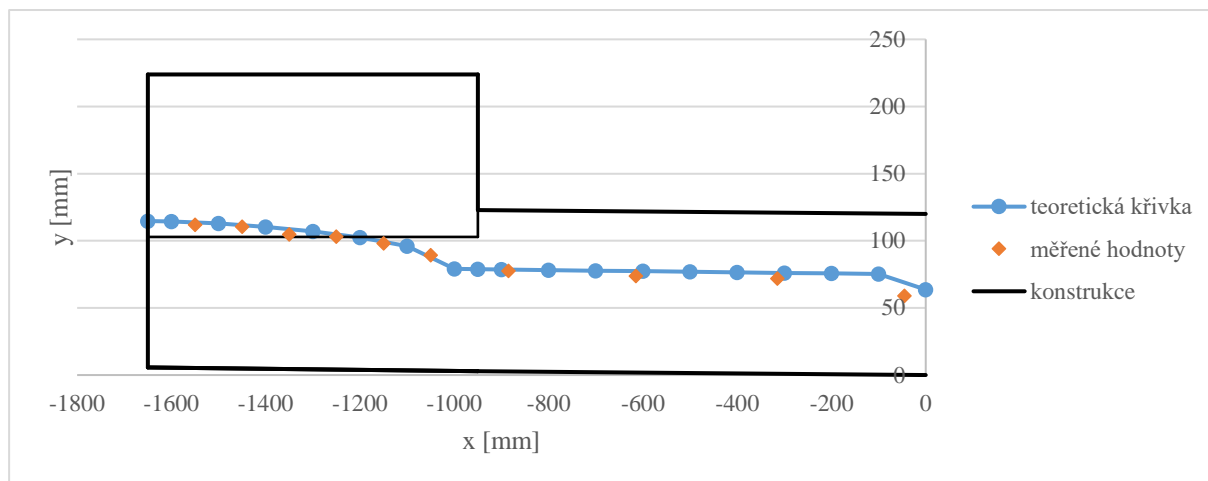
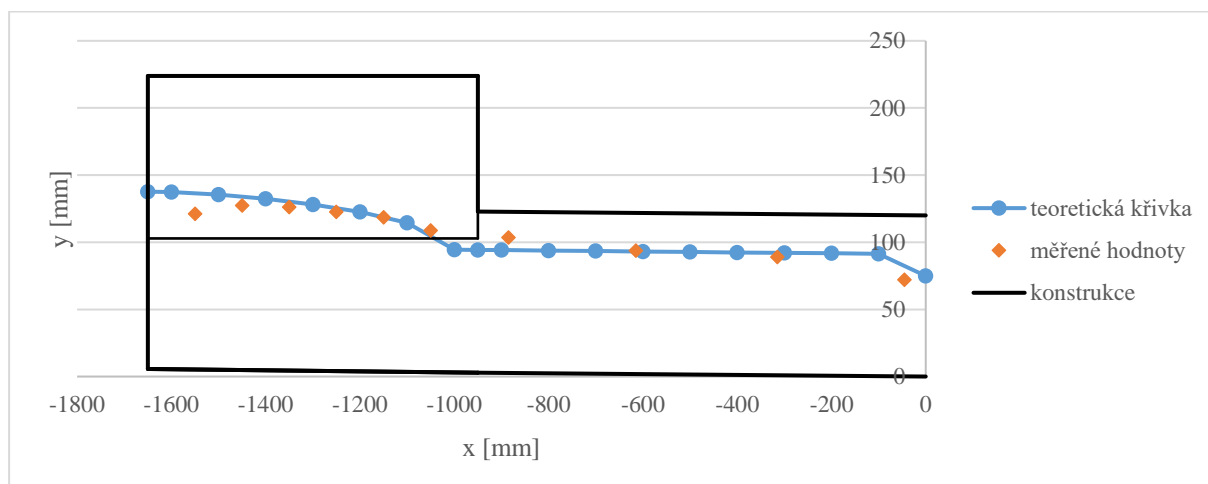
Výpočet byl veden metodou po úsecích, pomocí rovnice (2-22) (viz Kap. 2.2.5). Určité členy rovnice je z výpočtu možno vyloučit. Směr nátoku na přelivnou hranu je uvažován jako kolmý, $\Phi = 90^\circ$. Člen rovnice $U \cos \Phi / V$, zohledňující směr nátoku, je roven nule. Člen $Q^2 / g S^3 * \partial S / \partial x$ vyjadřuje změnu Froudova čísla v závislosti na změně průřezu [7] a není ve výpočtu zohledňován.

Zásadním úkolem bylo určit počáteční okrajovou podmínku. Její stanovení vyžadovalo následující rozvahu. Při výpočtu podélného profilu metodou po úsecích je určující režim proudění v potrubí, který určí směr výpočtu. V případě bystřínného režimu je postup výpočtu shora ve směru proudění, v případě režimu říčního je to směrem proti proudu. V první řadě byl tedy úkol zjistit režim proudění ve sběrném žlabu a navazujícím potrubí. V potrubí byl zjištěn říční režim proudění (viz Kap. 4.4). Jelikož mezi žlabem a potrubím nedochází k přechodu, dá se usuzovat, že je režim proudění ve žlabu taktéž říční. Pro postup výpočtu proti proudu bylo nutné stanovit dolní počáteční okrajovou podmínku. Za okrajovou podmínku byla určena hloubka kritického proudění h_c , která nastává na konci spojovacího potrubí na přelivné hraně do objektu Spadiště 2.

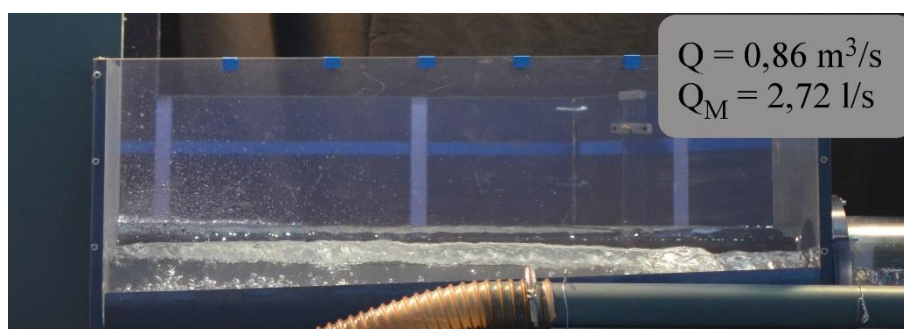
Výpočet byl proveden pro tři návrhové průtoky Q_3 , Q_4 a Q_5 . Průtok Q_2 nebyl do výpočtu zahrnut, protože žlab není dostatečně plněn. Při průtoku Q_6 nastává nedokonalý přepad, který komplikuje výpočet. Výsledný průběh je na následujících obrázcích. Z porovnání mezi teoretickou křivkou a měřenými body je vidět, že dochází k velmi dobré shodě.

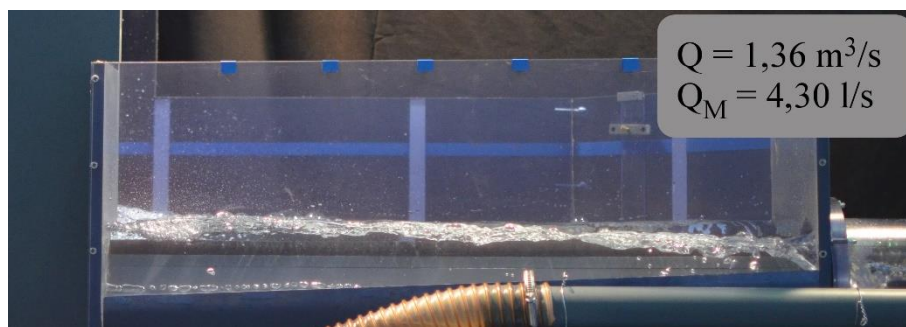
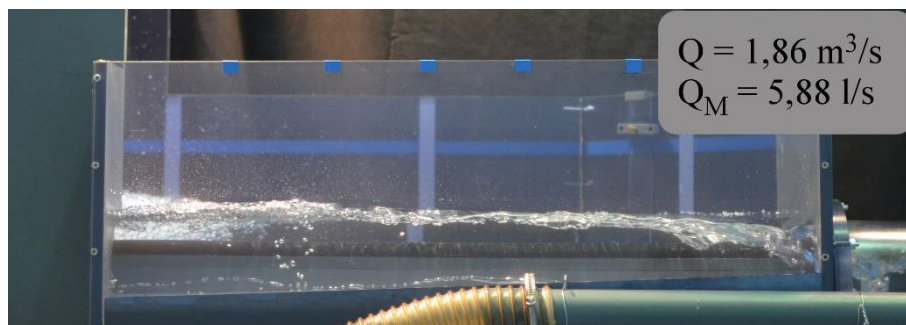


Obr. 35 – Podélný profil hladiny, $Q_3=2,72$ l/s

Obr. 36 – Podélný profil hladiny, $Q_4=4,30$ l/sObr. 37 – Podélný profil hladiny, $Q_5=5,88$ l/s

Reálný průběh podélného profilu ve stoce při počítaných průtocích je vidět na následujících obrázcích.

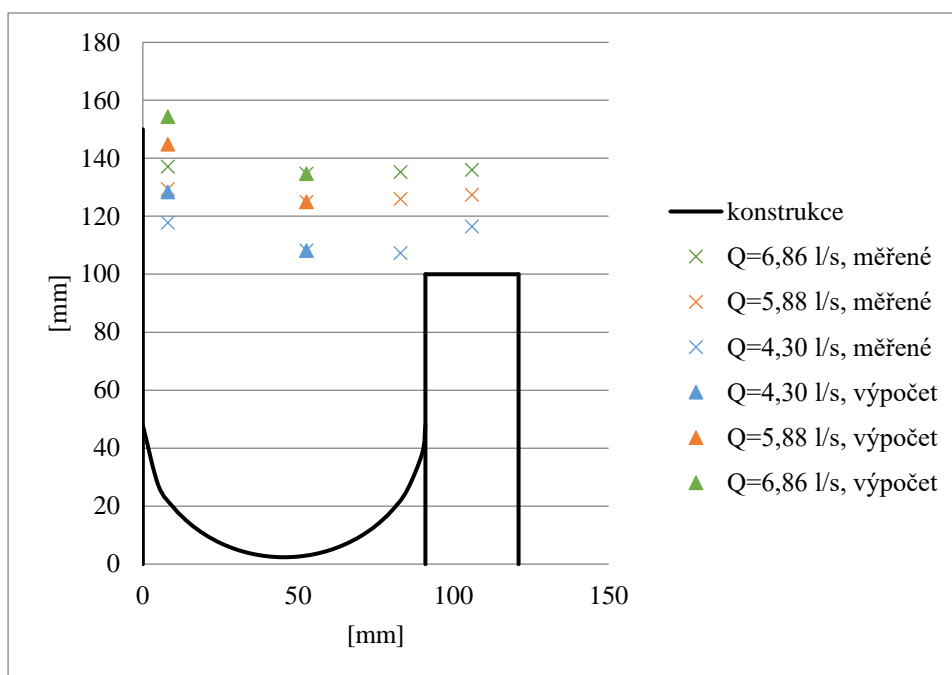
Obr. 38 – Podélný profil hladiny, $Q_3=2,72$ l/s, model

Obr. 39 – Podélný profil hladiny, $Q_4=4,30$ l/s, modelObr. 40 – Podélný profil hladiny, $Q_5=5,88$ l/s, model

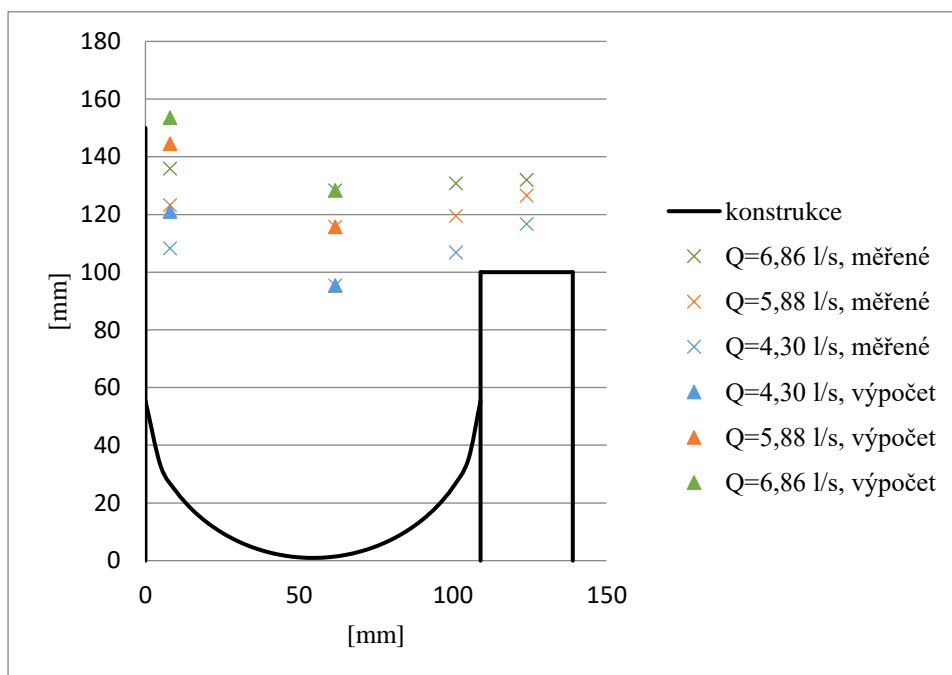
Příčný profil hladiny ve sběrném žlabu

Metoda výpočtu je popsána v kapitole 2.2.6. Snahou je vyjádřit maximální hloubku ve žlabu t_s v závislosti na referenční hloubce h . Odvozené byly rovnice pro obdélníkový a lichoběžníkový příčný průřez. Tvar modelového žlabu je U, proto byly vyzkoušeny a porovnány obě varianty. Výsledky jsou uvedeny pro dva zvolené profily 39 a 42 (viz Obr. 14). Měření bylo provedeno pro tři návrhové průtoky Q_4 , Q_5 a Q_6 .

