

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedry hydrauliky a hydrologie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Hydraulické posouzení segmentového uzávěru spodní  
výpusti vodního díla Vranov

Vedoucí bakalářské práce

Ing. Tomáš Pícek, Ph.D.

Veronika Táboříková

Květen 2020



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Táboříková Jméno: Veronika Osobní číslo: 468317  
Zadávající katedra: Katedra hydrauliky a hydrologie (K141)  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Hydraulické posouzení segmentového uzávěru spodní výpusti vodního díla Vranov

Název bakalářské práce anglicky: Hydraulic Assesment of Bottom Outlet Segment Gate of Vranov Dam

Pokyny pro vypracování:

Na základě experimentů realizovaných na fyzikálním modelu spodní výpusti Vodního díla Vranov v průběhu roku 2019 ve Výzkumném ústavu vodohodpodářském, v. v. i. proveďte hydraulické posouzení nově navrhovaného koncového segmentového uzávěru spodní výpusti tohoto vodního díla. Zaměřte se především na stanovení výtokového součinitele tohoto uzávěru při různých úrovních hladin včetně posouzení citlivosti vstupních údajů na hodnoty tohoto součinitele.

Seznam doporučené literatury:

KOLÁŘ, V., PATOČKA, C., BÉM, J. (1983). „Hydraulika“, Státní nakladatelství technické literatury, Praha.  
HAVLÍK, V., MAREŠOVÁ, I. (1988). „Hydraulika (příklady)“, ediční středisko ČVUT, Praha.

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Tomáš Pícek, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 18. 2. 2020

Termín odevzdání bakalářské práce: 17. 5. 2020

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

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

18.2.2020

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)





### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Hydraulické posouzení segmentového uzávěru spodní výpusti vodního díla Vranov“ vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité podklady.

.....

Místo, datum

.....

podpis



### **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Pickovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, za vřelý laskavý přístup, za velkou trpělivost se mnou a za jeho rady. Dále děkuji Ing. Pavlu Balvínovi a Ing. Janu Hlomovi za poskytnutí podkladů k vypracování bakalářské práce. Děkuji též za možnost s nimi spolupracovat během odborné praxe



### **Anotace**

Bakalářská práce se zabývá hydraulickým posouzením koncového regulačního segmentového uzávěru, který je umístěný na fyzikálním modelu Vodní dílo Vranov. Práce se především zaměřuje na stanovení výtokového součinitele tohoto koncového uzávěru. Popisuje se zde zvolený postup ke stanovení výtokového součinitele, dále se interpretují hodnoty výtokového součinitele pro tento typ uzávěru a diskutuje se nad citlivostí vstupních údajů.

### **Klíčová slova**

Výtokový součinitel, fyzikální model, koncový regulační segmentový uzávěr, typy výtoku, citlivost vstupních údajů

### **Anotation**

The bachelor's thesis deals with the hydraulic assessment of the regulating segment gate, which is located on the physical model Vodní dílo Vranov. The work mainly focuses on determining the outflow coefficient of this gate. In the work is described the method for determining the outflow coefficient, the values of the outflow coefficient for this type of gate and also is here discussion on the theme the sensitivity of the input data.

### **Keywords**

Outflow coefficient, physical model, regulating segment gate, types of the outflow, sensitivity of the input data



# Obsah

1.	Úvod .....	13
2.	Vodní dílo Vranov .....	14
2.1.	Účel VD Vranov .....	14
2.2.	Historie výstavby a současný stav VD Vranov .....	15
2.3.	Technologické prvky .....	15
2.3.1.	Spodní výpusti .....	15
2.3.2.	Přehradní těleso (hráz) .....	16
2.3.3.	Bezpečnostní přeliv .....	16
2.3.4.	Vývar .....	16
2.3.5.	Elektrárna .....	16
2.3.6.	Nádrž – vodní nádrž Vranov .....	17
2.4.	Výzkum na fyzikálním modelu .....	17
3.	Fyzikální model .....	18
	<i>Vodní dílo Vranov - Spodní výpust s koncovým regulačním segmentovým uzávěrem</i> .....	18
3.1.	Definice pojmu fyzikální model .....	18
3.2.	Popis fyzikálního modelu .....	18
3.2.1.	Přívod vody na fyzikální model .....	20
3.2.2.	Horní nádrž .....	20
3.2.3.	Spodní výpust .....	21
3.2.4.	Vývar .....	23
3.3.	Zařízení potřebná k měření fyzikálních veličin .....	23
3.3.1.	Tlakoměrná sonda .....	23
3.3.2.	Průtokoměr .....	24
3.3.3.	Thomsonův měrný přeliv .....	25
3.3.4.	Měrný válec s hrotovým měřítkem .....	25
3.3.5.	Číselná stupnice .....	26
3.3.6.	Foto a video dokumentace .....	26
3.4.	Měření na fyzikálním modelu .....	26
3.4.1.	Okrajová podmínka .....	26
3.4.2.	Měření fyzikálních veličin .....	27
3.4.2.1.	Hloubka vody v horní nádrži .....	28
3.4.2.2.	Hloubka vody ve vývaru .....	28
3.4.2.3.	Tlak .....	28
3.4.2.4.	Průtok .....	29

4.	Stanovení výtokového součinitele .....	30
4.1.	Základní rovnice .....	31
4.1.1.	Rovnice kontinuity.....	31
4.1.2.	Bernoulliho rovnice .....	32
4.1.3.	Celkové ztráty mechanické energie.....	32
4.1.4.	Ztráty místní .....	32
4.1.4.1.	Ztráta místní na česlích <i>Zčesle</i> .....	33
4.1.4.2.	Ztráta místní na nátokovém kuse <i>Znátok</i> .....	35
4.1.4.3.	Ztráta místní šoupětem <i>Zšoupě</i> .....	36
4.1.4.4.	Ztráta místní na koncovém uzávěru <i>Zuzávěr</i> .....	36
4.1.4.5.	Ztráty třením.....	38
4.2.	Kontrola kóty tlakové čáry v profilu <i>Tlak D</i> .....	40
4.3.	Stanovení energetické výšky v profilu <i>Uzávěr – začátek</i> .....	41
4.4.	Odvozený vztah pro výtokový součinitel.....	42
4.4.1.	Nezatopený výtok.....	43
4.4.2.	Zatopený výtok.....	44
4.4.3.	Částečně zatopený výtok.....	45
4.5.	Vstupní fyzikální veličiny .....	47
5.	Vyhodnocení.....	53
5.1.	Zpracování souboru dat.....	53
5.2.	Kontrola kóty tlakové čáry v profilu <i>Tlak D</i> .....	57
5.3.	Výtokový součinitel .....	58
5.4.	Porovnání výsledků výtokového součinitele s existujícími fakty.....	67
5.5.	Citlivost vstupních dat .....	68
5.5.1.	Stanovení chyby výtokového součinitele .....	70
5.5.1.1.	Stanovení chyby výtokového součinitele .....	70
5.5.1.2.	Vliv jednotlivých naměřených veličin na výtokový součinitel .....	74
5.5.2.	Chyba kóty tlakové čáry v profilu <i>Tlak D</i> .....	79
5.6.	Průběh kóty tlakové čáry v konfuzorovém přechodovém kuse .....	80
5.7.	Postřehy.....	84
6.	Závěr .....	86
7.	Citovaná literatura.....	89
8.	Seznam obrázků .....	91
9.	Seznam tabulek .....	92
10.	Grafy .....	93
11.	Přílohy.....	94



# 1. Úvod

Tématem bakalářské práce je hydraulické posouzení nově navrhovaného koncového segmentového uzávěru spodní výpusti na základě experimentu proběhlého v roce 2019 ve Výzkumném ústavu vodohospodářském, v.v.i.. Jelikož je prospěšné před uvedením do provozu ověřit funkci a vlastnosti koncového uzávěru, z existujících moderních způsobů se vybral výzkum prostřednictvím fyzikálního modelování. Experiment se realizoval na fyzikálním modelu Vodní dílo Vranov - Spodní výpust s koncovým regulačním segmentovým uzávěrem. Dané téma bylo vybráno z důvodu, že během odborné praxe se autorka částečně podílela na experimentu. Bakalářská práce vychází z poskytnutých podkladů z daného experimentu.<sup>1</sup>

Nově navrhovaný koncový segmentový uzávěr se skládá ze dvou částí – z konfuzorového kusu a hradící konstrukce segmentu. Poněvadž hydraulicky v podstatě nelze od sebe oddělit jednotlivé části, posuzuje se koncový uzávěr jako jeden celek.

Bakalářská práce se zaměřuje především na posouzení výtokového součinitele tohoto koncového uzávěru při různých úrovních hladin. Neboť je výtokový součinitel bezrozměrná veličina, předpokládá se nabývání stejné hodnoty výtokového součinitele na fyzikálním modelu a ve skutečnosti. Zvolilo se řešení stanovení výtokového součinitele přímo na fyzikálním modelu bez přepočtu do skutečnosti dle pravidel podobnosti fyzikálního modelování. V prvním kroku se odvodí vztah pro stanovení výtokového součinitele. Poté se provedou potřebné výpočty ve vhodně zvoleném procesoru a vyhodnotí se získané výsledky. Nakonec se provede diskuse nad tématem citlivostní analýza vstupních údajů. Druhým okrajovým tématem bakalářské práce je zpracování sad změřených tlaků v konfuzorovém kuse.

Cíl bakalářské práce:

- Výběr způsobu stanovení výtokového součinitele
- Stanovení výtokového součinitele – výpočet a interpretace výsledků
- Citlivostní analýza vstupních dat
- Okrajová diskuse nad sadou naměřených tlaků

---

<sup>1</sup> K vypracování této bakalářské práce byla poskytnuta Závěrečná zpráva výzkumu, soubor dat s naměřenými údaji, výkresová dokumentace a foto i video dokumentace. Informace obsažené v bakalářské práci týkající se výzkumu je možné použít po písemném souhlasu oprávněné osoby z VÚV TGM, v.v.i..