Při použití výrazu pro lichoběžníkový profil se měřená data a vypočítaná hodnota t_s neshodují. Hloubka t_s vychází větší než naměřené hodnoty.



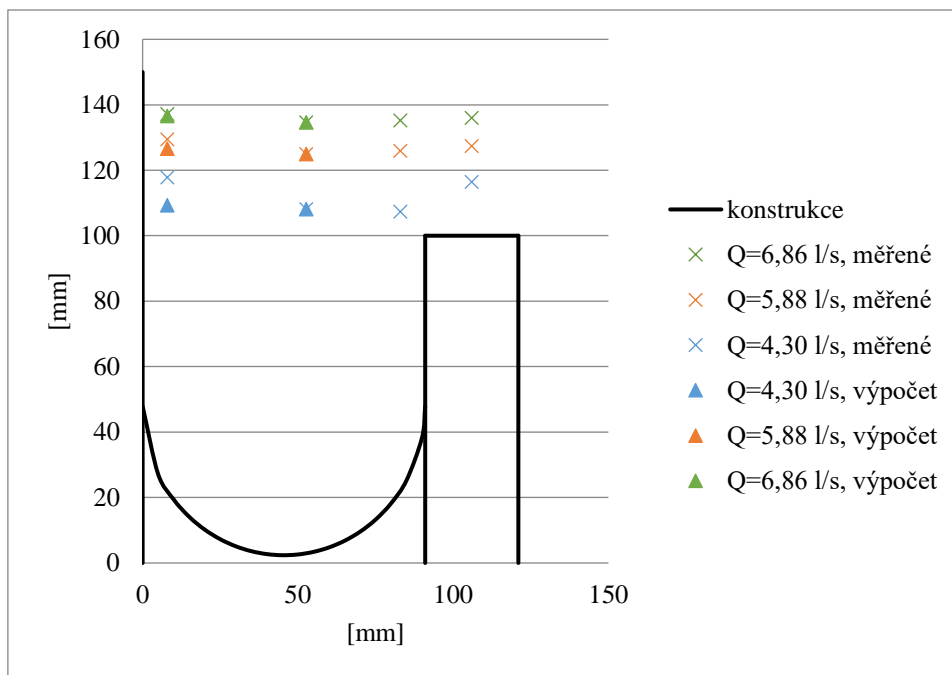
Obr. 41 - Příčný průběh hladiny, profil 39



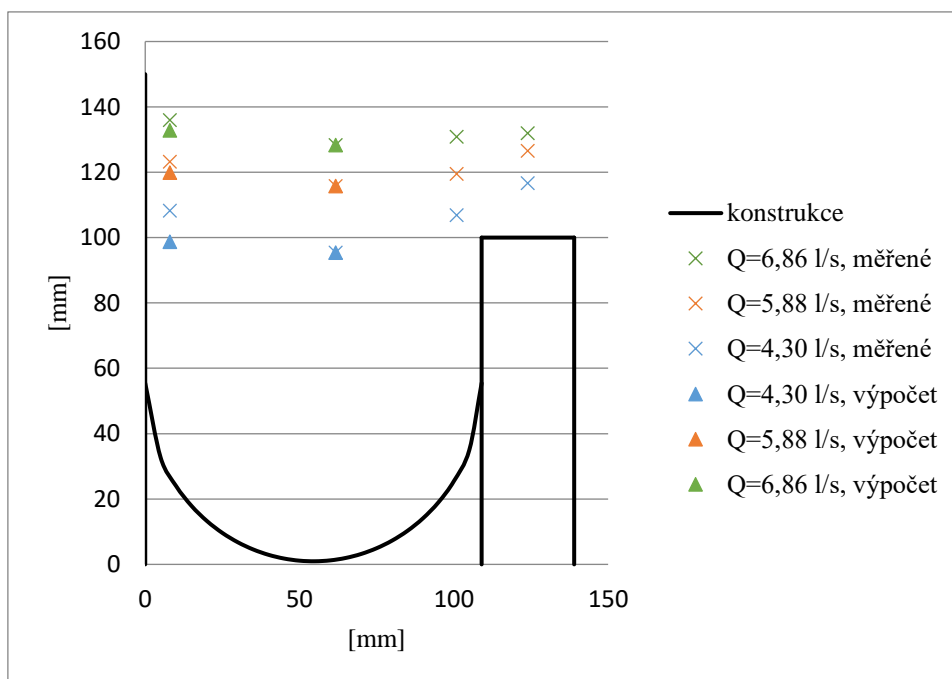
Obr. 42 - Příčný průběh hladiny, profil 42

Při použití výrazu pro obdélníkový profil se hloubka t_s lépe shoduje s naměřenými daty, ale je mírně podhodnocená.

Faktor proporcionality byl použit $\gamma = 1,5$.



Obr. 43 - Příčný průběh hladiny, profil 39



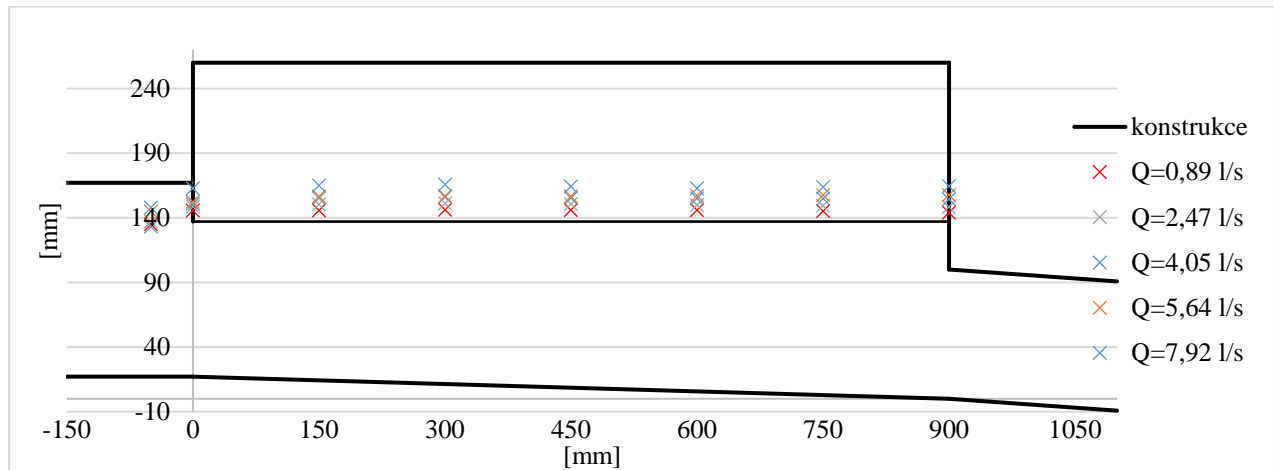
Obr. 44 - Příčný průběh hladiny, profil 42

4.6 Rozdělovací komora s bočním přelivem

Tato kapitola obsahově navazuje na kapitolu přechozí. Řešen je podélný a příčný profil hladiny ve sběrném žlabu. Boční sběrný žlab je prizmatický se sklonem 2 %.

Podélný profil hladiny na přelivné hraně

Zaměření podélného profilu hladiny na přelivné hraně bylo provedeno pro průtoky Q_2 , Q_3 , Q_4 , Q_5 , Q_{\max} v měřících bodech 25 až 31.

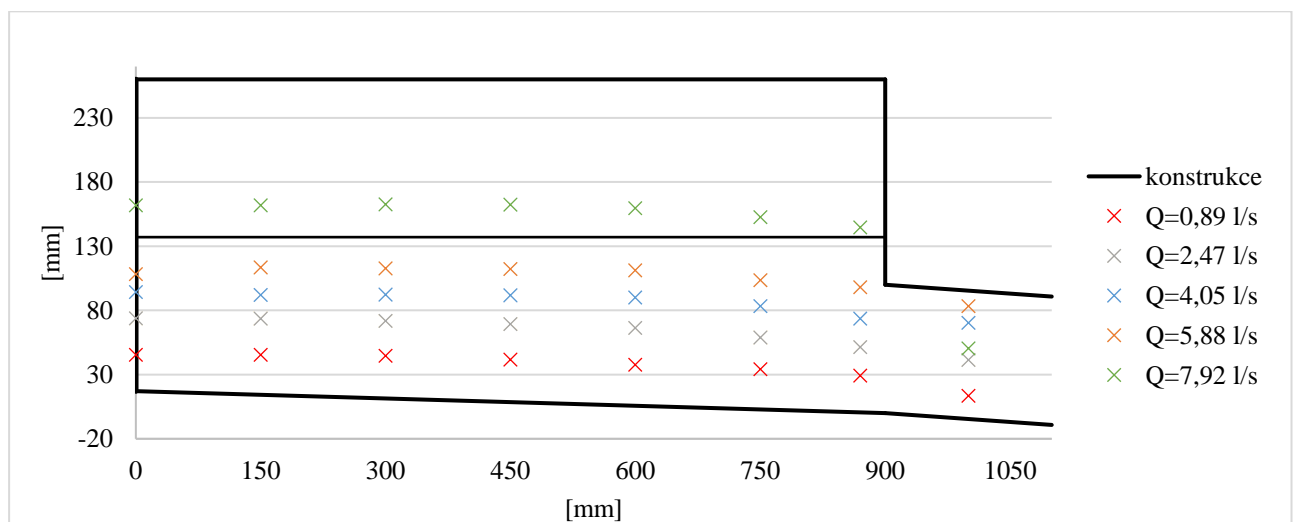


Obr. 45 – Průběh hladin na přelivné hraně, Rozdělovací komora, data z měření

Z grafu je vidět, že výška hladiny na přelivu nekolísá a specifický průtok je tedy možno uvažovat jako konstantní.

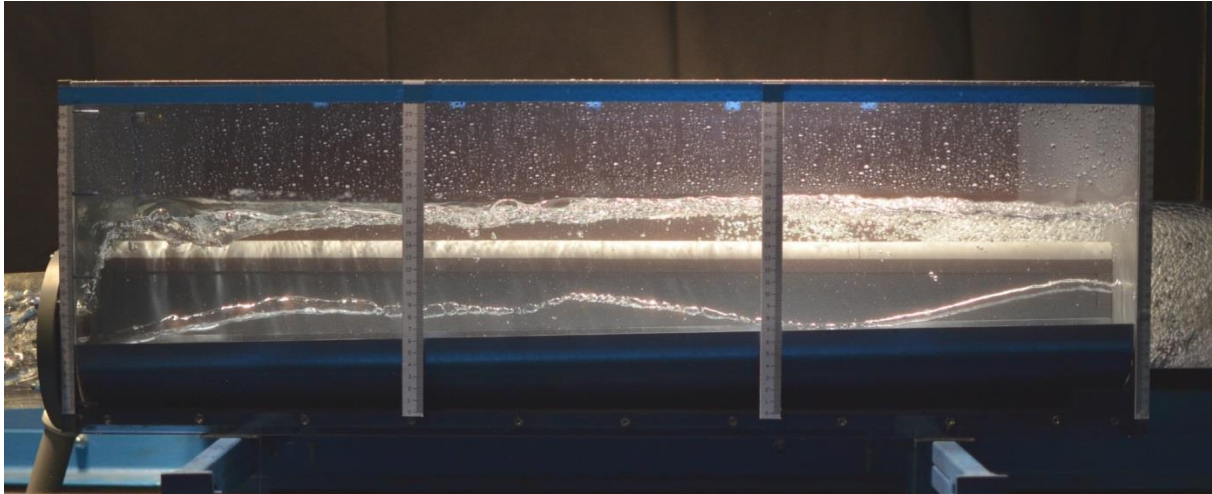
Podélný profil hladiny ve sběrném žlabu – experimentální data

Zaměření podélného profilu hladiny ve sběrném žlabu bylo provedeno pro průtoky Q_2 , Q_3 , Q_4 , Q_5 , Q_{\max} v měřících bodech 44 až 50.



Obr. 46 – Průběh hladin ve sběrném žlabu, Rozdělovací komora, data z měření

Při maximálním návrhovém průtoku $Q_{\max}=7,92$ l/s dochází ve žlabu ke vzniku pouze jednoho víru (viz 2.2.6). Vzhledem k zahlcení odtokové stoky zde vzniká potřeba přísávat vzduch z prostoru dolní vody a vytváří vír se vzduchovým jádrem.

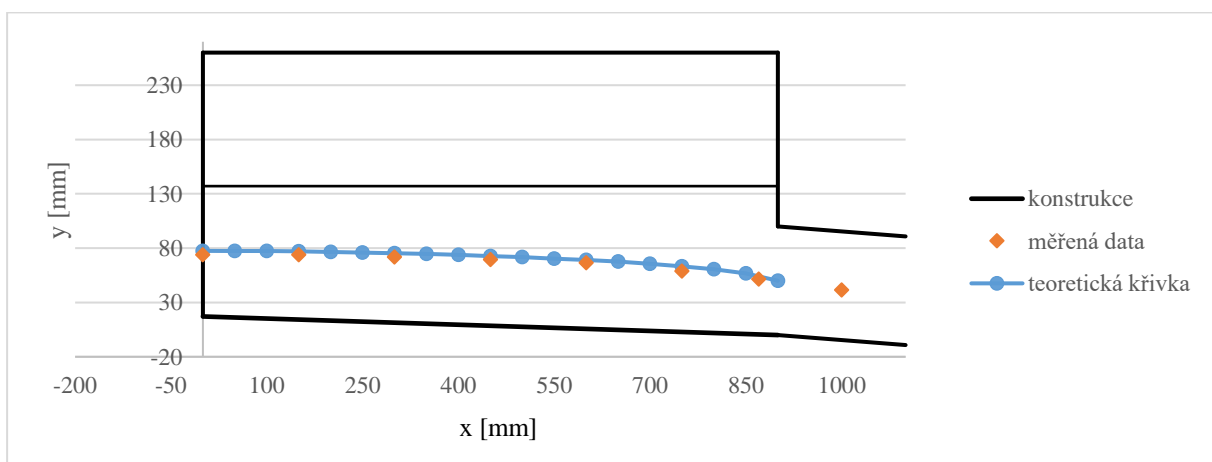
Obr. 47 – Vír se vzduchovým jádrem, modelový průtok Q_{\max}

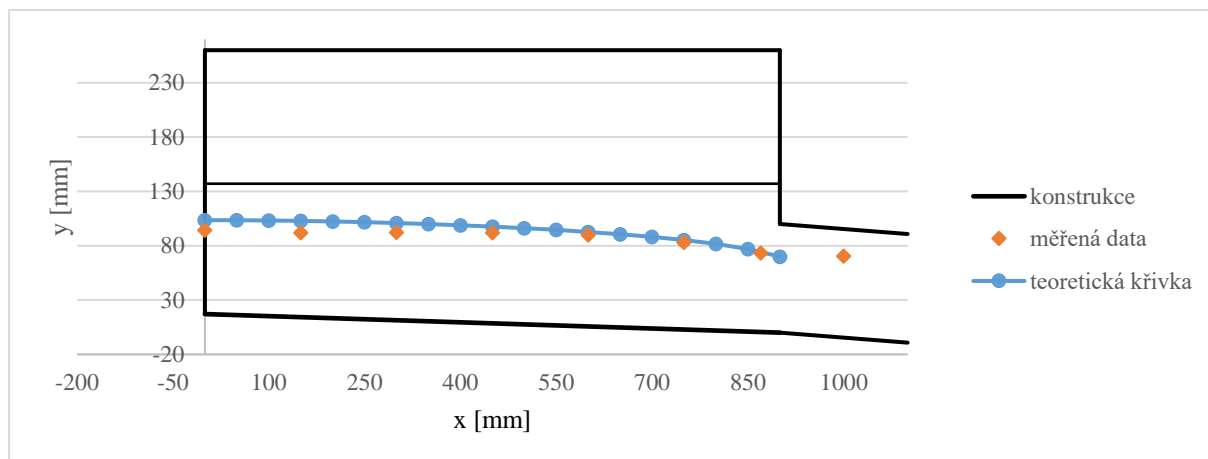
Podélný profil hladiny ve sběrném žlabu

Jak již bylo řečeno, výpočet vychází ze stejných vztahů jako v Kap. 4.5. I zde je směr nátoky na přelivnou hranu uvažován jako kolmý, $\Phi = 90^\circ$. Člen rovnice $U \cos \Phi / V$, zohledňující směr nátoky, je tedy roven nule. Člen $Q^2 / g S^3 * \partial S / \partial x$ je zanedbán.

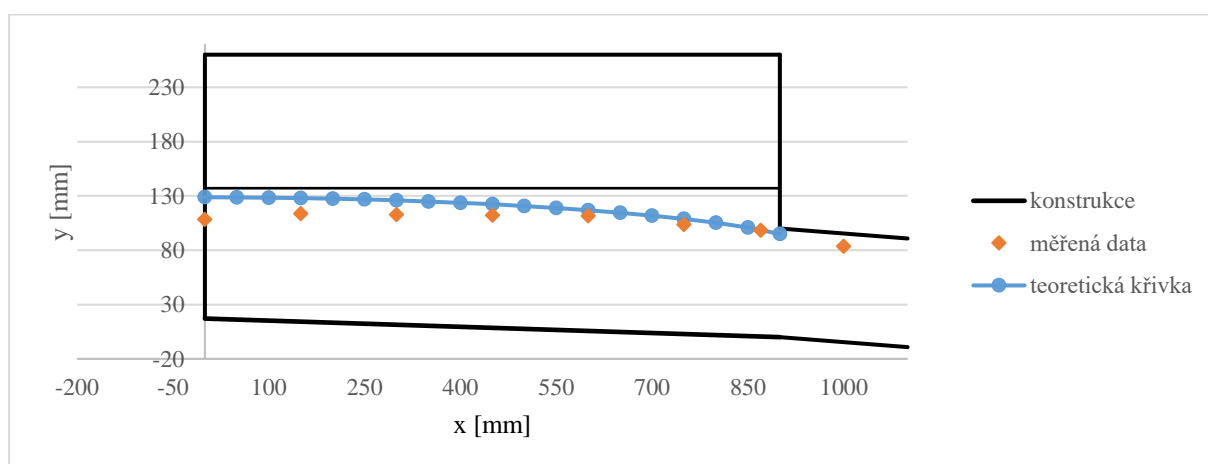
Počáteční okrajová podmínka byla určena jako dolní, postup výpočtu byl proti proudu. V odtokovém potrubí byl zjištěn bystřinný režim proudění, ve žlabu byl režim říční.

Výpočet byl proveden pro průtoky Q_3 , Q_4 a Q_5 . Hodnoty průtoky jsou sníženy oproti průtoku ve Spadišti 2 o 0,25 l/s z důvodu rozdělení průtoky v Rozdělovací komoře. Maximální návrhový dešťový odtok do recipientu činí 7,92 l/s.

Obr. 48 – Podélný profil hladiny, $Q_3=2,47$ l/s

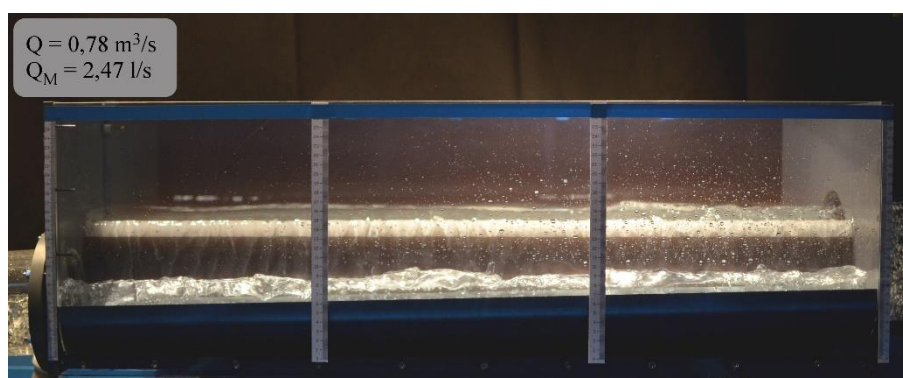


Obr. 49 – Podélný profil hladiny, $Q_4=4,05$ l/s

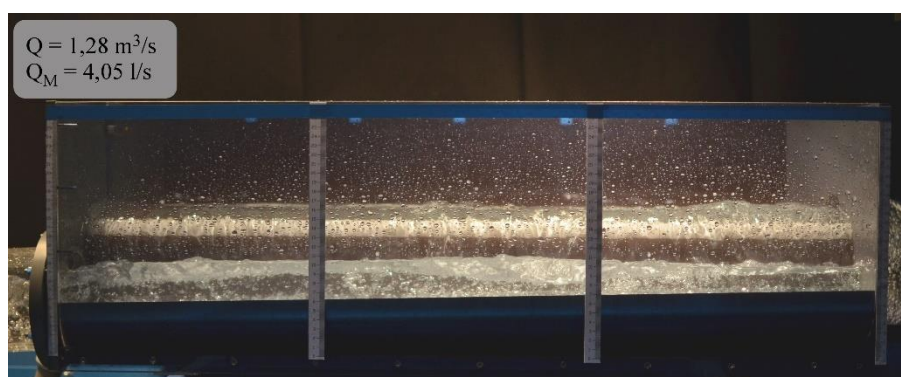
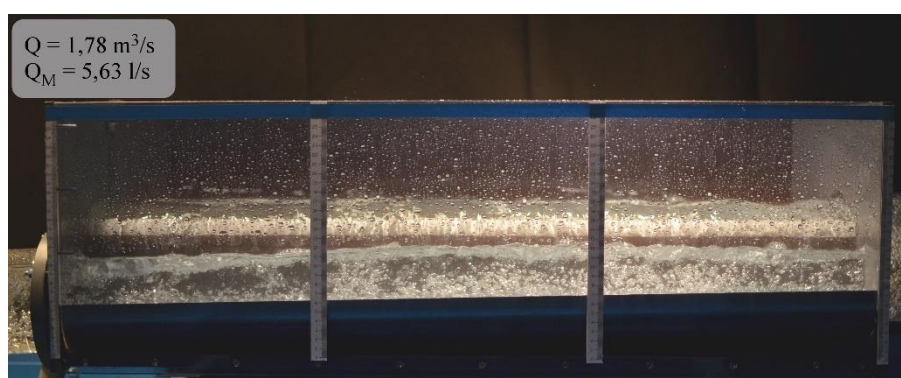


Obr. 50 – Podélný profil hladiny, $Q_5=5,64$ l/s

Reálný průběh podélného profilu ve stoce při počítaných průtocích je vidět na následujících obrázcích.



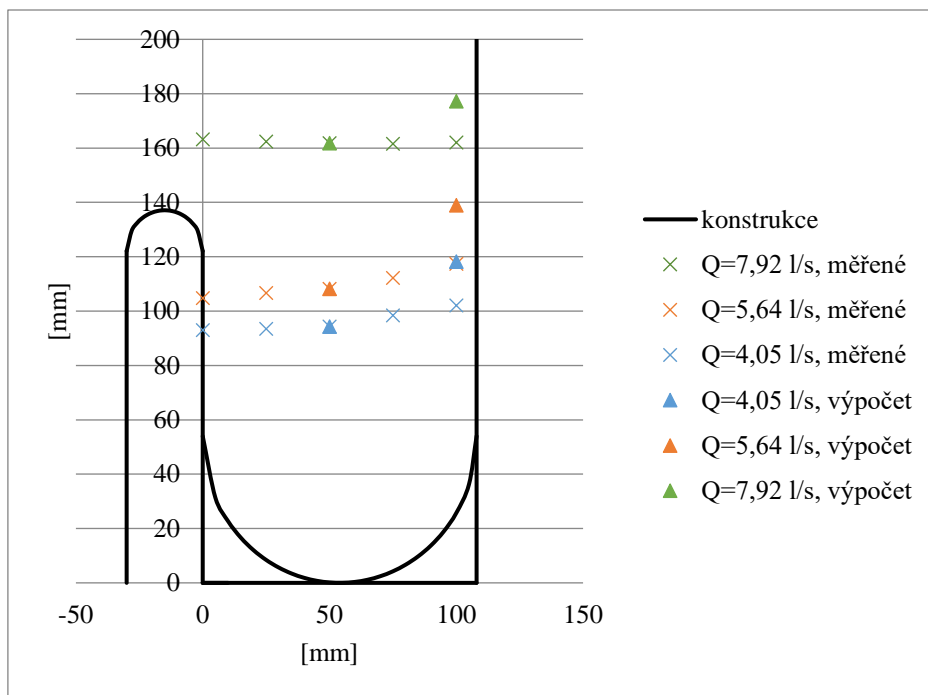
Obr. 51 - Podélný profil hladiny, $Q_3=2,47$ l/s, model

Obr. 52 – Podélný profil hladiny, $Q_4=4,05$ l/s, modelObr. 53 – Podélný profil hladiny, $Q_5=5,64$ l/s, model

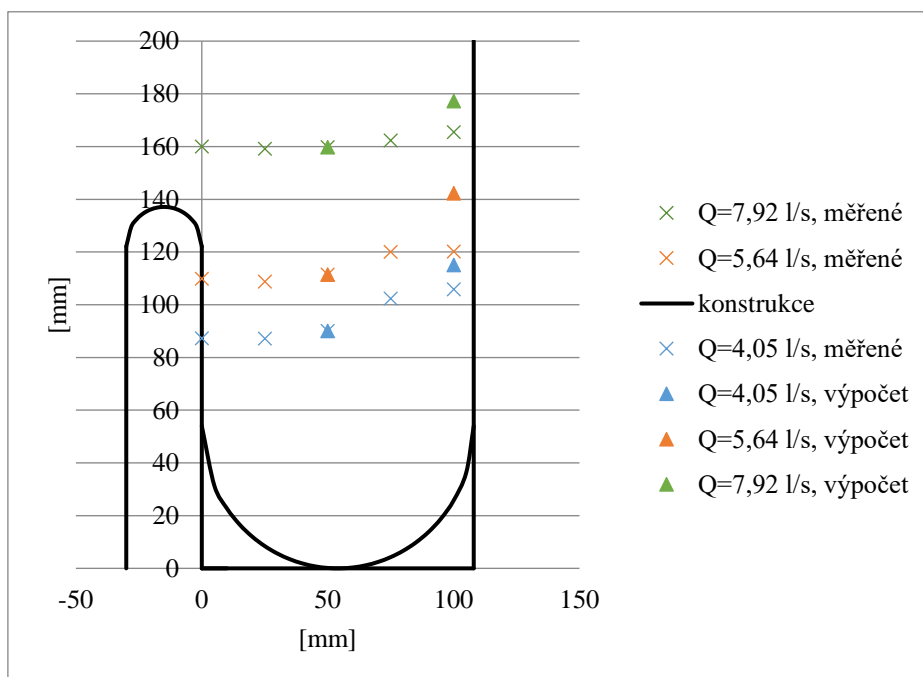
Příčný profil hladiny ve sběrném žlabu

Podobný výpočet je řešen v Kap. 4.5. Výsledky jsou uvedeny pro přepočten na oba typy koryta, lichoběžníkové i obdélníkové. Výpočet je proveden pro dva zvolené profily 44 a 48 (viz Obr. 14). Měření bylo provedeno pro tři návrhové průtoky Q_4 , Q_5 a Q_{\max} .