## 2. Vodní dílo Vranov

Vodní dílo Vranov (dále VD Vranov) je přehrada postavená nad městysem Vranov nad Dyjí na ř. km 175,405 vodního toku Dyje. [1] Vzduší od vzdouvací stavby dosahuje délky cca 29,8 km až pod obec Podhradí nad Dyjí. Řeka Dyje, německy Thaya, vzniká spojením řek Moravské Dyje a Rakouské Dyje nedaleko rakouské obce Raabs an der Thaya. [2] Povodí Dyje patří v rámci správce státního podniku Povodí Moravy pod správu závodu Dyje se sídlem v Náměšti nad Oslavou. [3] VD Vranov je součástí dyjské vodohospodářské soustavy a řadí se mezi víceúčelové vodní nádrže. [1]



Obrázek 1 VD Vranov [18] a mapa ČR mapa [19]

### 2.1. Účel VD Vranov

Dle Manipulačního řádu VD Vranov jsou funkce níže rozepsány. [4]

#### A) Akumulace vody

- zajištění trvalého minimálního průtoku v toku pod jezem ve Vranově v množství  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$
- nalepšení průtoků pro zajištění trvalého minimálního průtoku v Dyji v bilančním profilu jezu Krhovice v množství  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$
- odběr pro skupinové vodovody Znojmo a Vranov - Moravské Budějovice - Dukovany
- zajištění průtoků v Dyjsko- mlýnském náhonu od Krhovického jezu
- výrobu elektrické energie
- odběry pro závlahy a odběry drobných odběratelů povrchové vody

#### B) Ochrana před velkými vodami

- snížení kulminací velkých vod s částečnou ochranou pozemků pod přehradou až po nádrže Nové Mlýny

#### C) Další využití vodního díla

- rekreace, vodní sporty, sportovní rybolov a plavba v nádrži

## 2.2. Historie výstavby a současný stav VD Vranov

V knize *Přehrady Čech, Moravy a Slezska* [1] je uvedena zmínka o historii VD Vranov. První myšlenka o výstavbě VD Vranov se vyskytla v souvislosti s využitím energetického potenciálu řeky již za Rakousko-Uherské monarchie. Veškerá snaha o výstavbu díla skončila neúspěchem vlivem začátku První světové války. Po vzniku Československé republiky se myšlenka na výstavbu vodního díla obnovila. V letech 1923 – 1927 se zpracovala studie, jež navrhovala konstrukci gravitační hráze z litého betonu. [1] Samotná výstavba vodního díla proběhla v letech 1930 – 1934. Nejdříve se vyhloubily základy, provedla se úprava základové spáry, uskutečnila se injektáž v celé ploše základu podloží a poté od června 1931 do srpna 1933 probíhaly betonářské práce. Po jejich skončení se dostavěly spodní výpusti a hydroelektrárna. V dubnu 1934 bylo VD Vranov uvedeno do zkušebního provozu. Zajímavostí je, že při návrhu funkčních objektů se ověřovala jejich funkce v laboratoři České vysoké školy technické v Brně. [1]

Od uvedení do provozu VD Vranov už několikrát ospravedlnilo svoji funkci, například snížením povodňového průtoku při povodních v roce 2002 a pozitivnímu přispěním ke snížení povodňových škod. [1] Delší doba provozu VD Vranov přináší s sebou i negativní projevy ve formě stárnutí konstrukce. I přestože v minulosti vodní dílo prošlo menšími opravami, například v 50. letech opravou dolních stupňů kaskády [5], rozsáhlejší rekonstrukce byla provedena poměrně nedávno. V letech 2003-2005 se provedly opravy především povrchu betonové konstrukce rozložené do třech etap. [5] Další rekonstrukce v letech 2016–2019 se zaměřila na opravu koruny hráze. [6] V současnosti se uskutečňují kroky spjaté s rekonstrukcí spodních výpustí.

## 2.3. Technologické prvky

Vodní dílo Vranov se skládá z přehradního tělesa, vývaru, bezpečnostního přelivu, spodních výpustí, vodní elektrárny, domku hrázného a nádrže. Technické parametry jsou převzaty z webové stránky Povodí Moravy a z Manipulačního řádu VD Vranov. [7] [4]

### 2.3.1. Spodní výpusti

Počet spodních výpustí	4
Průměr potrubí spodní výpusti	DN 1600
Typu uzávěry	2 x válcový + 2 x typu Johnson
Kapacita při maximální hladině	2 x 36,4 m <sup>3</sup> /s + 2 x 36,4 m <sup>3</sup> /s
Kóta osy potrubí spodní výpusti	307,45 m n.m.

Tabulka 1 Technické parametry [4]

### 2.3.2. Přehradní těleso (hráz)

Gravitační hráz z litého betonu se skládá z 19 bloků s šířkou jednotlivých bloků v rozmezí 13,5 až 15,5 m a s šířkou elektrárenského dvojbloku 27,0 m. [4]

Kóta koruny hráze	353,39 m n. m.
Kóta dna před hrází	306,39 m n. m.
Výška hráze nade dnem údolí	47,00 m
Délka koruny hráze	290,45 m
Šířka vozovky na koruně hráze	7,0 m
Šířka hráze v základech	42,2
Sklon návodního/ vzdušného líce hráze	1 : 0,048 / 1:0,738

Tabulka 2 Technické parametry [4]

### 2.3.3. Bezpečnostní přeliv

Typ bezpečnostního přelivu	korunový nehrazený
Umístění bezpečnostních polí	6 u levého břehu + 3 mezi dvojblokem elektrárny a spodních výpustí
Kóta pevné přepadové hrany přelivu	350,10 m n. m.
Přepadové otvory světlosti	9 x 13,6 m
Délka přepadové hrany celkem	122,4 m
Přepadová výška při max. hladině	1,35 m
Kapacita přelivu při maximální hladině	460 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>

Tabulka 3 Technické parametry [4]

### 2.3.4. Vývar

Vývar je nepravidelného tvaru o průměrné délce 58,10 m, šířce ve dně 40,60 m a hloubce 4,0 m. Za betonovým prahem na kótě 305,96 m n.m. je kamenný zához. [4]

Kóta dna vývaru	301,96 m n. m.
Kóta závěrečného prahu vývaru	305,96 m n. m.
Hloubka vývaru pod prahem	4,00 m
Počet betonových rozražečů a jejich výška	dva (vysoké 4,50 m)
Účel	tlumení vody ze spodních výpustí a přepadající vody přes bezpečnostní přeliv

Tabulka 4 Technické parametry [4]

### 2.3.5. Elektrárna

Elektrárna	Vodní elektrárna (VE)	Malá vodní elektrárna 2 (MVE 2)
Počet turbín	3	1
Typ turbín	Francis	Francis
Instalovaný výkon	18,9 MW	1,125 MW
Přívodní potrubí	Ø 2,6 m	DN 600, DN 700 a DN 1000
Hltnost turbíny - průtočná kapacita	3 x 15 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	2,4 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>
Max. hltnost	45 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	3,5 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>
Provozovatel	společnost E-ON, a.s.	společnost E-ON, a.s.

Tabulka 5 Technické parametry [4]

### 2.3.6. Nádrž – vodní nádrž Vranov

Prostor	Hladina	objem
-	[m n.m.]	[mil. m <sup>3</sup> ]
Dno nádrže před hrází	306,39	-
stálé nadržení	331,45	31,840
zásobní	348,45	79,668
retenční ovladatelný	350,10	11,157
retenční neovladatelný	351,45	10,031
Celkový	-	132,696

Tabulka 6 Technické parametry [7]

## 2.4. Výzkum na fyzikálním modelu

V souvislosti s rekonstrukcí spodních výpustí proběhl v roce 2019 výzkum na fyzikálním modelu *Vodní dílo Vranov – Spodní výpust s koncovým regulačním segmentovým uzávěrem* a fyzikálním modelu *Prostorový model hrázového tělesa*. Fyzikální modely jsou umístěné ve Vodohospodářské hale veřejné výzkumné instituce Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i..

V závěrečné zprávě výzkumu [8] se píše, že motivací pro rekonstrukci regulačních uzávěrů spodních výpustí je nevyhovující technický stav uzávěrů typu Johnson a válcových uzávěrů. Vlivem provádění pouze běžné údržby a dílčí opravy během celého provozu současný stav nezaručuje dlouhodobý spolehlivý provoz. [8] Cílem rekonstrukce je obnovení provozní spolehlivosti a prodloužení životnosti k zajištění dlouhodobé bezpečnosti celého VD Vranov. [8, p. 7] V závěru závěrečné zprávy *VD Vranov – rekonstrukce regulačních uzávěrů spodních výpustí* je uveden odkaz na Studii od Jana Sehnala, kde by mělo být zmíněno, že „je doporučena varianta výměny současných regulačních uzávěrů za čtyři nové segmentové uzávěry.“ [8, p. 7]

Cílem výzkumu na fyzikálním modelu *Vodní dílo Vranov – Spodní výpust s koncovým regulačním segmentovým uzávěrem* bylo stanovení kapacity spodní výpusti vzhledem k hladině vody v horní nádrži, k hladině vody ve vývaru a otevření segmentového uzávěru, dále stanovení podmínek minimalizaci kavitace a návrh konfuzorové přechodové části segmentového uzávěru pro optimalizaci kapacity spodní výpusti a proudových podmínek ve spodní výpusti a ve vývaru. [8] Výzkum na fyzikálním modelu *Prostorový model hrázového tělesa* byl proveden s cílem prověřit bezpečné převedení vody přes bezpečnostní přeliv při nevypouštění či vypuštěním vody spodními výpustmi s navrhovanými koncovými regulačními uzávěry. [8]

### 3. Fyzikální model

#### *Vodní dílo Vranov - Spodní výpust s koncovým regulačním segmentovým uzávěrem*

##### 3.1. Definice pojmu fyzikální model

Odborná literatura *Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice* od autorů Jaroslava Čábelky a Pavla Gabriela se věnuje problematice fyzikálního modelování. [9]

Pojmem modelování se obecně rozumí zobrazení reálných objektů a jevů matematickými nebo fyzikálními prostředky, které umožňují jejich zkoumání. Znamé vztahy podobnosti umožňují přenášet poznatky i výsledky nabyté experimentem na modelu do skutečnosti. [9, p. 23]

Matematické modelování umožňuje zkoumat reálné systémy pomocí abstraktních systémů na základě jejich podobnosti s využitím matematických modelů. [9, p. 25] Při matematickém modelování jde o modelování jevu, kdy samotný jev i jeho prostředí je popsáno matematickými prostředky. [9, p. 25] Naopak fyzikální modelování představuje zobrazení zkoumaného jevu v prostoru a v čase s použitím zmenšených modelů tzv. fyzikálního modelu. Mezi modelem a skutečností existuje definovaná podobnost. [9, p. 23]

To znamená, že pojem fyzikální model představuje „zmenšeninu“ skutečné stavby ve zvolené podobnosti postavenou za účelem výzkumu.

##### 3.2. Popis fyzikálního modelu

Fyzikální model *Vodní dílo Vranov - Spodní výpust s koncovým regulačním segmentovým uzávěrem* se nachází ve vodohospodářské hale patřící veřejné instituci Výzkumný vodohospodářský ústav T.G.M., v.v.i.. Fyzikální model byl vytvořen v měřítku délek 1:14.68. Fyzikální model se skládá ze čtyř na sebe navazujících částí – přívod vody, horní nádrž, spodní výpust a vývar. V příloze 1 -12 je přiložena výkresové dokumentace fyzikálního modelu VD Vranov a v příloze 13 je přiložena fotodokumentace. Fyzikální model *Vodní dílo Vranov - Spodní výpust s koncovým regulačním segmentovým uzávěrem* je podrobněji popsán níže v této kapitole.





Obrázek 2 Fyzikální model Vodní dílo Vranov - Spodní výpust s koncovým regulačním segmentovým uzávěrem

Ve vodohospodářské hale veřejné instituce VÚV, v.v.i. se také nachází fyzikální model *Prostorový model hrázového tělesa* vytvořeném v měřítku 1 :55. Fyzikální model je zmenšenina celého vodního díla Vranov včetně části terénu pod ním. Model se skládá z přívodu vodu na fyzikální model, ze simulovaného prostoru vodní nádrže, tělesa hráze s bezpečnostními přelivy a spodními výpustmi, kaskády, vývaru, strojovny, budovy elektrárny a přilehlého terénu pod vodním dílem. Fyzikální model *Prostorový model hrázového tělesa* souvisí s proběhlým výzkumem v instituci VÚV TGM, v.v.i., ale v rámci této bakalářské práci se s ním nepracuje.



Obrázek 3 Prostorový model hrázového tělesa

### 3.2.1. Přívod vody na fyzikální model

Zdrojem vody pro fyzikální model je rozvodná síť vodohospodářské haly. Nejdříve je voda přivedena z rozvodné sítě pomocí přívodního potrubí přes šoupě, které reguluje množství protékající vody dle svého otevření, do modrého tělesa obdélníkového půdorysu. Následně je voda z modrého tělesa vedena potrubím do prostoru horní nádrže.

V modrém tělese umístěném ve výšce necelé čtyři metry nad podlahou haly se nachází Thomsonův měrný přeliv. Z boku modrého tělesa je připevněn měrný válec s hrotovým měřítkem pro měření hloubky vody, která se používá pro výpočet průtoku dle Thomsonovy rovnice.