Při použití výrazu pro lichoběžníkový profil se měřená data a vypočítaná hodnota t_s neshodují. Hloubka t_s vychází větší než naměřená data.



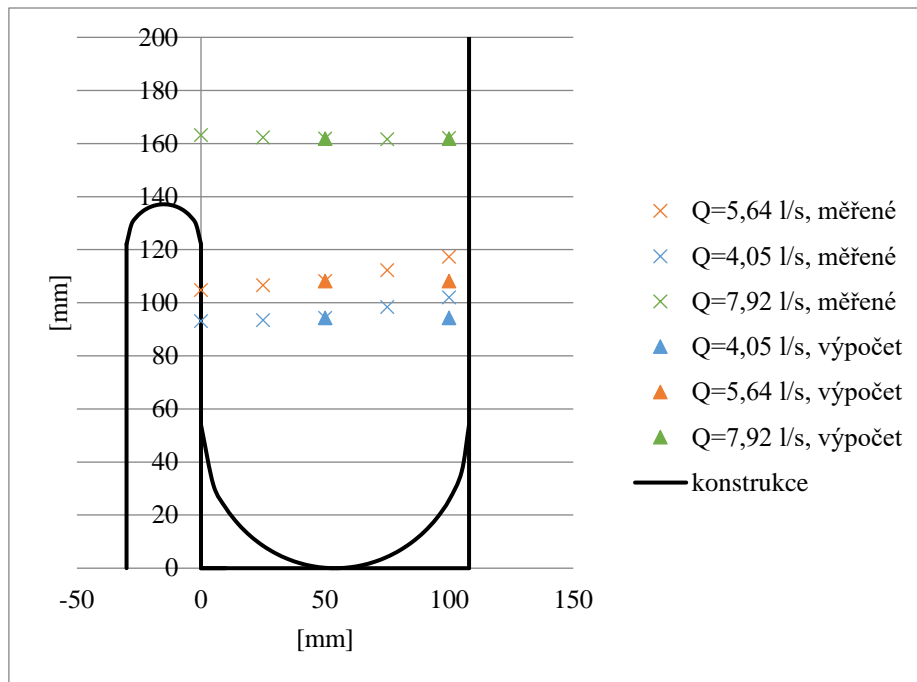
Obr. 54 – Příčný průběh hladiny, profil 44



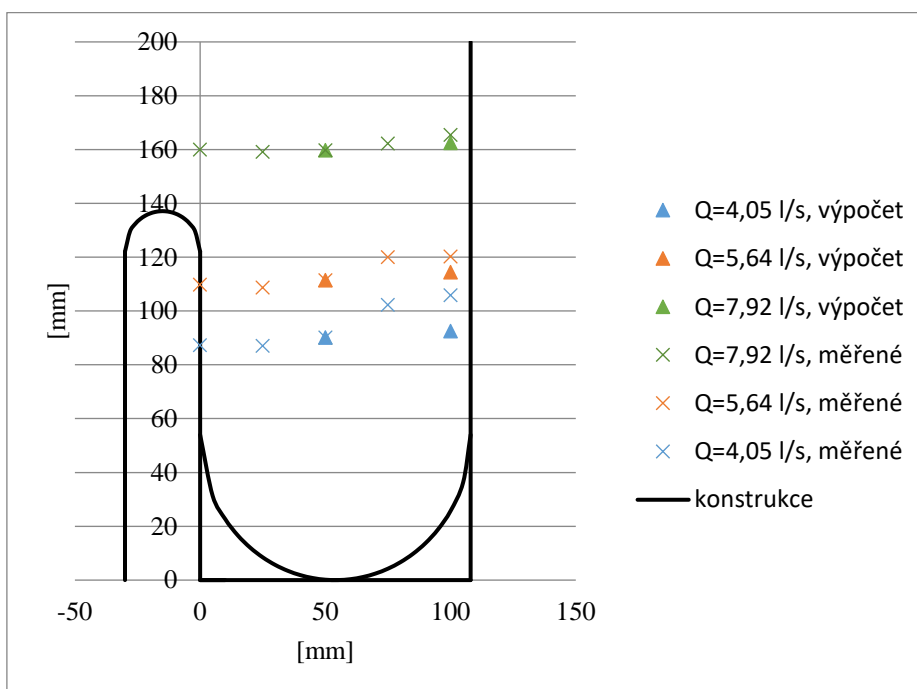
Obr. 55 - Příčný průběh hladiny, profil 48

Při použití výrazu pro obdélníkový profil vychází hloubka t_s menší než podle měřených dat, ale shoduje se s naměřenými daty lépe než výpočet pro lichoběžníkový profil.

Faktor proporcionality byl použit $\gamma = 1,5$.



Obr. 56 - Příčný průběh hladiny, profil 44



Obr. 57 - Příčný průběh hladiny, profil 48

4.7 Shrnutí výsledků

Přítokové potrubí do objektu je charakteristické velkým sklonem, tedy i velkými rychlostmi proudění. Teoretická konzumní křivka potrubí se shoduje s naměřenými hodnotami a pro největší návrhový průtok vychází rychlost na nátok do spadiště 4 m/s v modelovém měřítku.

Výsledné hodnoty modelového výzkumu jsou uvedeny v modelovém měřítku. Jejich přepočtení na měřítko prototypu lze snadno provést aplikací Froudova zákona podobnosti. Tento přepočet ovšem nelze použít pro vyjádření provzdušnění proudu v přímém úseku v hladkém přítokovém potrubí. Jak již bylo zmiňováno Chansonem [9], z hlediska provzdušnění není využití Froudova zákona podobnosti vhodné. V této práci je určena hodnota provzdušnění pro měřítko prototypu. Je to z důvodu, že modelové přítokové potrubí bylo shledáno jako hydraulicky hladké a nebylo možné na ně aplikovat tytéž postupy jako v případě potrubí prototypu. Provzdušnění proudu v přítokovém potrubí vychází pro prototyp až 35 %.

Základním problémem návrhu bylo stanovit dostatečné rozměry spadišťové šachty, aby bylo tlumení mechanické energie proudu dostatečně účinné. V tomto ohledu se návrh osvědčil. Účinnost tlumení ve spadišti s přímým nátokem dosahuje 89–95 %. Při pozorování bylo zjištěno, že se paprsek dopadající na stěnu spadiště tříští a zasahuje do stropní konstrukce. Tento stav nebyl shledán vhodným z hlediska konstrukce objektu a namáhání stropní desky a bylo předloženo šest návrhových variant. Varianty spočívaly v podobě dopadové desky. Byly přidávány prvky pro tříštění proudu a byl také zvýšen strop spadiště. Zvýšení stropu nebylo shledáno příliš účinným, větší efekt měly prvky rozmístěné na dopadové desce, které směřovaly odraz vodního paprsku.

Výpočty byla také zjišťována hydrodynamická síla, kterou působí vodní paprsek na dopadovou desku Spadiště 1. Velikost této síly vyšla 26,5 N v modelovém měřítku a 26,5 kN v měřítku prototypu, což v reálném stavu bude vyžadovat důkladné vyztužení konstrukce.

V objektu Spadiště 2 byla počítána trajektorie paprsku a ověřena na fotografiích z modelu. Pro oba zkoumané průtoky se fotografie s teoretickou křivkou velmi dobře shoduje a lze usoudit, že výpočet trajektorie lze aplikovat na všechny návrhové průtoky. Požadavkem bylo dále určit velikost rozměru, o jakou se spadišťová šachta musí zvětšit, aby padající paprsek nedopadal na konstrukci. Z výpočtu trajektorie vychází hodnota 0,092 m, o kterou se stěna spadiště musí minimálně posunout.

Počítaný podélný profil hladin v bočních sběrných kanálech se velmi blíží naměřeným hodnotám. Sběrné kanály jsou dostatečně kapacitní, aby převedly návrhový průtok.

Byla počítána teoretická křivka příčného profilu hladiny ve sběrných žlebach. Výsledky se neshodují přesně s naměřenými daty. Důvodem je pravděpodobně použití vztahů pro jiné tvary příčných průřezů. Bylo by potřeba nalézt vztah, vyjadřující profil hladin pro žlab U profilu. V dostupné literatuře se takový vztah nalézt nepodařilo.

5. Doporučení

Po provedení modelového výzkumu a odpovídajících výpočtů lze doporučit opatření, která v důsledku povedou ke zkvalitnění funkce popisovaného sdruženého objektu.

Není známo, zda se na stokovém přivaděči v Táboře nachází zavzdušnění. Nicméně by bylo velmi vhodné tento stav ověřit a případně podniknout nápravné kroky. Ideálním umístěním pro zavzdušňovací šachtu je bod zlomu, pod kterým stoka získává sklon 33 % a následně ústí do spadiště. Nedostatečný přístup vzduchu do stoky může mít za důsledek vznik tlakového režimu proudění, a především pulzace tlaku.

Varianty řešení dopadové desky ve Spadišti 1 byly rozebrány v předchozí kapitole. Za nejlepší výsledek lze doporučit variantu číslo 6. Umístění prvků nad místem dopadu paprsku tvoří jakýsi deflektor, který chrání stropní konstrukci. Zvýšení stropu spadiště, v modelových variantách o 100 mm, nemá na situaci nijak velký vliv, ale není na škodu.

Zatížení stěny Spadiště 1, vyvinuté na konstrukci hydrodynamickou silou, dosahuje hodnot až 26,5 kN (prototyp). Vzhledem k tomu, že se typově jedná o bodové zatížení, musí být vyztužení dopadové desky důkladně navrženo a provedeno, s ohledem na nadměrné namáhání v místě dopadu paprsku.

Délku Spadiště 2 je možné prodloužit o 0,092 m v měřítku modelu, 0,92 m v měřítku prototypu, a vyhnout se tak účinkům vody, dopadající na konstrukci.

Na fyzikálním modelu jsou přechody mezi stokami řešeny jako ostrohranné. V reálném řešení je vhodné nahradit je zaoblenými, které budou způsobovat menší ztráty na proudění a budou vhodněji provádět průtok.

Návrh obou uklidňovacích komor byl shledán jako vyhovující. Přelivy i sběrné žlaby jsou dostatečně kapacitní, aby zvládly převést návrhové průtoky. Odtokové potrubí z Rozdělovací komory směrem do recipientu je dostatečně kapacitní, blíží se ale ke svému limitu.

6. Závěr

Tato práce se zabývá posouzením hydraulického návrhu sruženého objektu v lokalitě Tábor. Za tímto účelem byl postaven fyzikální model v měřítku 1:10. Na tomto modelu byly změřeny výšky hladin pro 7 návrhových průtoků a provedeno pozorování. Praktická část práce obsahuje hydraulické výpočty a jejich ověření podle dat získaných z modelu. Poznatky uvedené v teoretické části práce byly použity při výpočtu výsledků a byla ověřena jejich platnost.

Výsledkem modelového výzkumu je:

- Návrh sruženého objektu lze prohlásit za vyhovující.
- Objekt Spadiště 1 je schopen dostatečně utlumit energii přitékající vody.
- Síla vodního paprsku, dopadajícího na konstrukci Spadiště 1, byla vyčíslena a bude nutno na ni při konstrukčních návrzích brát zřetel.
- Nejlepším řešením dopadové desky ve Spadišti 1 je varianta číslo 6, kde umístěné prvky tvoří nad bodem dopadu vodního paprsku jakousi clonu, která usměřňuje odražený paprsek.
- Při posunutí dopadové desky v objektu Spadiště 2 o 92 cm nebude na tuto desku přímo dopadat voda, čímž se zmenší její namáhání.
- Proudění na přelivných hranách je stabilní, průtok je konstantní a výška přepadového paprsku je optimální.
- V řešení průběhu hladin v podélných profilech sběrných žlabů došlo k velmi dobré shodě měřených a teoretických dat, výpočet v příčných profilech má své limity, nicméně je možné shodu do jisté míry pozorovat.
- Ve sběrném žlabu Rozdělovací komory se při maximálním průtoku $Q_{\max} = 7,92$ l/s vytvoří stabilní vír se vzduchovým jádrem. Nebylo zjištěno, že by tento jev negativně ovlivňoval kapacitu žlabu, a tedy by funkci Rozdělovací komory neměl omezovat.
- Kapacita odtokových potrubí ze sběrných žlabů plně vyhovuje návrhovým průtokům, nicméně se svému limitu blíží. V potrubích je proudění s volnou hladinou. Tento stav nevzniká pouze v odtokovém potrubí pod Rozdělovací komorou při průtoku $Q_{\max} = 7,92$ l/s, kdy je vtok zahlcený, ale vlivem značného sklonu potrubí posléze přechází ve volnou hladinu.

7. Literatura

- [1] BAREŠ, Vojtěch; PICEK, Tomáš; ROHANOVÁ, Bronislava; JEŽEK, Josef. *Hydraulický modelový výzkum – Spadiště S03 Odlehčovací stoka C03*. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra zdravotního a ekologického inženýrství, 2012.
- [2] ČÍŽEK, Pavel; HEREL, František; KONÍČEK, Zdeněk. *Stokování a čištění odpadních vod*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1970.
- [3] ČSN 75 6101. *Stokové sítě a kanalizační přípojky*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [4] GRAF, Walter H. *Fluvial Hydraulics: Flow and Transport Processes in Channels of Simple Geometry*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 1998. ISBN: 0-471-97714-4.
- [5] GRANATA, Francesco; DE MARINIS, Giovanni; GARGANO, Rudy; HAGER, Willi H. *Hydraulics of Circular Drop Manholes*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 137(2), 2010.
- [6] HAGER, Willi H. *Abflusseigenschaften in offenen Kanälen*. Schweizer Ingenieur und Architekt, vol. 103, 1985. ISBN 978-3-642-11382-6.
- [7] HAGER, Willi H. *Wastewater Hydraulics: Theory nad Practice*. 2. vydání. Berlín: Springer, 2010. ISBN 978-3-642-11382-6.
- [8] CHANSON, Hubert. *An experimental study of Roman dropshaft hydraulics*. Journal of Hydraulic Research, vol. 39, 2001.
- [9] CHANSON, Hubert. *Hydraulics of Rectangular Dropshafts*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, vol. 130, 2004.
- [10] CHANSON, Hubert. *Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways*. Journal of Hydraulic Research, vol. 32, 1994.
- [11] CHRISTODOULOU, George C. *Drop Manholes in Supercritical Pipelines*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, vol. 117, 1991.
- [12] KOLÁŘ, Václav; PATOČKA, Cyril; BÉM, Jiří. *Hydraulika*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1983.
- [13] KREJČÍ, Vladimír. *Odvodnění urbanizovaných území – Koncepční přístup*. Brno: NOEL, 2000. ISBN 80-86020-39-8.
- [14] LUCAS, Jill; LUTZ, Nicola; LAIS, Adriano; HAGER, Willi H.; BOES, Robert M. *Side-Channel Flow: Physical Model Studies*. Journal of Hydraulic Engineering, 2015.

-
- [15] PFISTER, Michael; HAGER, Willi H. *Chute Aerators. I: Air Transport Characteristics*. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 136, 2010.
- [16] RAJARATNAM, N.; MAINALI, A.; HSUNG, C. Y. *Observations on Flow in Vertical Dropshafts in Urban Drainage Systems*. *Journal of Environmental Engineering*, vol. 123, 1997.
- [17] TNV 75 6262. *Odlehčovací komory a separátory*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003.
- [18] WILHELMS, Steven C; GULLIVER, John S. *Self-Aerated Flow on Corps of Engineers Spillways*. Technical Report (U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station), 1994.
- [19] WILLIAMSON, Scott. *Drop structure design for wastewater and stormwater collection systems*. New York: Parsons Brinckerhoff, 2001.
- [20] YANG, Jianming. *Vorticity theorems, Kinematic decomposition of flow field* [online]. [vid. 2017-01-01]. Dostupné z:
http://user.engineering.uiowa.edu/~me_160/lecture_notes/lec17_2012.pdf

8. Seznam obrázků

Obr. 1 – Vzorový řez spadištěm/popis spadiště; 1 - přítokové potrubí, 2 - vstup do šachty, 3 - bezdeštný obtok, 4 - dělicí stěna, 5 - spadišťová šachta, 6 - dno šachty/vodní polštář, 7 - deflektor, 8 - odtokové potrubí [7].....	11
Obr. 2 – Návrhové průtoky; Q_k – bezdeštný, Q_R – dešťový [7].....	12
Obr. 3 – Typy vírových nátoků [19].....	14
Obr. 4 – Schéma bočního přelivu s vysokou přelivnou hranou [17].....	17
Obr. 5 – Vztah Froudova a Boussinesqova čísla [6].....	19
Obr. 6 – Nomogram χ [6].....	20
Obr. 7 – Souřadný systém.....	20
Obr. 8 – Režimy dopadu.....	21
Obr. 9 – Účinnost spadiště, schéma.....	23
Obr. 10 – Účinnost tlumení energie v závislosti na režimu dopadu paprsku pro různé výšky spadiště, ■ je nejmenší výška, ○ je největší [5].....	24
Obr. 11 – Lichoběžníkový a obdélníkový průřez; a), c) – vznik dvou vírů; b), d) – vznik jednoho víru.....	25
Obr. 12 – Schéma víru se vzduchovým jádrem.....	26
Obr. 13 – Schéma navrhovaného sdruženého objektu.....	27
Obr. 14 – Schéma měřících bodů.....	30
Obr. 15 - Konzumční křivka přítokového potrubí, měřítko prototypu.....	32
Obr. 16 – Konzumční křivka provzdušněného a neprovzdušněného proudu, prototyp.....	36
Obr. 17 – Trajektorie paprsku pro $Q_1=0,44$ l/s a $Q_6=7,31$ l/s.....	37
Obr. 18 – Schéma dopadu paprsku na kolmou stěnu.....	38
Obr. 19 – Účinnost tlumení energie, model.....	40
Obr. 20 – Tlumení energie, průtok Q_5	40
Obr. 21 – Tlumení energie, průtok Q_6	40
Obr. 22 – Varianty dopadové desky 1-6.....	42
Obr. 23 – Spadiště 1, varianta 1, $Q_2 = 1,58$ l/s.....	43
Obr. 24 – Spadiště 1, varianta 2, $Q_2 = 1,58$ l/s.....	43
Obr. 25 – Spadiště 1, varianta 3, $Q_2 = 1,58$ l/s.....	43
Obr. 26 – Spadiště 1, varianta 4, $Q_2 = 1,58$ l/s.....	43
Obr. 27 – Spadiště 1, varianta 5, $Q_2 = 1,58$ l/s.....	43
Obr. 28 – Spadiště 1, varianta 6, $Q_2 = 1,58$ l/s.....	43
Obr. 29 – Trajektorie paprsku pro Q_2 až Q_6 , Spadiště 2.....	44
Obr. 30 – Trajektorie paprsku, $Q=1,58$ l/s.....	45
Obr. 31 – Trajektorie paprsku, $Q=7,31$ l/s.....	45
Obr. 32 – Trajektorie maximálního a minimálního návrhového průtoku, upravené rozměry spadiště.....	47
Obr. 33 - Průběh hladin na přelivné hraně, Uklidňovací nádrž, data z měření.....	48
Obr. 34 - Průběh hladin ve sběrném žlabu, Uklidňovací nádrž, data z měření.....	48
Obr. 35 – Podélný profil hladiny, $Q_3=2,72$ l/s.....	49
Obr. 36 – Podélný profil hladiny, $Q_4=4,30$ l/s.....	50
Obr. 37 – Podélný profil hladiny, $Q_5=5,88$ l/s.....	50
Obr. 38 – Podélný profil hladiny, $Q_3=2,72$ l/s, model.....	50
Obr. 39 – Podélný profil hladiny, $Q_4=4,30$ l/s, model.....	51
Obr. 40 – Podélný profil hladiny, $Q_5=5,88$ l/s, model.....	51
Obr. 41 - Příčný průběh hladiny, profil 39.....	52
Obr. 42 - Příčný průběh hladiny, profil 42.....	52
Obr. 43 - Příčný průběh hladiny, profil 39.....	53
Obr. 44 - Příčný průběh hladiny, profil 42.....	53
Obr. 45 – Průběh hladin na přelivné hraně, Rozdělovací komora, data z měření.....	54

Obr. 46 – Průběh hladin ve sběrném žlabu, Rozdělovací komora, data z měření	54
Obr. 47 – Vír se vzduchovým jádrem, modelový průtok Q_{max}	55
Obr. 48 – Podélný profil hladiny, $Q_3=2,47$ l/s	55
Obr. 49 – Podélný profil hladiny, $Q_4=4,05$ l/s	56
Obr. 50 – Podélný profil hladiny, $Q_5=5,64$ l/s	56
Obr. 51 - Podélný profil hladiny, $Q_3=2,47$ l/s, model	56
Obr. 52 – Podélný profil hladiny, $Q_4=4,05$ l/s, model	57
Obr. 53 – Podélný profil hladiny, $Q_5=5,64$ l/s, model	57
Obr. 54 – Příčný průběh hladiny, profil 44	58
Obr. 55 - Příčný průběh hladiny, profil 48	58
Obr. 56 - Příčný průběh hladiny, profil 44	59
Obr. 57 - Příčný průběh hladiny, profil 48	59
Obr. 58 - Spadiště 1, varianta dopadové desky 1-6, $Q_1=0,44$ l/s	71
Obr. 59 – Spadiště 1, varianta dopadové desky 1-6, $Q_2=1,58$ l/s	72
Obr. 60 - Spadiště 1, varianta dopadové desky 1-6, $Q_3=3,16$ l/s	73
Obr. 61 - Spadiště 1, varianta dopadové desky 1-6, $Q_4=4,74$ l/s	74
Obr. 62 - Spadiště 1, varianta dopadové desky 1-6, $Q_5=6,32$ l/s	75
Obr. 63 - Spadiště 1, varianta dopadové desky 1-6, $Q_6=7,30$ l/s	76
Obr. 64 – Přeliv 1, Q_2 až Q_6	77
Obr. 65 – Spojovací stoka, Q_2 až Q_6	78
Obr. 66 – Spadiště 2, Q_2 až Q_{max}	79
Obr. 67 – Přeliv 2, Q_2 až Q_{max}	81

9. Seznam tabulek

Tab. 1 – Měřítko modelových veličin	28
Tab. 2 – Přehled návrhových průtoků	29
Tab. 3 – Konzumční křivka modelu a prototypu.....	31
Tab. 4 – Režim proudění	35
Tab. 5 – Pro vzdušnění proudu, prototyp	36
Tab. 6 – Dopadový součinitel.....	38
Tab. 7 – Zatížení stěny spadiště, měřítko modelu a prototypu.....	39
Tab. 8 – Účinnost, model	39
Tab. 9 – Souřadnice dopadu paprsku	41
Tab. 10 – Souřadnice x dopadu paprsku pro hodnotu $y = 0,092$ m.....	46
Tab. 11 – Režim proudění, spojovací potrubí	47

10. Seznam symbolů

b	[m]	šířka žlabu
B	[-]	Boussinesqovo číslo
γ	[-]	součinitel proporcionality
C	[-]	koncentrace provzdušnění
δ	[°]	úhel náklonu stoky
Δ	[m]	drsnost potrubí
D	[m]	průměr stoky
D_{in}	[m]	průměr přítokové stoky
D_m	[m]	průměr spadiště
D_{out}	[m]	průměr odtokové stoky
ε	[°]	středový úhel plnění potrubí
φ	[°]	úhel dopadu na stěnu
ϕ	[°]	vtokový úhel
F	[N]	síla
Fr	[-]	Froudovo číslo
g	[m/s ²]	tíhové zrychlení
η	[-]	účinnost
h	[m]	hloubka
h_0	[m]	hloubka v přítokovém potrubí
H_0	[m]	energetická výška v přítokovém potrubí
h_c	[m]	kritická hloubka
h_d	[m]	hloubka v odtokovém potrubí
H_d	[m]	energetická výška v odtokovém potrubí
h_m	[m]	hloubka provzdušněného proudu
h_N	[m]	hloubka rovnoměrného proudění
i	[-]	sklon
I	[-]	dopadový součinitel
i_0	[-]	sklon dna
i_E	[-]	sklon čáry energie
k_s	[m]	drsnost potrubí
K	[m ^{1/3} /s]	drsnostní součinitel podle Stricklera
m	[-]	součinitel přepadu
M	[-]	měřítka
ν	[m ² /s]	kinematická viskozita
n	[s/m ^{1/3}]	drsnostní součinitel

O	[m]	omočený obvod
q	[m ² /s]	měrný průtok
Q	[m ³ /s]	průtok
Q'	[m ² /s]	měrný průtok na přelivu
Q*	[-]	bezrozměrný průtokový součinitel spadiště
Q ₁₋₆	[m ³ /s]	návrhové průtoky
Q _a	[m ³ /s]	splaškový průtok
Q _k	[m ³ /s]	bezdeštný průtok
Q _M	[m ³ /s]	modelový průtok
Q _{max}	[m ³ /s]	maximální návrhový průtok
q _N	[m ² /s]	měrný průtok při rovnoměrném proudění
Q _P	[m ³ /s]	průtok na prototypu
Q _R	[m ³ /s]	dešťový průtok
ρ	[kg/m ³]	měrná hmotnost
R	[m]	hydraulický poloměr
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
s	[m]	výška spadišťového stupně
S	[m ²]	plocha
t	[s]	čas
t _s	[m]	maximální hloubka v korytě
u*	[m/s]	třecí rychlost
U	[m/s]	rychlost přepadajícího paprsku
U _s	[m/s]	průřezová rychlost
v	[m/s]	rychlost
V	[m/s]	průřezová rychlost v korytě
v ₀	[m/s]	přítoková rychlost
v _d	[m/s]	rychlost na odtoku
χ	[-]	parametr koncentrace provzdušnění
x	[m]	vodorovná souřadnice bodu
y	[-]	svislá souřadnice bodu
y ₀	[-]	poměr plnění přítokového potrubí
y _N	[-]	plnění stoky při rovnoměrném proudění
z _s	[m]	rozdíl hladin