Obrázek 4 Přívod vody



Obrázek 5 Thomsonův měrný přeliv

### 3.2.2. Horní nádrž

Slovní spojení horní nádrž představuje souhrnný pojem pro svislou betonovou šachtu a všech jednotlivých prvků umístěných uvnitř betonové šachty. Horní nádrž slouží k napodobení podmínek v prostoru vodní nádrže Vranov před nátokem do spodní výpusti, především dosažení tlačné výšky pro potrubí spodní výpusti. [8]

Svislá betonová šachta o výšce 3,5 m usazená na železobetonové desce se skládá ze čtyř skruží kruhového půdorysu o vnitřním průměru cca 2,0 m. Na přítoku do betonové šachty se vyskytuje svislé tlumící zařízení z polypropylenového roštů, jež slouží ke tlumení přitékající vody z modrého tělesa do prostoru šachty a jež by mělo zabezpečit vytvoření rovnoměrných podmínek.

V horní nádrži se dále nachází nátok do potrubí spodní výpusti. Pro výzkum na fyzikálním modelu je nainstalována pouze jedna ze čtyř spodních výpustí. Před nátokem do potrubí spodní výpusti je dno sníženo o 116,0 mm oproti zbývajícimu



dnu v horní nádrži. Prohloubený prostor je po stranách vymezen betonovými nátokovými předsunutými pilíři, které slouží k ochraně nátoků a k uchycení česlí.

Česle jsou ve vodorovném směru podepřeny vodorovnými nosníky ukotvenými do nátokových pilířů. Ve svislém směru jsou po bocích podepírány nátokovými pilíři a uprostřed svislým nosníkem. [8] Česle s náklonem  $48^\circ$  od horizontální osy se skládají z česlic obdélníkového tvaru o tloušťce 1 mm, s roztečí 9 mm a tloušťkou po směru proudění 14 mm.

Stěnou betonové šachty vede hadička, která se rozdvouje směrem k číselné stupnici na milimetrovém papíře upevněné na vnější straně horní nádrže a k tlakoměrné sondě. Stupnice slouží pro stanovení hloubky vody v horní nádrži a tlakoměrná sonda měří tlak od vody v místě zaústění hadičky.



Obrázek 6 Horní nádrž - pohled z vnějšku



Obrázek 7 Horní nádrž - pohled dovnitř

### 3.2.3. Spodní výpust

Na fyzikálním modelu název *spodní výpust* představuje souhrnný pojem pro potrubí a jednotlivých prvků umístěných na něm, tj. nátokový kus, šoupě a koncový uzávěr. V příloze 1-12 je uveden podélný profil spodní výpusti, půdorys spodní výpusti a detaily vybraných prvků.

Nátokový kus se nachází na začátku spodní výpusti na nátoku. Lineárně se zužuje na vzdálenosti 51 mm z průměru 164 mm na hodnotu vnitřního průměru potrubí spodní výpusti 109 mm (pozn. vnější průměr potrubí činí 125 mm). Za zúžením je do prostoru vrcholu kratšího úseku potrubí zaústěno zavzdušňovací potrubí. Líc nátokového kusu začíná na rovné svislé betonové stěně přesazené před vnitřním lícem betonové kruhové šachty.

Za nátokovým kusem následuje krátký úsek potrubí spodní výpusti. Dále je osazeno průhledné polypropylenové potrubí pro sledování proudu vody. Za ním následuje delší neprůhledné polypropylenové potrubí, na kterém je ultrazvukový průtokoměr. Na neprůhledné potrubí navazuje plně otevřená šoupě, kratší neprůhledné polypropylenové potrubí a koncový regulační segmentový uzávěr. Na kratším úseku potrubí jsou ve vzdálenosti 150 mm od spoje s koncovým uzávěrem po obvodě umístěné čtyři tlakové odběry (nahore, dole a po stranách) v profilu Tlak D. V příloze 1 je přiložen podélný profil spodní výpusti včetně zakreslení místa zmíněného profilu.

Koncový regulační segmentový uzávěr se skládá ze dvou částí – z konfuzorového přechodového kusu a hradící konstrukce segmentu. Konfuzorový (přechodový) kus zajišťuje přechod z kruhového profilu potrubí vnitřního průměru 109 mm do profilu obdélníkového o vnitřních rozměrech 65,4 x 130,8 mm. Pro měření tlaků v přechodovém kusu jsou po jeho obvodě situovány tlakové odběry ve třech profilech – Tlak A, Tlak B a Tlak C. Na přechodový kus je uchycená hradící konstrukce segmentu. Koncový regulační segmentový uzávěr byl vymodelován na 3D tiskárně. Případné podklady o návrhu tvaru koncového regulačního segmentového uzávěru jsou uvedeny v *Závěrečné zprávě výzkumu na fyzikálním modelu*. V příloze 8 je uveden výkresový podklad koncového uzávěru.



Obrázek 8 Část potrubí spodní výpusti – šoupě, profil Tlak D



Obrázek 9 Konfuzorový přechodový kus

### 3.2.4. Vývar

Bílá obdélníková nádrž představuje prostor vývaru. Na začátku se nachází strojovna spodních výpustí. V jejím výtokovém otvoru je umístěn koncový regulační uzávěr. Dále následují dva rozražeče vysoké 102 mm, široké 409 mm a dlouhé 477 mm. Za prahem vývaru vysokým 275 mm nade dnem vývaru se nachází konstrukce s hradidly, s kterými se nastavuje hloubka vody ve vývaru.

Na stěně vývaru je svislá stupnice pro ruční odečet hloubky vody ve vývaru. Dnovým odběrem v prahu odchází voda trubicí na bok stěny do měrného válce s hrotovým měřítkem a hadičkou na tlakoměrnou sondu. Hloubka vody nad prahem vývaru se určuje pomocí hrotového měřítka v měrném válci a tlakoměrné sondě. V příloze 5 je uveden výkres vývaru.

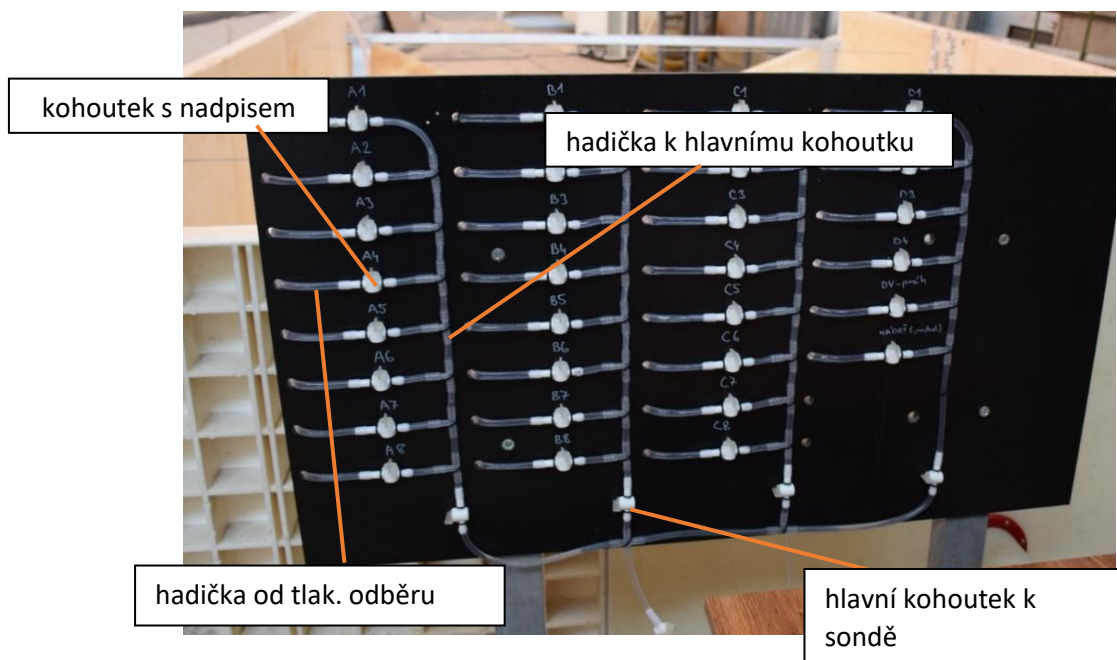
## 3.3. Zařízení potřebná k měření fyzikálních veličin

Na fyzikálním modelu se měří tyto fyzikální veličiny - průtok, hloubka vody ve vývaru, hloubka vody v horní nádrži a tlaky v několika profilech na potrubí výpusti a přechodovém kusu uzávěru. K jejich měření byla použita tato zařízení - přístroje (tlakoměrná sonda, průtokoměr), Thomsonův měrný přeliv, měrný válec s hrotovým měřítkem, číselné stupnice a pořízená foto a video dokumentace.

### 3.3.1. Tlakoměrná sonda

Tlakoměrná sonda pochází od výrobce Gresinger. Snímač tlaku z nerezové oceli typu MSD 400 MRE má rozsah 0 až 400 mbar (relativní tlak) s chybou z rozsahu cca 0,2 %. Tlakoměrná sonda slouží k měření tlaku v místech tlakových odběrů a ke stanovení hloubky vody v horní nádrži a hloubky vody nad prahem vývaru. tlakových odběrů (tj. na potrubí spodní výpusti, na konfuzorovém přechodovém kuse, v dnovém odběru prahu vývaru a v horní nádrži) je vedena hadička k ovládacímu panelu, kde je zakončena kohoutkem. Pro přehlednost je kohoutek nadepsán místem tlakového odběru. Na kohoutek navazuje další hadička, která se setkává s ostatními hadičkami (od ostatních kohoutků jednotlivých odběrů) v jednom bodě – v hlavním kohoutku. Od hlavního kohoutku vede jedna hadička na tlakoměrnou sondu. Dle místa tlakového odběru jsou kohoutky uspořádány do sloupce pod sebe a pro bezpečnost jsou jednotlivé sloupce ještě zajištěny dalším kohoutkem. Ovládací panel je na fotografii níže. Pro odečet tlaků na tlakoměrné sondy se používá software nainstalovaný v notebooku, jenž ukazuje

záznam měřené veličiny v čase tj. tlaku v jednotkách milibar. Před každým měřením bylo nutné hadičky odvzdušnit a provést kalibraci.



Obrázek 10 Ovládací panel s popisem



Obrázek 11 Tlakoměrná sonda



Obrázek 12 Pracovní stůl - notebook, ovládací panel a vyhodnocovací jednotka průtokoměru

### 3.3.2. Průtokoměr

Ultrazvukový průtokoměr typu OPTISONIC 6300 P pochází od výrobce Krohne. Chyba průtokoměru uváděna výrobcem činí 1 % z naměřené hodnoty. [10] Průtokoměr se skládá ze dvou částí – z vyhodnocovací jednotky a lišty se senzory. Vyhodnocovací jednotka položená na pracovním stole je pomocí kabelu spojena lištou se senzory a slouží k ovládnání průtokoměru a k vyhodnocování dat. Lišta se senzory slouží k samotnému měření. Je připevněna na vnější straně potrubí spodní výpusti pomocí dvou pásků dodanými výrobcem.