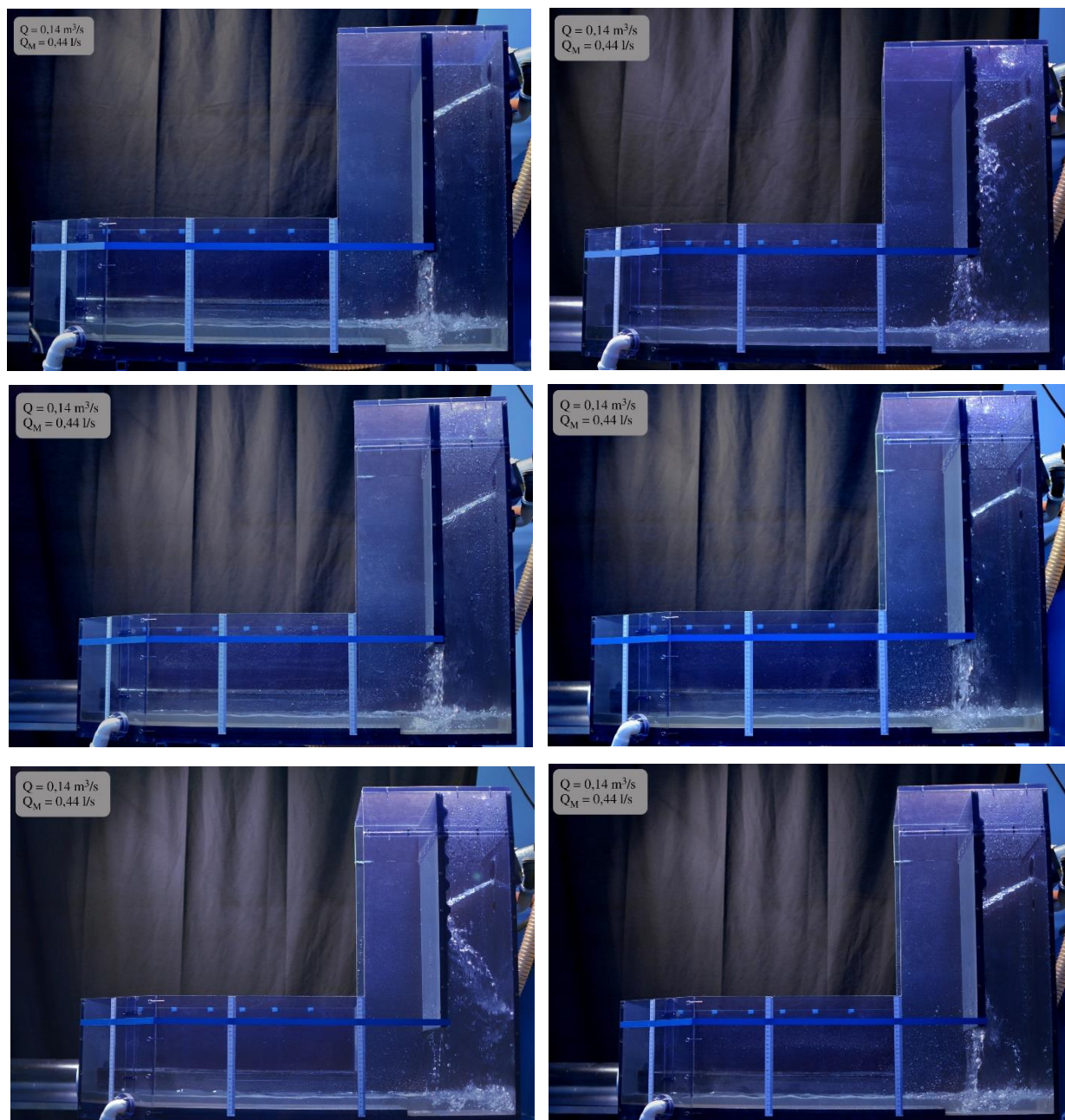
Indexy

Fr	Froudovo číslo
g	tíhové zrychlení
L	délka
M	model
P	prototyp
v	rychlost

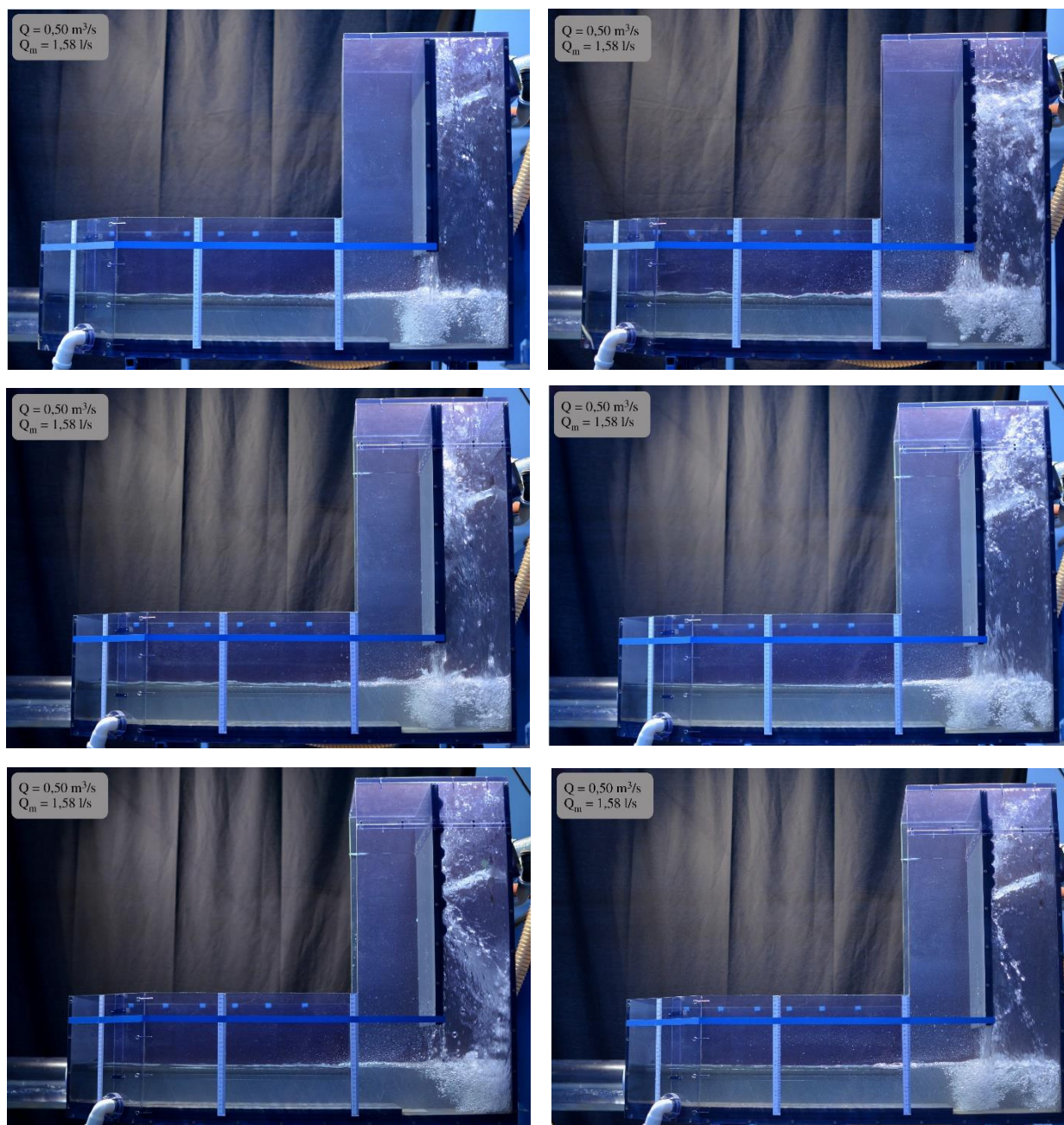
Příloha

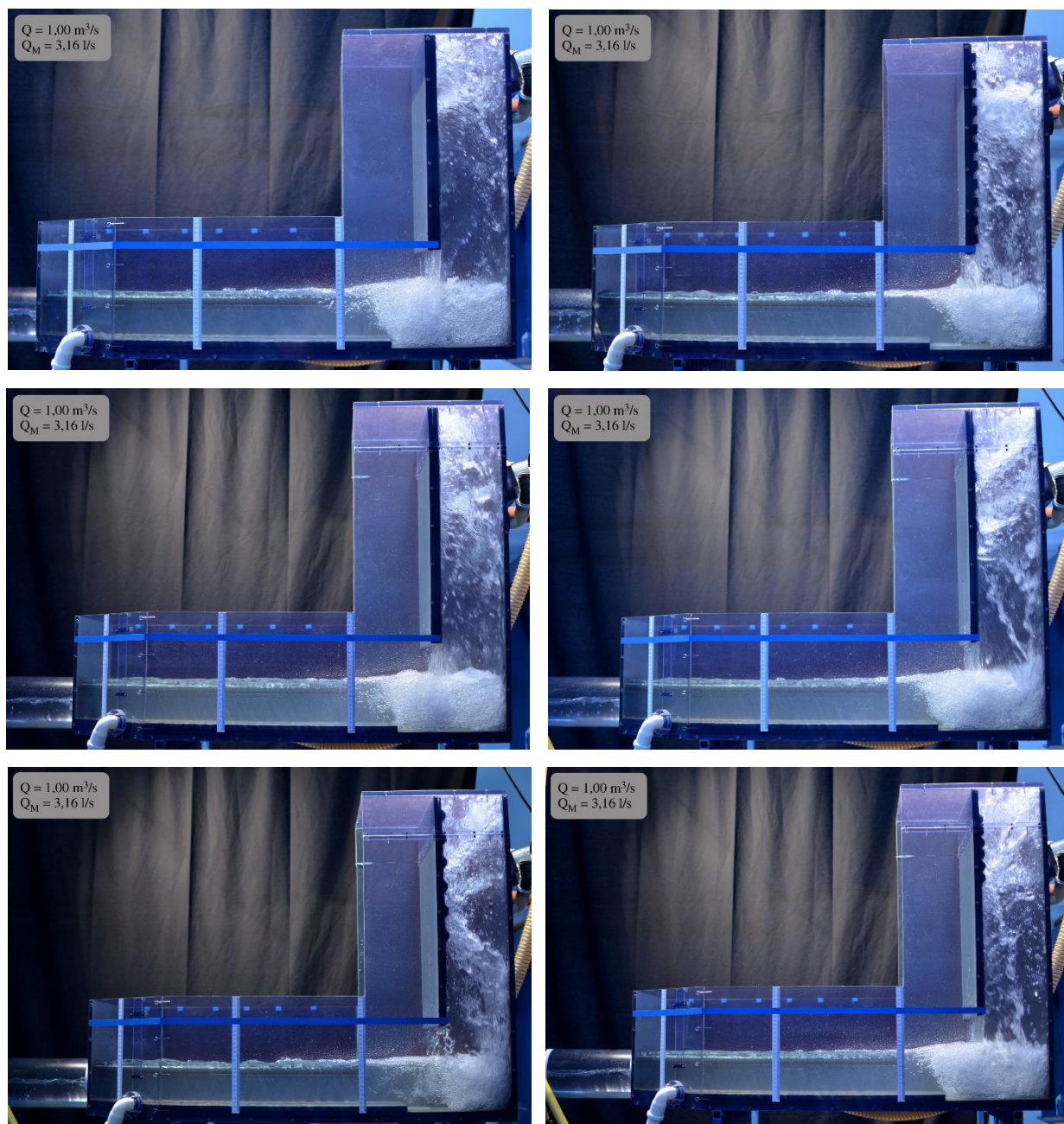
V příloze je uvedena fotodokumentace z modelového výzkumu všech objektů a návrhových průtoků.

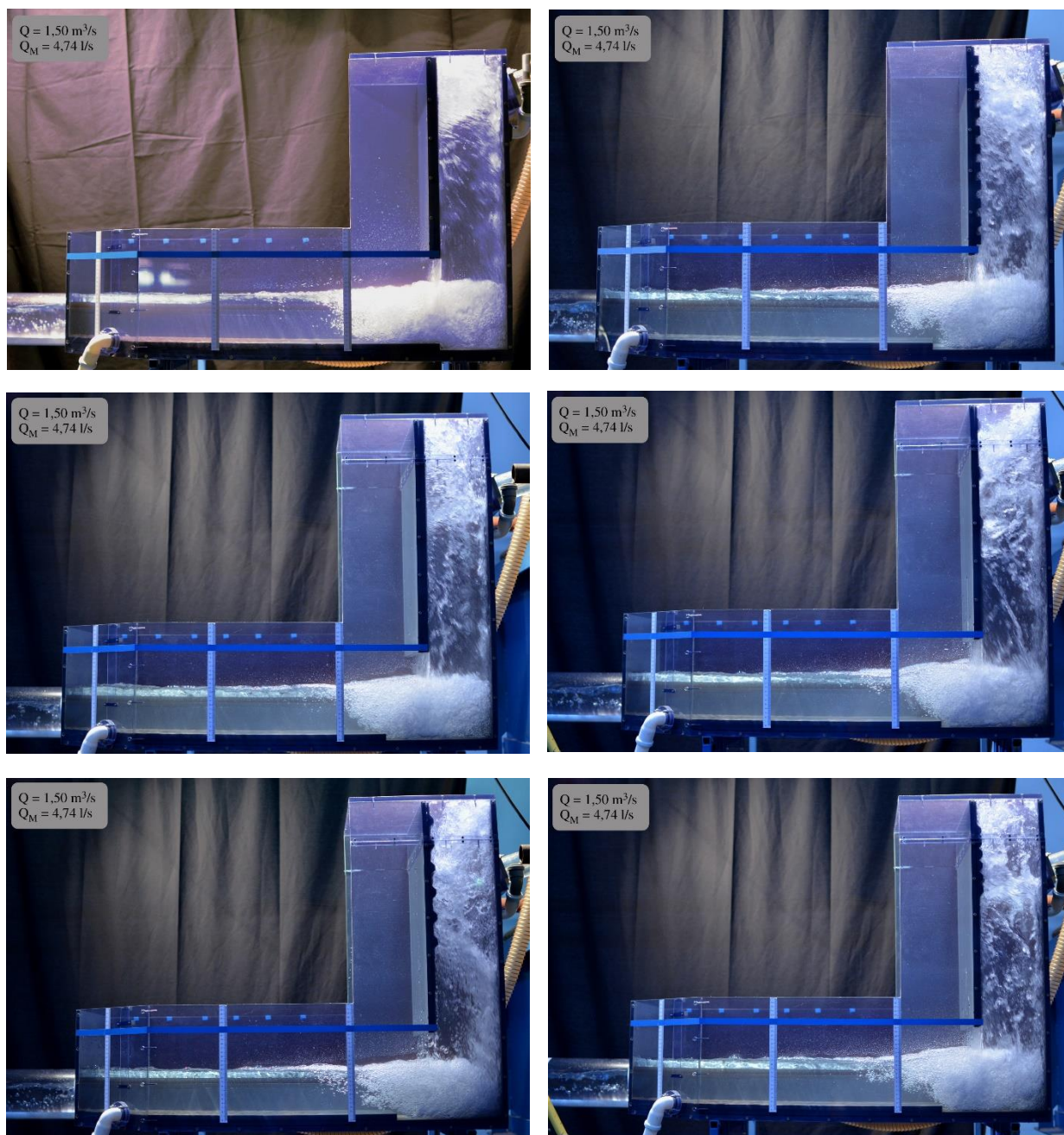
Řazení fotografií je zleva doprava, shora dolů.