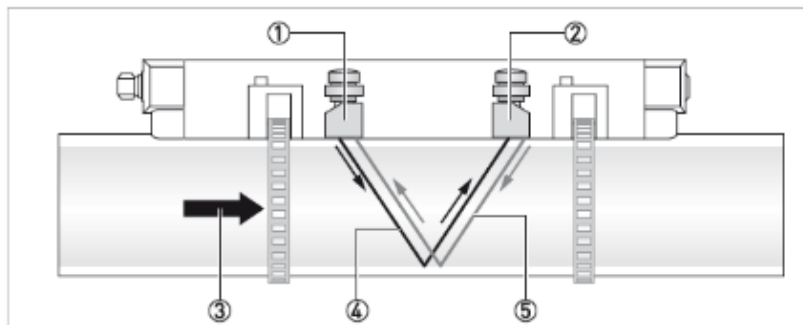


Figure 1-1: Measuring principle

- ① Transducer A
- ② Transducer B
- ③ Flow velocity
- ④ Transit time from transducer A to B
- ⑤ Transit time from transducer B to A

Obrázek 13 Princip průtokoměru (uváděný výrobcem) [10] + Obrázek 14 Lišta se senzory na potrubí spodní výpusti

Princip průtokoměru je následující. Na liště se senzory jsou umístěny dva body – bod A a bod B. Mezi těmito body jsou vysílány v nastaveném časovém intervalu zvukové signály. Měří se doba průchodu signálu z bodu A do bodu B a z bodu B do bodu A. Naměřená doba po směru proudění je menší doba než proti směru proudění. Rozdíl dob průchodu po směru proudění a proti směru proudění je přímo úměrný střední rychlosti tekutiny. Přístroj dle definovaného průměru potrubí, tloušťky stěny a materiálu potrubí následně sám vyhodnotí hodnotu průtoku. [10]

### 3.3.3. Thomsonův měrný přeliv

Thomsonův měrný přeliv patří k nepřímé metodě určení průtoku, neboť se průtok nestanovuje přímo, ale až výpočtem ze vzorce. Pomocí hrotového měřítka v měrném válci spojeného s modrým tělesem se určila hloubky vody v modrém tělese potřebná pro výpočet. V příloze 12 jsou uvedeny rozměry Thomsonova měrného přelivu.

### 3.3.4. Měrný válec s hrotovým měřítkem

Měrný válec s hrotovým měřítkem slouží ke stanovení hloubky vody nad prahem vývaru. Dnovým odběrem odchází voda trubicí na bok stěny do měrného válce. Měrný válec funguje na principu spojených nádob, tj. hladina v měrném válci vystoupá do stejné úrovně jako hladina v měřeném místě - v modrém tělese nebo nad prahem vývaru.

### 3.3.5. Číselná stupnice

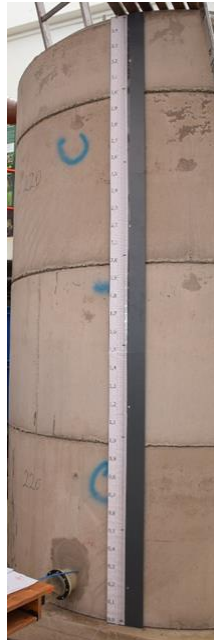
Číselná stupnice ve vývaru slouží spíše jako doplňující prvek k určení hloubky vody nad dnem vývaru. Číselná stupnice na milimetrovém papíře na betonové šachtě slouží ke stanovení hloubky vody v horní nádrži a dále ke kalibraci tlakoměrné sondy.

### 3.3.6. Foto a video dokumentace

Probíhající experimenty se zdokumentovaly pomocí videí a fotografií pro případnou zpětné vyhodnocení. Této možnosti se využilo při určení hloubky vody v místě koncového uzávěru.



Obrázek 15 Měrný válec s hrotovým měřítkem



Obrázek 16 Číselná stupnice na šachtě



Obrázek 17 Číselná stupnice ve vývaru

## 3.4. Měření na fyzikálním modelu

Postup měření na fyzikálním modelu lze shrnout jednou větou. Hradící konstrukce segmentu se nastavila do příslušné polohy, pustila se voda na fyzikální model, nastavily se okrajové podmínky a po ustálení fyzikálního modelu se změřily potřebné fyzikální veličiny.

### 3.4.1. Okrajová podmínka

Pro jednotlivá procenta otevření segmentového uzávěru existuje nespočetně mnoho variant (stavů) vzniklé kombinací okrajových podmínek. Předem se sestavila sada vybraných stavů, které se poté nastavily a proměřily na fyzikálním modelu. Okrajovými podmínkami jsou hloubka vody v horní nádrži a hloubka vody ve vývaru.

Sestavením sad se rozumí, že pro vybraná procenta otevření segmentového uzávěru se vybraly konkrétní hloubky vody v horní nádrži a konkrétní hloubky vody ve vývaru.<sup>2</sup> Tyto hloubky se mezi sebou nakombinovaly, tj. pro jednu hloubku vody ve vývaru je odpovídající konkrétní počet hloubek vody v horní nádrži. Výběr sady stavů je patrný z tabulkové části v Příloze 15. Bližší popis o orientaci v tabulce je uveden v kapitole 5.1 *Zpracování souboru dat*. Pojmem procento otevření segmentového uzávěru se myslí procento výšky otevření koncového profilu. Například 50 % otevření segmentového uzávěru znamená 50 % výšky otevření koncového profilu. Zdali je výška koncového profilu  $b = 64,5$  mm a  $x = 0,50$ , pak výška otevření je  $x * b = 0,5 * 64,5 = 32,25$  mm.

Procento otevření segmentového uzávěru je pevně dané nastavením hradící konstrukce segmentu. Okrajová podmínka hloubka vody ve vývaru se nastavuje pomocí hradidel na konci prahu vývaru. Okrajová podmínka hloubka vody v horní nádrži je nastavena postupným regulováním průtoku pomocí otevření šoupěte a v případě zatopení koncového uzávěru i hloubkou vody ve vývaru tak, aby se docílilo zvolené kombinace hloubky vody v horní nádrži a hloubky vody ve vývaru.

Při měření na fyzikálním modelu se zavádí předpoklad ustáleného proudění, tj. po celou dobu měření jedné simulace by měly být okrajové podmínky neměnné. Pak platí, že v momentu, kdy odečet okrajových podmínek bude po sobě zvolených časových intervalech konstantní, může se předpoklad prohlásit za potvrzený a model prohlásit za ustálený. Z předpokladu vyplývá, že průtok nabývá stejných hodnot v celém systému fyzikálního modelu pro každý simulovaný stav.

### 3.4.2. Měření fyzikálních veličin

Na fyzikálním modelu jsou měřeny fyzikální veličiny – průtok, tlak a hloubka vody. Tyto fyzikální veličiny jsou dále využity pro výpočty. Podrobnější popis měřících zařízení je uveden v kapitole 3.3 *Zařízení potřebná k měření fyzikálních veličin* a popis přepočtu naměřených hodnot je uveden v kapitole 4.6 *Vstupní fyzikální veličiny*.

---

<sup>2</sup> Pro usnadnění čtení textu, se zavádí následující pojmy:

Hloubka vody = hloubka vody nad dnem horní nádrže/prahem vývaru/dnem vývaru

Hladina vody = výška hladiny vody ke zvolené srovnávací rovině SR, zde k nule na číselné stupnici umístěné na vnější straně horní betonové šachty

Pozn. Na fyzikální modelu se měřila přímo hladina vody v horní nádrži k SR, hloubka vody je určena zpětně odečtením výška dna horní nádrže nad srovnávací rovinou.

### 3.4.2.1. Hloubka vody v horní nádrži

Hloubka vody v horní nádrži se stanoví dvěma způsoby. Zaprvé se odečítá pomocí hadičky vedené z prostoru horní nádrže na číselnou stupnici na vnější straně betonové šachty. Zadruhé se určí přepočtem přes kalibrační rovnici z tlaku naměřeného pomocí tlakoměrné sondy.

### 3.4.2.2. Hloubka vody ve vývaru

Hloubka vody ve vývaru se stanoví ve třech profilech – nad prahem vývaru, za rozražečem a u koncového uzávěru. Hloubka vody nad prahem se měří pomocí hrotového měřítka nebo výpočtem kalibrační rovnice ze změřených tlaků. Tato hloubka není při výpočtu v bakalářské práci využita. Slouží spíše pro nastavení okrajové podmínky dolní vody na fyzikálním modelu. Hloubka vody za rozražečem se stanoví dle číselné stupnice na stěně vývaru a je pouze informativní hodnota pro hrubou kontrolu hloubky vody během experimentu. Hloubka vody u koncového uzávěru byla stanovena dodatečně dle foto a video dokumentace, protože pro původní účely výzkumu znalost úrovně této hladiny nebyla potřebná. Hloubka vody u koncového uzávěru je použita pro další výpočty.

### 3.4.2.3. Tlak

Tlak se měří v tlakových odběrech pomocí tlakoměrné sondy. Jeho hodnota je odečítána jako průměrná hodnota ze záznamu v notebooku v časovém rozmezí měření daného tlaku. Hodnota tlaku je použita pro výpočet hloubky vody, výšky hladiny vody nad srovnávací rovinou a stanovení kóty tlakové čáry v místě tlakového odběru.<sup>3</sup>

Například jestli experiment probíhá v čase 10:05 – 10:25, tak hodnota tlaku v profilu Tlak D je měřena v časovém rozmezí 10:05-10:08. Pozoruje se vykreslení křivky měřeného tlaku v profilu Tlak D na záznamu do doby, než se tvar křivky opakuje. Poté se odečte přímo z aktuálního vykreslení křivky průměrná hodnota tlaku D. Tlak je uváděn v mbar.

Vlivem změny okolního prostředí dochází k menším změnám na fyzikálním modelu, jako například změna tlaku ve vodohospodářské hale, změně teploty a jiné.

---

<sup>3</sup> Protože kalibrační rovnice se vztahuje k číselné stupnici na betonové šachtě a zároveň vede počátkem číselné stupnice srovnávací rovina, určují se kalibrační rovnicí přímo výška hladiny vody k srovnávací rovině. Hloubka vody se určí odečtem potřebné výšky.



Jednotlivé maličkosti se sčítají a mají za následek posun srovnávací roviny o nulové hodnotě na tlakoměrné sondě. Proto by se měla sonda kalibrovat před každým měřením.

Kalibrace tlakoměrné sondy byla prováděna pomocí vizuálně odečtených hodnot na stupnici průhledné hadičky napevno umístěné na vnější straně betonové horní nádrže. Naměřené body se proložily a vytvořila se kalibrační rovnice.

Kalibrační rovnice zní:

$$y = ax + b$$

kde	x	tlak naměřený na tlakoměrné sondě	[mbar]
	y	výška na číselné stupnici	[m]
	a, b	vygenerované konstanty	[-]

#### 3.4.2.4. Průtok

Průtok se měří pomocí ultrazvukového průtokoměru a pomocí Thomsonova měrného přelivu na přítoku v modrém tělese.

Hodnota průtoku na průtokoměru je měřena dvěma způsoby. Zaprvé přímo během měření stavu se sleduje hodnota průtoku na obrazovce přístroje a zapisuje se průměrná hodnota dle odhadu. Hodnota slouží pouze pro ověření průtoku ze záznamu. Druhou možností je průtok ze záznamu. Ten se stanoví až zpětně z vygenerovaných dat průtoku v procesoru Excelu funkcí průměrná hodnota. Časová délka záznamu je doba trvání experimentu. Například jestli v čase 10:05-10:25 proběhl experiment, pak se najde v Excelu toto časové rozmezí a určí se průměrná hodnota průtoku během něj.

Průtok z Thomsonova přelivu se určí výpočtem. Pro stanovení přepadové výšky, která je použita pro výpočet průtoku, se na hrotovém měřítku odečítala hloubka vody v modré krabici.