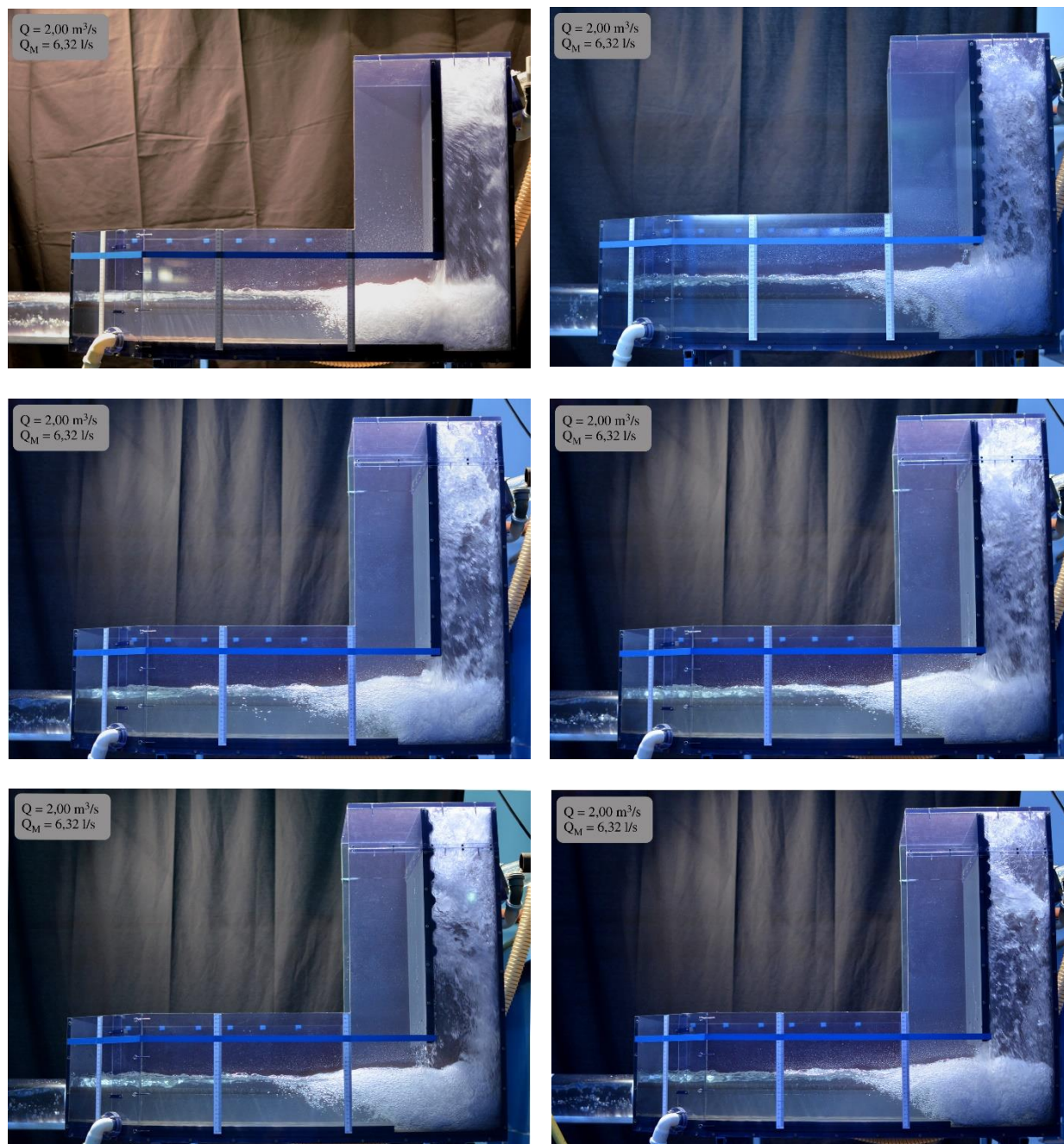


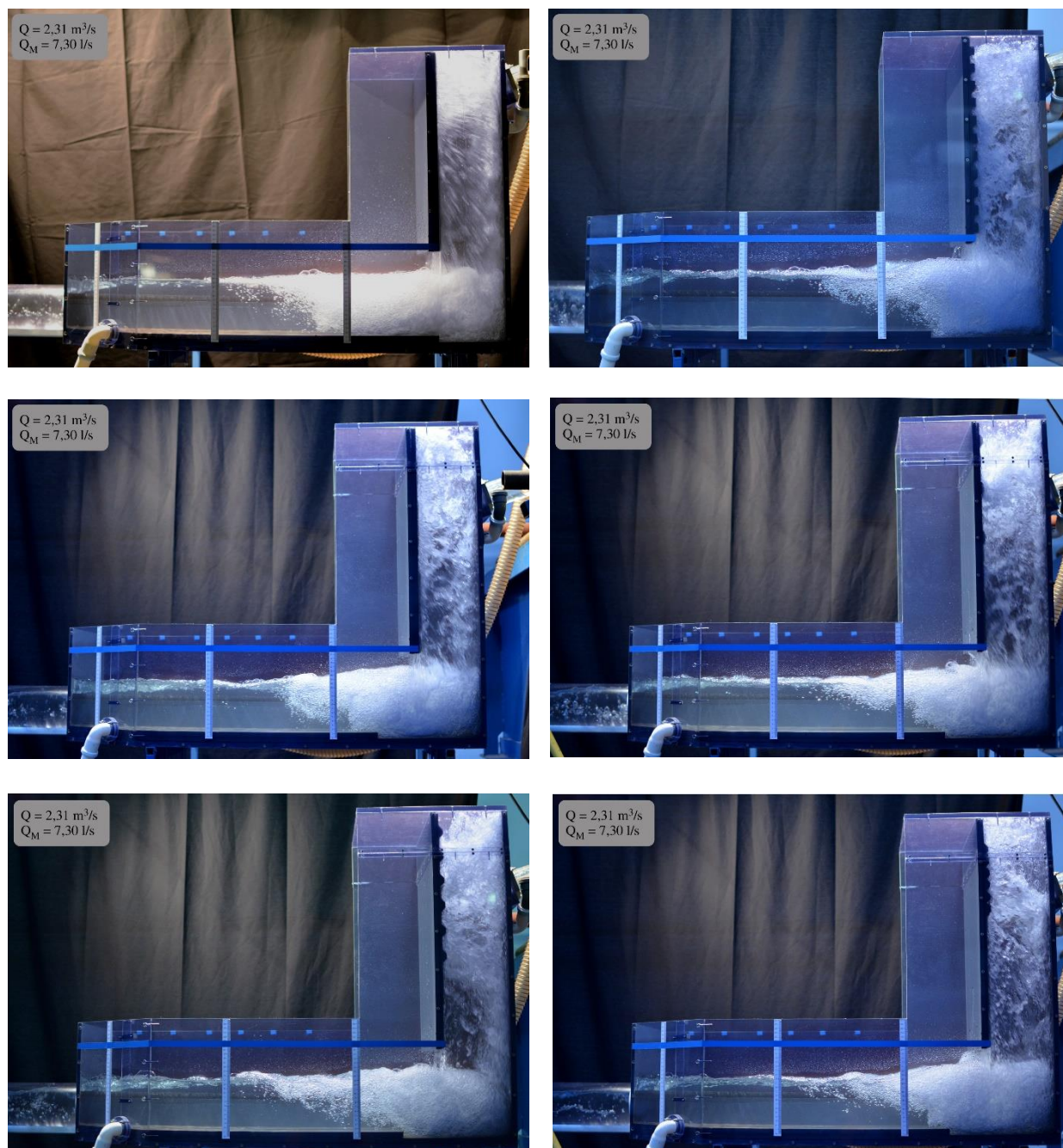
Obr. 58 - Spadiště 1, varianta dopadové desky 1-6, $Q_I=0,44 \text{ l/s}$

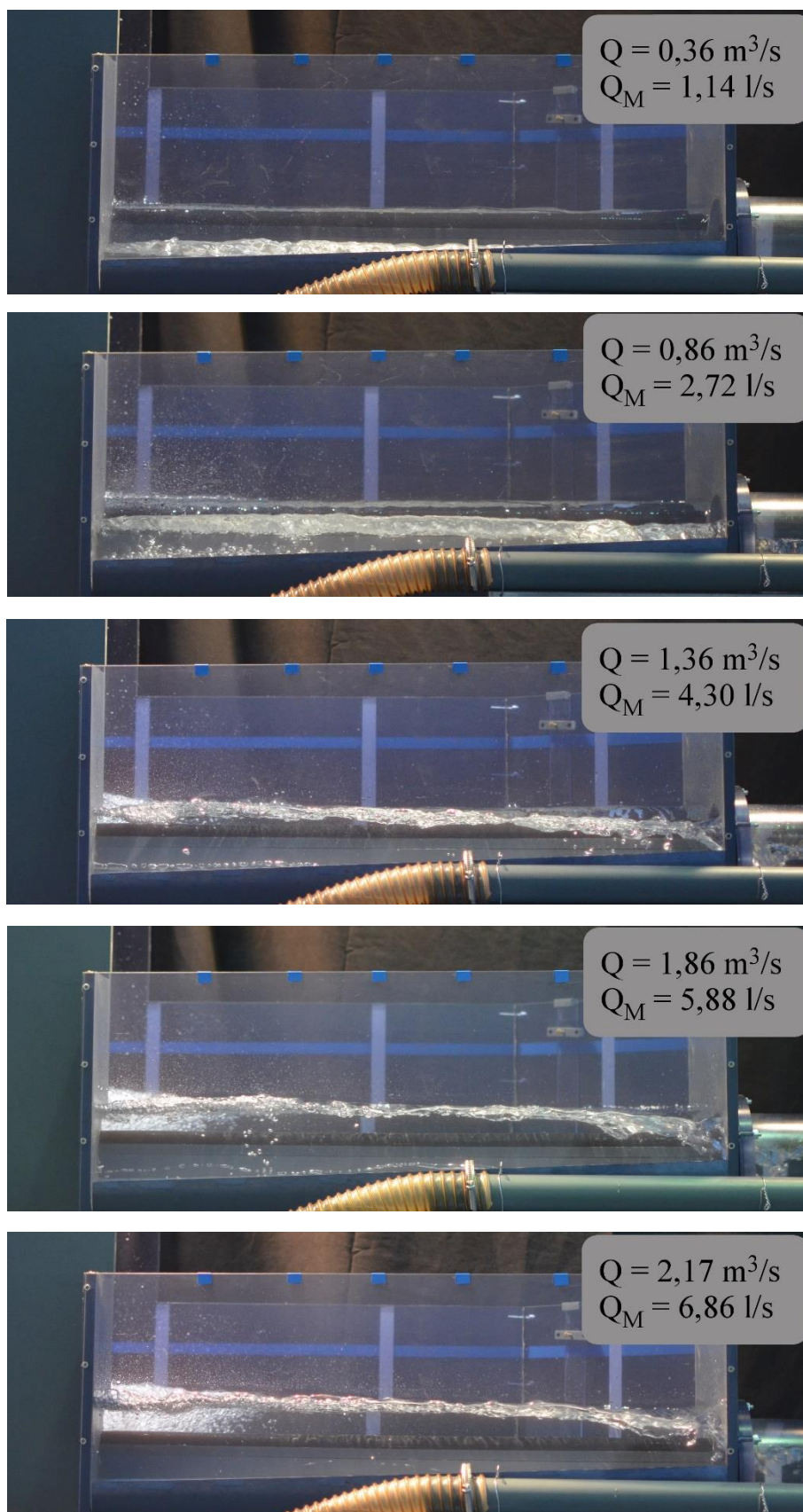
Obr. 59 – Spadiště 1, varianta dopadové desky 1-6, $Q_2=1,58 \text{ l/s}$