## 4. Stanovení výtokového součinitele

Poněvadž výtokový součinitel pro navrhovaný koncový regulační segmentový uzávěr je bezrozměrná fyzikální veličina, dá se předpokládat, že by měl výtokový součinitel nabývat stejné hodnoty na fyzikálním modelu i na reálné stavbě. Tento předpoklad umožňuje v rámci bakalářské práce se přiklonit k možnosti stanovení výtokového součinitele zvolenými postupy přímo na fyzikálním modelu. Z tohoto důvodu princip fyzikálního modelování, kdy jsou naměřené hodnoty na fyzikálním modelu přepočteny dle pravidel podobnosti na skutečné hodnoty pro reálnou stavbu a použity pro další postup stanovení výtokového součinitele, není uvažován a použit.

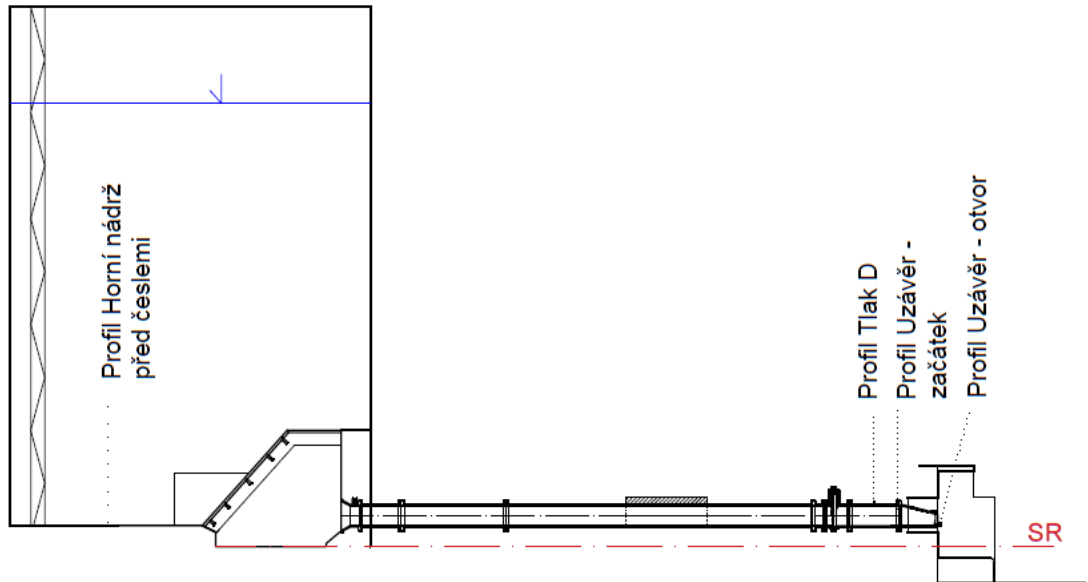
Avšak existuje zde riziko tohoto předpokladu, že bezrozměrný výtokový součinitel může být ovlivněn volbou měřítka fyzikálního modelu. Podobně jako součinitel ztrát třením může být součinitel ztráty místní pro koncový uzávěr (odvozený z výtokového součinitele) závislý na Reynoldsově čísle. Pro vyloučení rizika by bylo vhodné provést měření na fyzikálním modelu s jiným měřítkem a hodnoty součinitelů ztráty místní (popřípadě výtokového součinitele) porovnat.

Výtokový součinitel nelze přímo změřit na fyzikálním modelu, ale musí se stanovit výpočtem. „Filosofie“ stanovení výtokového součinitele tkví v tom, že se odvodí odvozený vztah pro výtokový součinitel pomocí Bernoulliho rovnice mezi vstupním profilem Profil Uzávěr – začátek a výstupním profilem Uzávěr – otvor a že se dle tohoto odvozeného vztahu výtokový součinitel spočítá (umístění profilů viz. obr 18).

Energetická výška pro profil Uzávěr – začátek se určí buď z Bernoulliho rovnice mezi profily Tlak D a Uzávěr – začátek, nebo z Bernoulliho rovnice mezi profily Horní nádrž před česlemi a Uzávěr – začátek. Pro stanovení energetické výšky v profilu Uzávěr – začátek je vybrána možnost první – pomocí Bernoulliho rovnice mezi profily Tlak D a Uzávěr – začátek. Druhá možnost je po menší obměně použita pro kontrolu kóty tlakové čáry v profilu Tlak D, tj. pomocí Bernoulliho rovnice mezi profily Horní nádrž před česlemi a Tlak D. Energetická výška pro profil Uzávěr – otvor je získaná z naměřených hodnot.

Dle hladiny vody ve vývaru se rozlišují tři situace výtoku – nezatopený (dokonalý) výtok, částečně zatopený výtok a zatopený (nedokonalý) výtok. Pro všechny tyto situace je zapotřebí odvodit odvozený vztah pro výtokový součinitel samostatně.

Kapitola se zabývá obecnými základními rovnicemi použité pro kontrolu kóty tlakové čáry v profilu Tlak D, stanovení energetické výšky v profilu Uzávěr – začátek, odvození vztahu pro výtokový součinitel pro tři navrhované situace a definice použitých veličin.



Obrázek 18 Fyzikální model – Vyznačené profily

## 4.1. Základní rovnice

Pojmem základní rovnice se rozumí použité vstupní rovnice pro odvození vztahu pro výtokový součinitel, pro odvození vztahu pro ověření kóty tlakové čáry a pro odvození vztahu pro energetickou výšku. Základními rovnicemi jsou rovnice kontinuity a Bernoulliho rovnice.

### 4.1.1. Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity pro proudovou trubici je [11, p. 89]

$$Q_1 = Q_2 = \text{konstantní } Q \Rightarrow \text{konst } Q = S_2 * v_2 = S_1 * v_1 = S_x * v_x$$

$$\text{pak můžeme napsat obecně } Q = S_x * v_x \quad (4.1.1.)$$

kde	$Q$	průtok – v měřeném profilu	$[\text{m}^3/\text{s}]$
	$S_x$	průtočná plocha – v měřeném profilu	$[\text{m}^2]$
	$v_x$	rychlost – v měřeném profilu	$[\text{m}/\text{s}]$

Rychlost v jakémkoliv profilu (například  $v_{potr}$ ,  $v_{česle}$ ,  $v_{ot}$ ) se určí po úpravě předešlého vztahu dle rovnice:

$$v_x = \frac{Q}{S_x} \quad (4.1.2)$$

### 4.1.2. Bernoulliho rovnice

Pro ustálené proudění skutečné nestlačitelné kapaliny v potrubí platí rozšířená Bernoulliho rovnice s uvažováním ztráty mechanické energie  $\sum Z$  [12, pp. 55,78] mezi vstupním profilem (pozn. index jedna) a výstupním profilem (pozn. index dva).

$$h_E = h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \sum Z \quad (4.1.3)$$

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

### 4.1.3. Celkové ztráty mechanické energie

Celkové ztráty mechanické energie jsou ve výškovém tvaru Bernoulliho rovnice zavedeny součtem ztráty třením a ztráty místní: [12, p. 78]

$$\sum Z = \sum Z_t + \sum Z_m \quad (4.1.4)$$

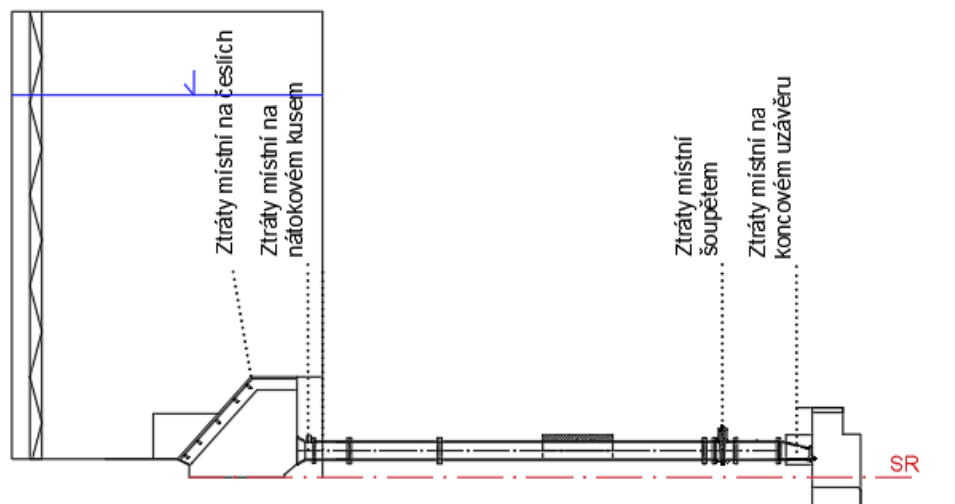
kde	$\sum Z$	celkové ztráty mechanické energie	[m]
	$\sum Z_t$	ztráty třením	[m]
	$\sum Z_m$	ztráty místní	[m]

### 4.1.4. Ztráty místní

Ztráty místní vznikají zvýšeným vnitřním třením kapaliny v důsledku deformace rychlostního pole, například při zúžení, při rozšíření či při změně směru proudění, a vyjadřují se jako část rychlostní výšky. [12, p. 78] Obecně jsou dány vztahem:

$$\sum Z_m = \sum (\zeta_x \frac{v_x^2}{2g}) \quad (4.1.5)$$

kde	$Z_m$	ztráta místní	[m]
	$\zeta_x$	součinitel místní ztráty	[-]
	$v_x$	rychlost v profilu ztráty	[m/s]
	$g$	gravitační zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]

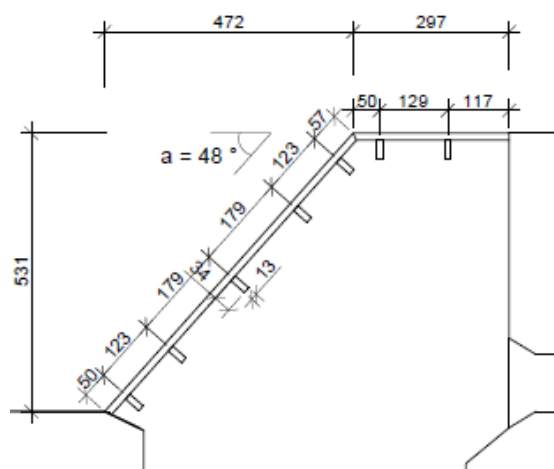


Obrázek 19 Ztráty místní

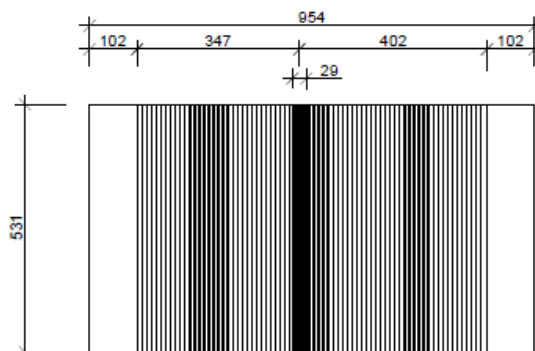
Na fyzikálním modelu v úseku mezi horní nádrží a koncem základové výpusti jsou následující ztráty místní – na česlích, na nátokovém kuse, na šoupěti a na koncovém uzávěru.