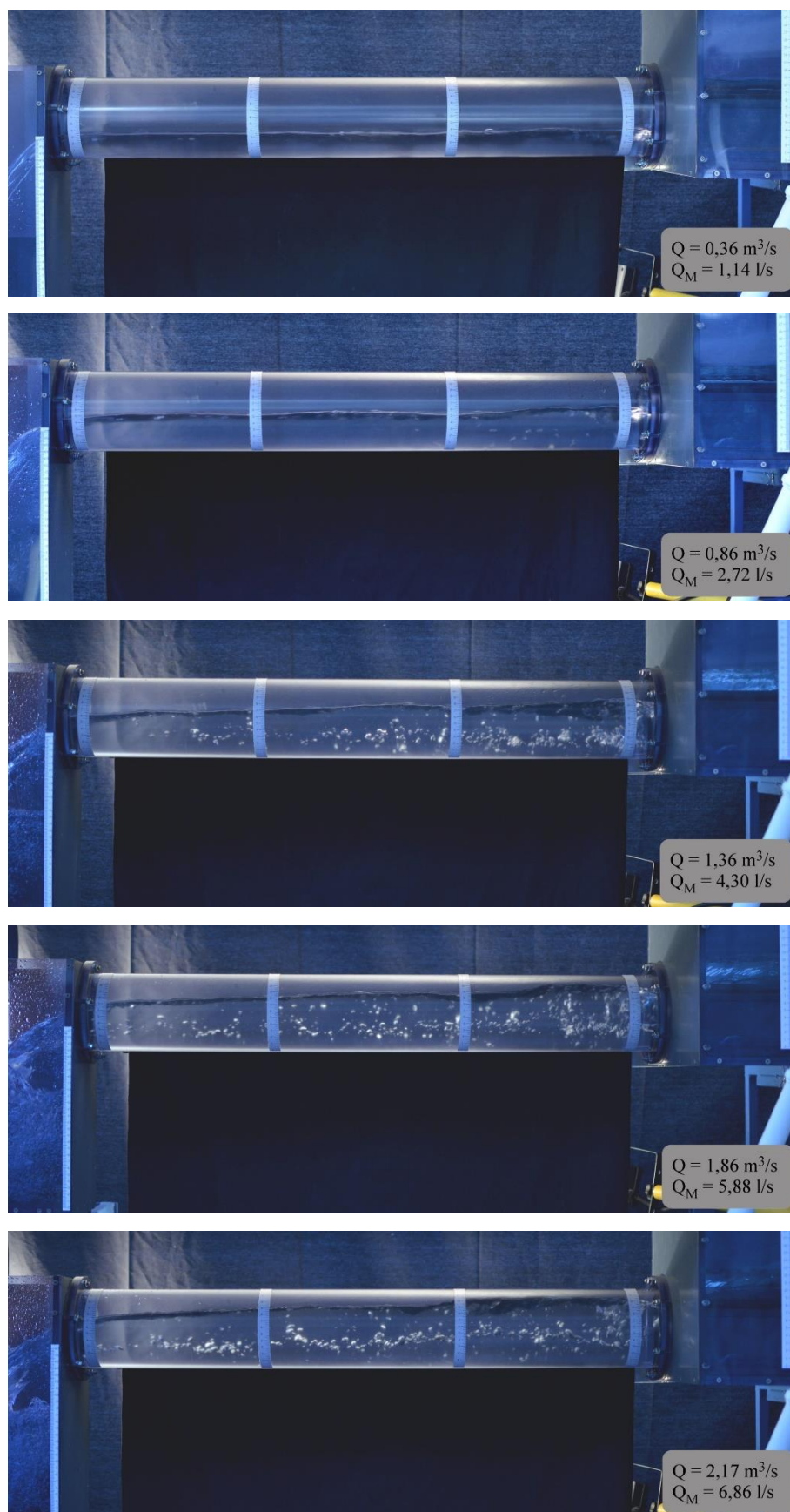
Obr. 60 - Spadiště 1, varianta dopadové desky 1-6, $Q_3=3,16 \text{ l/s}$

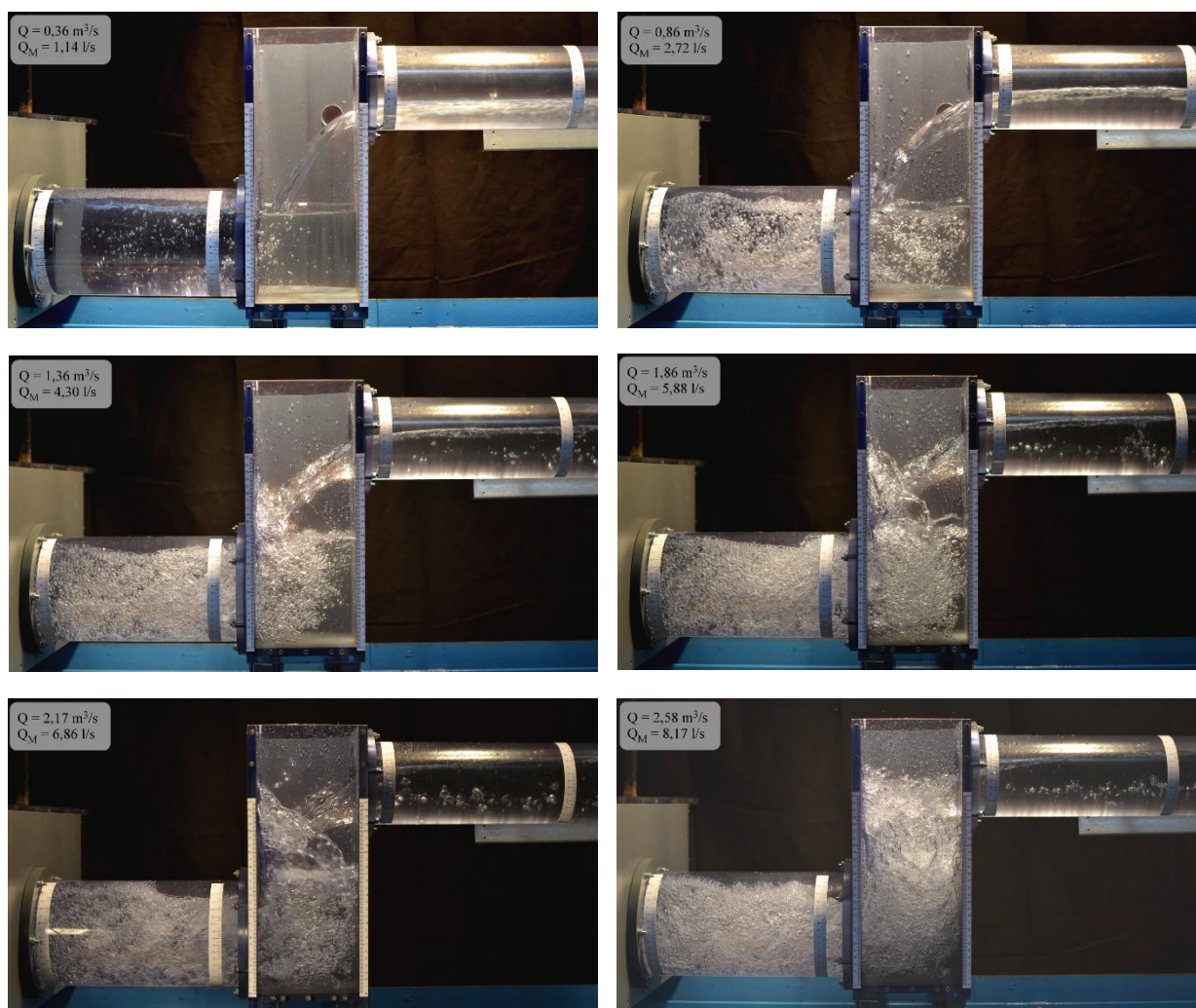
Obr. 61 - Spadiště 1, varianta dopadové desky 1-6, $Q_4=4,74 \text{ l/s}$

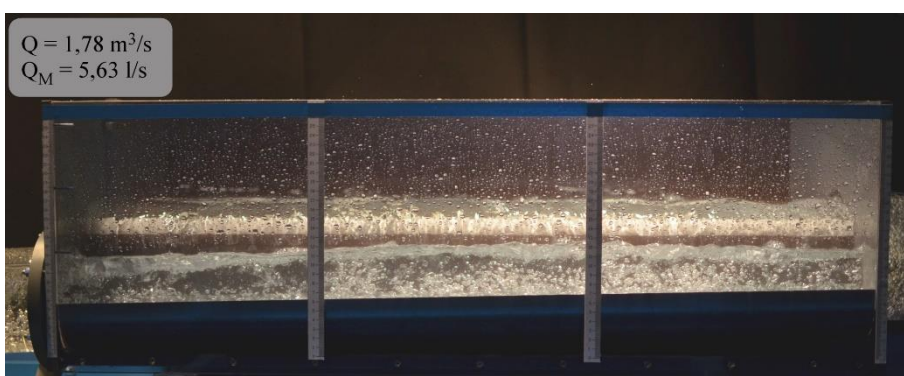
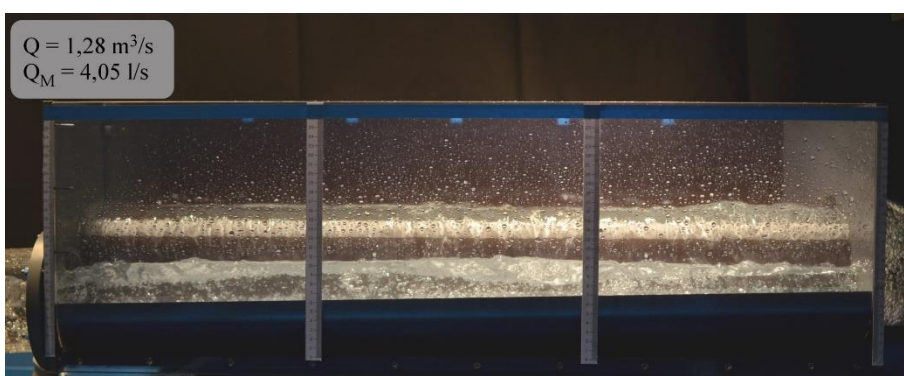
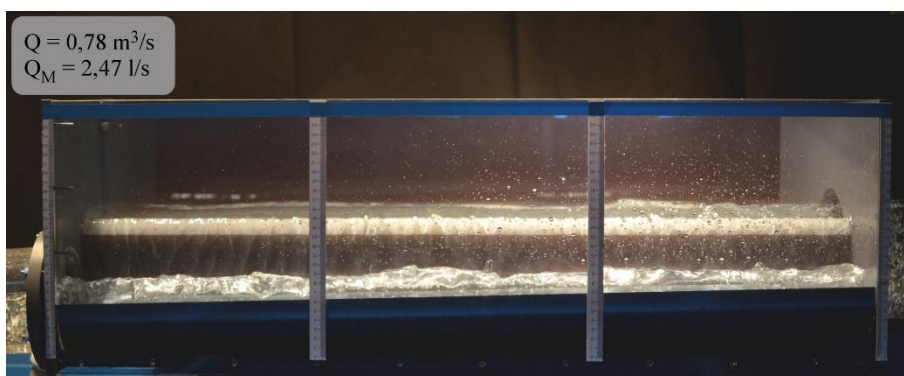
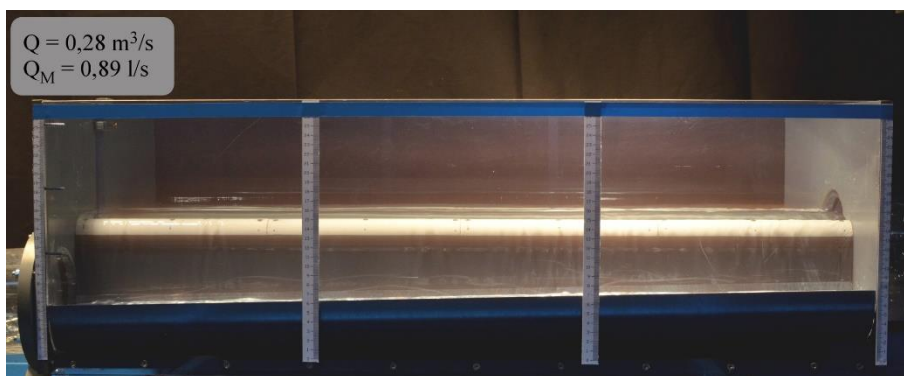
Obr. 62 - Spadiště 1, varianta dopadové desky 1-6, $Q_5=6,32 \text{ l/s}$

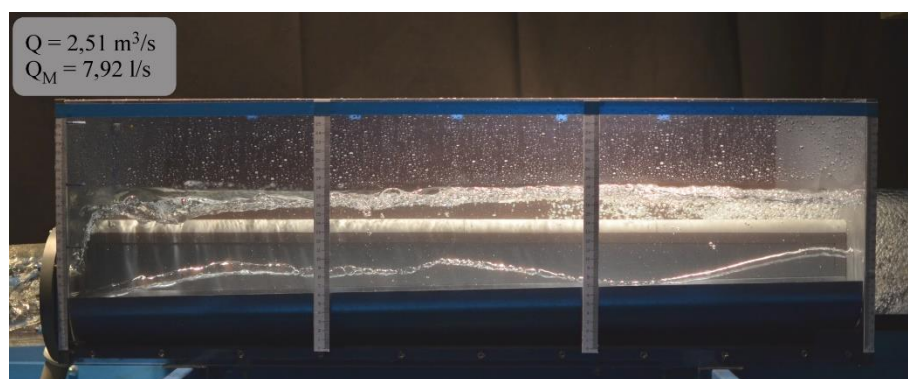
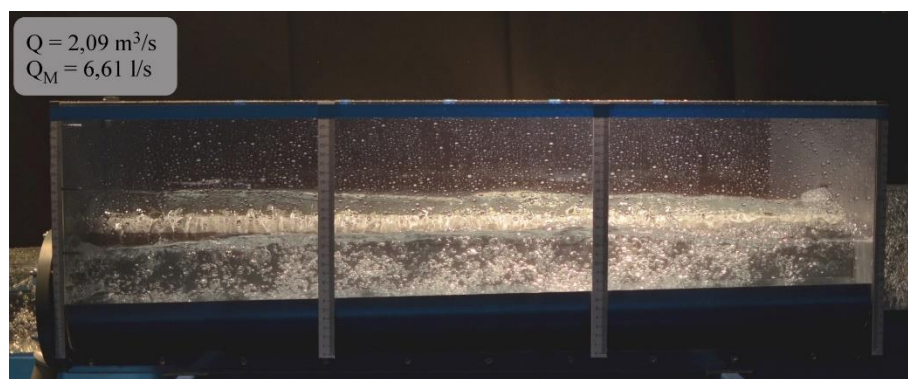
Obr. 63 - Spadiště 1, varianta dopadové desky 1-6, $Q_6=7,30 \text{ l/s}$

Obr. 64 – Přeliv 1, Q_2 až Q_6

Obr. 65 – Spojovací stoka, Q_2 až Q_6

Obr. 66 – Spadiště 2, Q_2 až Q_{\max}





Obr. 67 – Přeliv 2, Q_2 až Q_{\max}