#### 4.1.4.1. Ztráta místní na česlích $Z_{\text{česle}}$

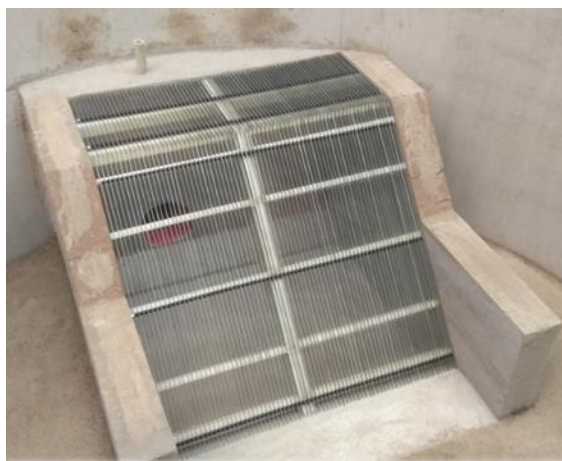
Průtočná část česlí se skládá ze dvou částí. První část je uložena diagonálně s náklonem  $48^\circ$  od horizontální osy (od hladiny) a druhá část je uložena vodorovně s náklonem  $0^\circ$  od horizontální osy (od hladiny). Česle se skládají z česlic obdélníkového tvaru o tloušťce 1 mm, s roztečí 9 mm a tloušťkou po směru proudění 14 mm. Profil česlic je orientován ve směru proudění. Česle celkem obsahují 69 česlic – uprostřed jsou rozděleny průběžnou svislou podpěrou na dvě části. V levé části ve směru proudění je 32 česlic a v pravé části česlí ve směru proudění je 37 česlic. Geometrii česlí popisují níže přidané obrázky.



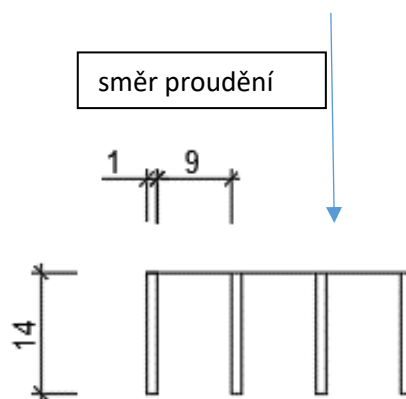
Obrázek 20 Svislý řez česlemi



Obrázek 21 Pohled na česle ve směru proudění



Obrázek 22 Pohled na česle



Obrázek 23 Parametry česlic a rozteče

Ztráta místní na česlích  $Z_{\text{česle}}$  se určí:

$$Z_{\text{česle}} = \zeta_{\text{česle}} \frac{v_{\text{česle}}^2}{2g} \quad (4.1.6)$$

kde	$Z_{\text{česle}}$	ztráta místní na česlích	[m]
	$\zeta_{\text{česle}}$	součinitel místní ztráty	[-]
	$v_{\text{česle}}$	rychlost před česlemi	[m/s]
	$g$	gravitační zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]

Součinitel místní ztráty se vypočítá dle vztahu: [13, p. 272]

$$\zeta_{\text{česle}} = \mu_1 \mu_2 \varphi^2 \sin^n(x) \quad (4.1.7)$$

kde	$\zeta_{\text{česle}}$	součinitel místní ztráty	[-]
	$\mu_1$	součinitel úměrnosti – vliv tvaru česlí	[-]
	$\mu_2$	součinitel úměrnosti – vliv směru nátoky	[-]
	$\varphi$	součinitel	[-]
	$x$	úhel od horizontální osy	[-]
	$n$	exponent zaoblení, pro obdélníkový tvar česlí $n = 1,0$	[-]

pak součinitel  $\varphi$  nabývá hodnoty

$$\varphi = \frac{t}{b+t} = \frac{1}{1+9} = 0,1 \quad (4.1.8)$$

kde	$\varphi$	součinitel	[-]
	$t$	tloušťka česlí, $t = 1$ mm	[-]
	$b$	rozteč česlí, $b = 9$ mm	[-]

Dle grafu 6.66 v odborné literatuře *Hydraulika – Technický průvodce* [13, p. 272] součinitel úměrnosti je  $\mu_1 = 3,0$ . Při směru proudění pod úhlem  $0^\circ$  (pozn. profil česlic je orientován ve směru proudění) je součinitel úměrnosti  $\mu_2 = 1,0$ . Pro diagonálně uložené česle nabývá součinitel místní ztráty po dosazení do vztahu 4.1.7 hodnoty  $\zeta_{\text{česle}} = 0,0222$ . Pro vodorovně uložené česle nabývá součinitel místní ztráty po dosazení do vztahu 4.1.7 teoretické hodnoty  $\zeta_{\text{česle}} = 0,0$  za předpokladu, že voda natéká k česlím vodorovně. Pro zlehčení rozdělení průtoku na obě části česlí se zavádí předpoklad, že voda bude proudit především diagonální částí, neboť má větší průtočnou plochu. Ve skutečnosti se voda bude přibližovat k nátoku nejspíše kónicky.

#### 4.1.4.2. Ztráta místní na nátokovém kuse $Z_{\text{nátok}}$

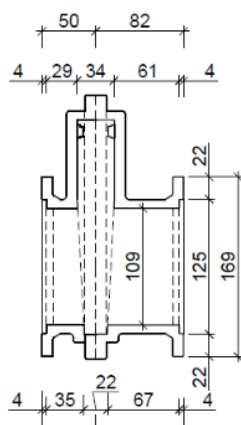
Nátokový kus se lineárně zužuje na vzdálenosti 51 mm z kruhové profilu o průměru 164 mm na kruhový profil průměru 109 mm. Úhel zúžení od horizontální osy je  $28^\circ$ . Za zúžením následuje kratší rovná část potrubí se zaústěním zavzdušňovacího potrubí.

Ztráta místní na nátokovém kuse  $Z_{\text{nátok}}$  se určí:

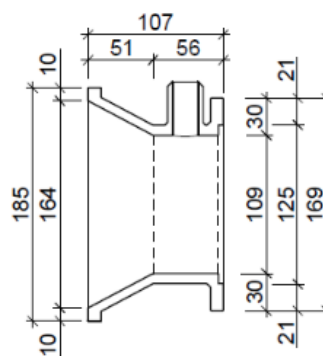
$$Z_{\text{nátok}} = \zeta_{\text{nátok}} \frac{v_{\text{potr}}^2}{2g} \quad (4.1.9)$$

kde	$Z_{\text{nátok}}$	ztráta místní na nátokovém kuse	[m]
	$\zeta_{\text{nátok}}$	součinitel místní ztráty	[-]
	$v_{\text{potr}}$	rychlost v potrubí základové výpusti za nátokovým kusem	[m/s]
	$g$	gravitační zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]

Dle literatury Idelchik, Handbook of Hydraulic Resistance [14] nabývá součinitel místní ztráty hodnoty  $\zeta_{\text{nátok}} = 0,08$ .



Obrázek 24 Řez nátokovým kusem



Obrázek 25 Řez šoupětem

#### 4.1.4.3. Ztráta místní šoupětem $Z_{šoupě}$

Pro zachování místní ztráty způsobené šoupětem je na fyzikálním modelu umístěna armatura šoupěte bez pohybového mechanismu. Ztráta místní představuje obdélníková drážka šoupěte.

Ztráta místní na šoupě  $Z_{šoupě}$  se určí:

$$Z_{šoupě} = \zeta_{šoupě} \frac{v_{potr}^2}{2g} \quad (4.1.10)$$

kde	$Z_{šoupě}$	ztráta místní šoupětem	[m]
	$\zeta_{šoupě}$	součinitel místní ztráty	[-]
	$v_{potr}$	rychlost v potrubí výpusti	[m/s]
	$g$	gravitační zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]

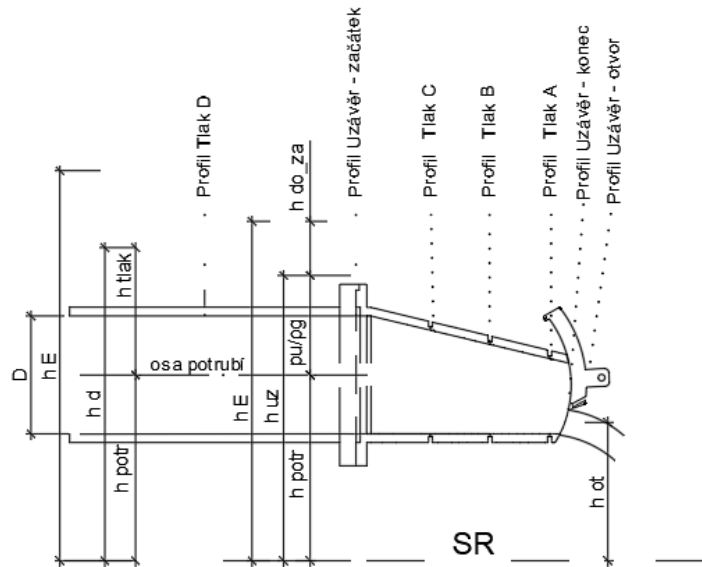
Hodnota součinitele místní ztráty závisí na provedení šoupěte a procentu jeho otevření. Pro daný typ šoupěte použitý na základové výpusti při jeho plném otevření je součinitel místní ztráty určen hodnotou 0,03. [14]

#### 4.1.4.4. Ztráta místní na koncovém uzávěru $Z_{uzávěr}$

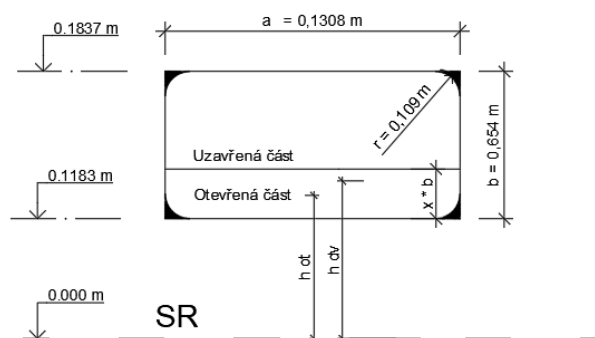
Koncový regulační segmentový uzávěr se skládá ze dvou částí – z konfuzorového přechodového kusu a hradící konstrukce segmentu. Vzhledem k těsné návaznosti segmentu na konfuzor není možné vhodným způsobem od sebe díly oddělit, proto se při výpočtu uvažuje s konfuzorovým přechodovým kusem a s hradící konstrukcí segmentu jako s jedním tělesem. Výtokový součinitel je spočítán pro celé toto těleso.

Konfuzorový (přechodový) kus zajišťuje přechod z kruhového profilu potrubí průměru 109 mm do profilu obdélníkového profilu se zaoblenými rohy o vnitřních rozměrech výšce  $b = 65,4$ , šířce  $a = 130,8$  mm a poloměru zaoblení  $r = 10,9$  mm. Na přechodový kus je uchycená hradící konstrukce segmentu. Poměr průtočné plochy obdélníkového profilu ku kruhovému profilu činí  $p = \frac{ab - 4r^2 + \pi r^2}{\pi \frac{D^2}{4}} = \frac{0,00845}{0,00933} = 0,91 = 91 \%$ . Průtočná plocha obdélníkového profilu při plném otevření segmentu je oproti průtočné ploše kruhového profilu výpusti o 9 % menší.





Obrázek 26 Koncový uzávěr - detail a názvosloví (pro x % otevření)



Obrázek 27 Výtokový otvor - detail + názvosloví (pro x % otevření)

Ztráta místní na koncovém uzávěru  $Z_{uzávěr}$  se vyjádří stejně jako místní ztráta při výtoku otvorem:

$$Z_{uzávěr} = \zeta_{uzávěr} \frac{v_c^2}{2g} \quad (4.1.11)$$

kde	$Z_{uzávěr}$	ztráta místní na uzávěr	[m]
	$\zeta_{uzávěr}$	součinitel místní ztráty	[-]
	$v_c$	rychlost v zúženém paprsku za otvorem	[m/s]
	$g$	gravitační zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]

Součinitel místní ztráty na koncovém uzávěru není znám. Stanoví se buď pomocí Bernoulliho rovnice pro profily Uzávěr – začátek a Uzávěr – otvor nebo se stanoví dle vztahu:

$$\zeta_{uzávěr} = \frac{\varepsilon^2}{\mu^2} - \alpha \quad (4.1.12)$$

kde	$\zeta_{uzávěr}$	součinitel místní ztráty	[-]
	$\mu$	výtokový součinitel pro koncový uzávěr	[-]
	$\alpha$	Coriolisovo číslo	[-]
	$\varepsilon$	součinitel zúžení	[-]

Součinitel zúžení je dán

$$\varepsilon = \frac{S_c}{S_{ot}} \quad (4.1.13)$$

kde	$S_c$	zúžená průtočná plocha výtokového paprsku	[-]
	$S_{ot}$	průtočná plocha výtokového otvoru	[-]
	$\varepsilon$	součinitel zúžení	[-]

#### 4.1.4.5. Ztráty třením

Ztráty třením vznikají vnitřním třením kapaliny a třením kapaliny o stěny potrubí. Ztráty třením se vypočítají z Darcyho-Weisbachovy rovnice: [12, p. 78]

$$\sum Z_t = \lambda \frac{L}{D} \frac{v_{potr}^2}{2g} \quad (4.1.14)$$

kde	$\sum Z_t$	ztráty třením	[m]
	$\lambda$	součinitel ztráty třením	[-]
	$L$	délka potrubí spodní výpusti (mezi profily)	[m]
	$D$	průměr potrubí spodní výpusti	[m]
	$v_{potr}$	rychlost v potrubí výpusti	[m/s]
	$g$	gravitační zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]

Možnost stanovení součinitele ztráty třením ze vzorce se zvolila z důvodu, že není příhodné použít manuální stanovení hodnoty součinitele ztráty třením z grafů, například Moodyho diagramu, pro velké množství naměřených stavů. Vlivem volby materiálu můžeme prohlásit potrubí spodní výpusti za hydraulicky hladké potrubí. Z nabízených vzorců pro hydraulicky hladké potrubí je vybrán vzorec s širší platností rovnice – vzorec dle Altšula. Výběrem vzorce s širší platností je částečně předem zabezpečeno, že bude podmínka splnění rovnice již před samotným výpočtem částečně splněna. Dále je ještě zaveden vzorec závislý na hydraulické drsnosti s širším rozsahem platnosti – vzorec dle Frenkela. Při výpočtu by měla být podmínka platnosti rovnice ověřena.

A) Vzorec dle Altšula pro hydraulicky hladké potrubí [12, p. 82]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,82 * \log \left( \frac{Re}{100} \right) + 2,0 \quad \text{s podmínkou } 10^{12} > Re > 2,5 * 10^3 \quad (4.1.15)$$

kde  $\lambda$  součinitel ztráty třením [-]  
 $Re$  Reynoldsovo číslo [-]

B) Vzorec dle Frenkela [15, p. 20]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 * \log \left[ \left( \frac{6,81}{Re} \right)^{0,9} + \left( \frac{\Delta}{3,7 * D} \right)^1 \right] \quad \text{s podmínkou } Re > 4 * 10^3 \quad (4.1.16)$$

kde  $\lambda$  součinitel ztráty třením [-]  
 $D$  průměr spodní výpusti [m]  
 $Re$  Reynoldsovo číslo [-]  
 $\Delta$  hydraulická drsnost potrubí [m]  
 pro hydraulicky hladké potrubí platí  $\Delta = 0$

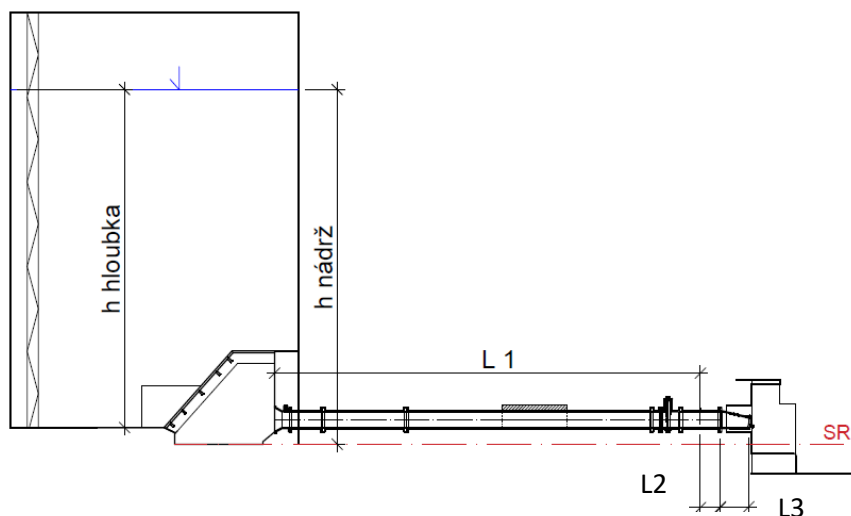
Reynoldsovo číslo definuje vztah:

$$Re = \frac{vD}{\nu_{potr}} \quad (4.1.17)$$

kde  $\nu$  kinematická viskozita (závislá na teplotě vody) [m<sup>2</sup>/s]  
 $D$  průměr potrubí spodní výpusti [m]  
 $\nu_{potr}$  rychlost v potrubí výpusti [m/s]

Reynoldsovo číslo popisuje režim proudění v potrubí, zda je laminární nebo turbulentní proudění, dle podmínky: [12, p. 78]

$Re$  laminární < 2320 <  $Re$  přechodná oblast < 4000 <  $Re$  turbulentní



Obrázek 28 Fyzikální model - názvosloví- horní šachta + délka potrubí

## 4.2. Kontrola kóty tlakové čáry v profilu Tlak D

Pakliže se použije kalibrační rovnice pro přepočítání naměřeného relativního tlaku v profilu Tlak D na kótu tlakové čáry nad srovnávací rovinou v profilu Tlak D, zjednoduší se odvození vztahu pro kontrolu kóty tlakové čáry. Rovnice se odvodí kombinací Bernoulliho rovnice (rovnice 4.1.3) a rovnice pro celkové ztráty mechanické energie (rovnice 4.1.4). Vstupním profilem je profil Horní nádrž před česlemi a výstupním profilem je profil Tlak D.

Ztráty třením jsou v tomto případě definovány:

$$\sum Z_t = \lambda \frac{L_1 v_{potr}^2}{D 2g} \quad (4.2.1)$$

kde	$\sum Z_t$	ztráty třením	[m]
	$\lambda$	součinitel ztráty třením	[-]
	$L_1$	délka potrubí spodní výpusti od vtoku k profilu Tlak D	[m]
	$D$	průměr potrubí spodní výpusti	[m]
	$v_{potr}$	rychlost v potrubí základové výpusti	[m/s]
	$g$	gravitační zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]

Ztráty místní se v tomto případě skládají ze ztrát místní na česlích, na nátokovém kuse a šoupěti. Ztráty místní jsou definovány jako:

$$\sum Z_m = Z_{česle} + Z_{nátok} + Z_{šoupě} \quad (4.2.2)$$

Pak odvozený vztah (rovnice) pro kótu tlakové čáry v profilu Tlak D zní:

$$h_d = h_{potr} + \frac{p_2}{\rho g} = h_{nádrž} + \frac{\alpha v_{nádrž}^2}{2g} - \frac{\alpha v_{potr}^2}{2g} - \sum Z_t - \sum Z_m \quad (4.2.3)$$

kde	$h_{nádrž}$	hladina vody v horní nádrži před česlemi nad srovnávací rovinou	[m]
	$h_d$	výška tlakové čáry v profilu Tlak D	[m]
	$v_{nádrž}$	rychlost v horní nádrži před česlemi	[m/s]
	$v_{potr}$	rychlost v potrubí výpusti	[m/s]
	$\sum Z_t$	ztráty třením od vtoku do profilu Tlak D	[m]
	$Z_{česle}$	ztráta místní na česlích	[m]
	$Z_{nátok}$	ztráta místní na nátokovém kuse	[m]
	$Z_{šoupě}$	ztráta místní šoupětem	[m]
	$Q$	průtok	[m <sup>3</sup> /s]
	$h_{potr}$	výška osy potrubí nad srovnávací rovinou	[m]
	$\frac{p_2}{\rho g}$	přetlak v profilu Tlak D	[m <sup>3</sup> /s]

### 4.3. Stanovení energetické výšky v profilu Uzávěr – začátek

Pro vyhodnocení výtokového součinitele koncového uzávěru s konfuzorem je třeba vyčíslit energetickou výšku v profilu začátku konfuzoru. Můžeme ji získat z Bernoulliho rovnice (4.1.3) pro vstupní profil Tlak D a výstupní profil Uzávěr – začátek.

$$h_E = \frac{\alpha v_{potr}^2}{2g} + h_d - \sum Z_t \quad (4.3.1)$$

kde	$h_E$	energetická výška v profilu Uzávěr - začátek	[m]
	$h_d$	polohová výška a tlaková výška v profilu Tlak D neboli výška tlakové čáry v profilu Tlak D	[m]
	$v_{potr}$	rychlost v potrubí výpusti	[m/s]
	$\sum Z_t$	ztráty třením mezi profily Tlak D a Uzávěr - začátek	[m]

Ztráty třením jsou definovány:

$$\sum Z_t = \lambda \frac{L_2}{D} \frac{v_{potr}^2}{2g} \quad (4.3.2)$$

kde	$\sum Z_t$	ztráty třením mezi profily Tlak D a Uzávěr - začátek	[m]
	$\lambda$	součinitel ztráty třením	[-]
	$L_2$	délka potrubí spodní výpusti od profilu Tlak D k začátku konfuzoru	[m]
	$D$	průměr potrubí spodní výpusti	[m]
	$v_{potr}$	rychlost v potrubí základové výpusti	[m/s]
	$g$	gravitační zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]

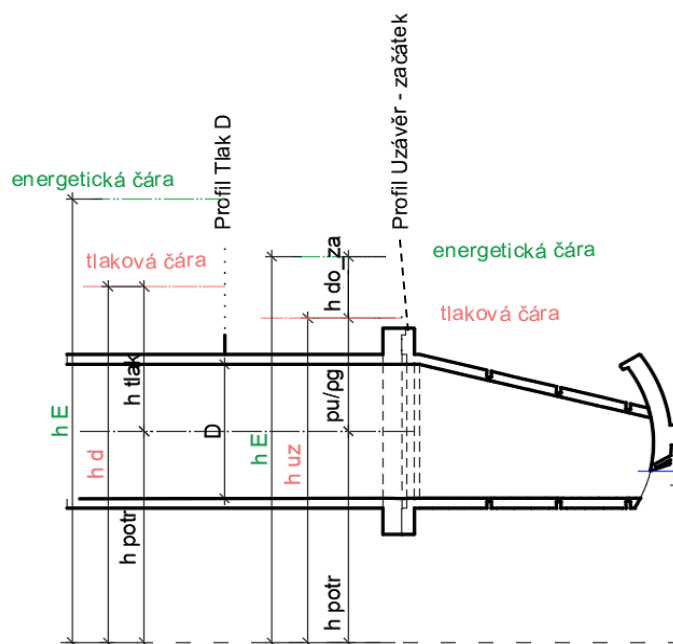
Budeme-li chtít blíže rozepsat členy energetické výšky, pak je třeba využít jak dané rovnice (4.3.1.), tak i znalostí o profilu Uzávěr – začátek. Energetická výška  $h_E$  v profilu Uzávěr – začátek se skládá z polohové výšky, tlakové výšky a rychlostní výšky. Polohová výška je vzdálenost těžiště průtočné plochy profilu od srovnávací roviny, zde je to výška osy potrubí nad srovnávací rovinou  $h_{potr}$ . Rychlost na začátku konfuzoru je shodná jako v potrubí spodní výpusti, poněvadž jsou průtočné plochy v příslušných profilech totožné. Rychlostní výška je  $h_{do\_za} = \frac{\alpha v_{potr}^2}{2g}$ .

Tlaková výška na začátku konfuzoru  $\frac{p_{uz}}{\rho g}$  se získá odečtením rychlostní výšky a polohové výšky od energetické výšky.

$$\frac{p_{uz}}{\rho g} = h_E - h_{potr} - \frac{\alpha v_{potr}^2}{2g} = \left( \frac{\alpha v_{potr}^2}{2g} + h_d - \sum Z_t \right) - h_{potr} - \frac{\alpha v_{potr}^2}{2g}$$

$$\frac{p_{uz}}{\rho g} = h_d - h_{potr} - \sum Z_t \quad (4.3.3)$$

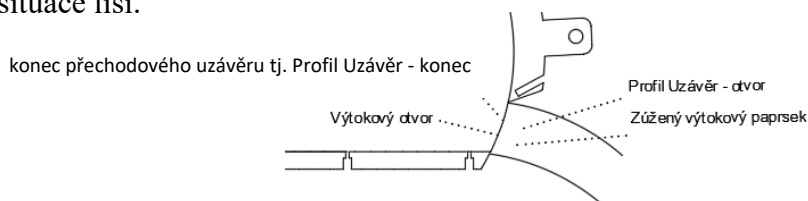
kde	$\frac{p_{uz}}{\rho g}$	tlaková výška v profilu Uzávěr začátek	[m <sup>3</sup> /s]
	$h_d$	výška tlakové čáry v profilu Tlak D	[m]
	$h_{potr}$	výška osy potrubí nad srovnávací rovinou	[m]
	$v_{potr}$	rychlost v potrubí výpusti	[m/s]
	$\sum Z_t$	ztráty třením od profilu Tlak D k začátku konfuzoru [m]	
	$g$	gravitační zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]



Obrázek 29 Profily

#### 4.4. Odvozený vztah pro výtokový součinitel

Vlivem hladiny dolní vody může dojít na fyzikálním modelu ke třem situacím výtoku – k nezatopenému (dokonalému) výtoku, částečně zatopenému výtoku a zcela zatopenému (nedokonalému) výtoku. Odvozený vztah pro výtokový součinitel se pro tyto situace liší.



Obrázek 30 Detail výtokového paprsku



kde	$Z_{uzávěr}$	ztráta místní na koncovém uzávěru	[m]
	$\zeta_{uzávěr}$	součinitel místní ztráty	[-]
	$v_c$	rychlost v zúženém paprsku za otvorem	[m/s]
	$g$	gravitační zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]

Rychlost v zúženém výtokovém paprsku za výtokovým otvorem zní:

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta_{uzávěr}}} * \sqrt{2g} * \sqrt{h_E - h_c} \quad (4.4.2)$$

Vynásobením rychlosti v zúženém výtokového paprsku za výtokovým otvorem průtočnou plochou zúženého výtokového paprsku se získá průtok v místě zúženého výtopového paprsku v profilu Uzávěr – otvor. Zmenšení průtočné plochy výtokového otvoru  $S_{ot}$  (v profilu Uzávěr – konec) na průtočnou plochu v zúženém výtokového paprsku za výtokovým otvorem  $S_c$  (v profilu Uzávěr – otvor) zohledňuje součinitel zúžení  $\varepsilon$ , který se definuje jako  $\varepsilon = \frac{S_c}{S_{ot}}$ . Pak průtok je:

$$Q = S_c * v_c = S_{ot} * \varepsilon * v_c = S_{ot} * \varepsilon * \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta_{uzávěr}}} * \sqrt{2g} * \sqrt{h_E - h_c} \quad (4.4.3)$$

Při zavedení rychlostního součinitele  $\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta_{uzávěr}}}$  a při zavedení výtokového součinitele  $\mu = \varphi * \varepsilon$  se dostane odvozený vztah pro výpočet výtokového součinitele:

$$\mu = \frac{Q}{S_{ot}} * \frac{1}{\sqrt{2g * \sqrt{h_E - h_c}}} \quad (4.4.4)$$

kde	$h_c = h_{ot}$	výška k těžišti v zúženém výtokového paprsku nad srovnávací rovinou, zde se předpokládá, že bude cca rovna výšce výtokového otvoru	[m]
	$h_E$	energetická výška v profilu Uzávěr – začátek	
		dána vztahem (4.3.1) $h_E = \frac{\alpha v_{potr}^2}{2g} + h_d - \sum Z_t$	[m]
	$Q$	průtok	[m <sup>3</sup> /s]
	$S_{ot}$	průtočná plocha výtokového otvoru (v profilu Uzávěr – konec)	[m <sup>2</sup> ]
	$\mu$	výtokový součinitel	[-]

#### 4.4.2. Zatopený výtok

Zatopený výtok (zatopený výtok otvorem) nastává tehdy, pokud se hladina dolní vody ve vývaru nachází dostatečně vysoko nad horní hranou výtokového otvoru. V případě přiblížení hladiny k horní hraně výtokového otvoru dochází ke změně chování výtokového paprsku. Je potřeba tento jev uplatnit při odvození nebo případně stav vyřadit při vyhodnocování výsledků.



V případě zatopeného výtoku se při odvození vztahu pro stanovení výtokového součinitele vychází ze stejné Bernoulliho rovnice jako u nezatopeného výtoku s jedinou změnou. Relativní tlak v profilu zúženého paprsku není nulový, je dán výškou hladiny vody  $h_{dv}$  za profilem výtoku.

$$\mu = \frac{Q}{S_{ot}} * \frac{1}{\sqrt{2g * \sqrt{h_E - h_{dv}}}} \quad (4.4.5)$$

kde	$h_{dv}$	výška hladiny dolní vody za profilem výtoku k srovnávací rovině	[m]
	$h_E$	energetická výška v profilu Uzávěr – začátek dána vztahem (4.3.1): $h_E = \frac{\alpha v_{potr}^2}{2g} + h_d - \sum Z_t$	[m]
	Q	průtok	[m <sup>3</sup> /s]
	$S_{ot}$	průtočná plocha výtokového otvoru (v profilu Uzávěr – konec)	[m <sup>2</sup> ]
	$\mu$	výtokový součinitel	[-]

#### 4.4.3. Částečně zatopený výtok

Bude-li hladina dolní vody mezi horní a dolní hranou výtokového otvoru, dojde k částečnému zatopení výtokového otvoru dolní vodou. Nyní dochází ke kombinaci obou dříve definovaných situací - jedna část profilu je zatopená vodou a druhá část není zatopená vodou. Pro obě části platí zcela odlišné podmínky a musí se k nim přistupovat odděleně.

Celkový průtok Q se rozdělí na dvě části na průtok v zatopené části  $Q_1$  a na průtok v nezatopené části  $Q_2$ . Pro profil Uzávěr – otvor bude platit následující rovnice:

$$Q = Q_1 + Q_2 = S_1 * v_1 + S_2 * v_2 = \varepsilon * S_{11} * v_1 + \varepsilon * S_{22} * v_2 \quad (4.4.6)$$

kde	Q	průtok	[m <sup>3</sup> /s]
	$Q_1$	průtok v zatopené části výtokového otvoru	[m <sup>3</sup> /s]
	$Q_2$	průtok v nezatopené části výtokového otvoru	[m <sup>3</sup> /s]
	$S_{11}$	průtočná plocha zatopené části výtokového otvoru	[m <sup>2</sup> ]
	$S_1$	průtočná plocha zatopené části zúženého výtokového paprsku $S_1 = \varepsilon * S_{11}$	[m <sup>2</sup> ]
	$S_{22}$	průtočná plocha nezatopené části výtokového otvoru	[m <sup>2</sup> ]
	$S_2$	průtočná plocha nezatopené části zúženého výtokového paprsku $S_2 = \varepsilon * S_{22}$	[m <sup>2</sup> ]
	$v_1$	rychlost zatopené části zúženého výtokového paprsku	[m/s]
	$v_2$	rychlost nezatopené části zúženého výtokového paprsku	[m/s]
	$\varepsilon$	součinitel zúžení, uvažuje se stejnou hodnotou	[-]

Rychlost zatopené části zúženého výtokového paprsku je daná podobným vztahem jako v situaci nezatopeného výtoku (rovnice 4.4.2). Relativní tlak v profilu zúženého paprsku není nulový, je dán výškou hladiny vody  $h_{dv}$  za profilem výtoku. Výtok zatopené části výtokového otvoru se chová obdobně jako zatopený výtok otvorem.

$$v_1 = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta_{uzávěr}}} * \sqrt{2g} * \sqrt{h_E - h_{dv}} \quad (4.4.7)$$

Rychlost nezatopené části zúženého výtokového paprsku je daná podobným vztahem, liší se pouze polohovou výškou v profilu Uzávěr – otvor a nulovou tlakovou výškou:

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta_{uzávěr}}} * \sqrt{2g} * \sqrt{h_E - h_{22}} \quad (4.4.8)$$

Po dosazení rovnice 4.4.7 a 4.4.8 do 4.4.6 vyjde průtok:

$$Q = \varepsilon * S_{11} * \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta_{uzávěr}}} * \sqrt{2g} * \sqrt{h_E - h_{dv}} + \varepsilon * S_{22} * \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta_{uzávěr}}} * \sqrt{2g} * \sqrt{h_E - h_{22}} \quad (4.4.9)$$

Při zavedení rychlostního součinitele  $\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta_{uzávěr}}}$ , při zavedení stejné hodnoty pro součinitel místní ztráty  $\zeta_{uzávěr}$  a při zavedení výtokového součinitele  $\mu = \varphi * \varepsilon$  se odvodí dovozený vztah pro výpočet výtokového součinitele:

$$\mu = \frac{Q}{S_{11} * \sqrt{2g} * \sqrt{h_E - h_{dv}} + S_{22} * \sqrt{2g} * \sqrt{h_E - h_{22}}} \quad (4.4.10)$$

kde	Q	průtok	[m <sup>3</sup> /s]
	$h_{dv}$	výška hladiny dolní vody za profilem výtoku k srovnávací rovině	[m]
	$h_E$	energetická výška v profilu Uzávěr – začátek	
		dána vztahem (4.3.1) $h_E = \frac{\alpha v_{potr}^2}{2g} + h_d - \sum Z_t$	[m]
	$\mu$	výtokový součinitel	[-]
	$S_{11}$	průtočná plocha zatopené části výtokového otvoru	[m <sup>2</sup> ]
	$S_{22}$	průtočná plocha nezatopené části výtokového otvoru	[m <sup>2</sup> ]
	$h_{22}$	výška těžiště nezatopené části výtokového otvoru	[m]

## 4.5. Vstupní fyzikální veličiny

Do odvozených vztahů vstupují neznámé fyzikální veličiny, které jsou níže blíže popsány. Jednotlivé fyzikální veličiny mohou být zatíženy chybou, ať už v důsledku lidského faktoru, přesností měření měřicími přístroji, rozkolísaností veličin (například kolísání hladiny vody), volbou způsobu měření, geometrickou anomálií a mnoha dalšími chybami.

### A) Délka potrubí $L$ [m]

Délka potrubí  $L$  vychází ze stavebních parametrů potrubí spodní výpusti. Hodnota je určena jako délka potrubí mezi vstupním a výstupním profilem bez délky armatur ve vymezeném úseku (nátokový kus, šoupě, koncový uzávěr). Délka potrubí od vtoku do profilu Tlak D je  $L_1 = 2830$  mm. Délka od profilu Tlak D k profilu Uzávěr – začátek (pozn. profil se nachází až za přípojem koncového uzávěru) je  $L_2 = 150$  mm. Délka přechodového kusu je  $L_3 = 188,9$  mm.

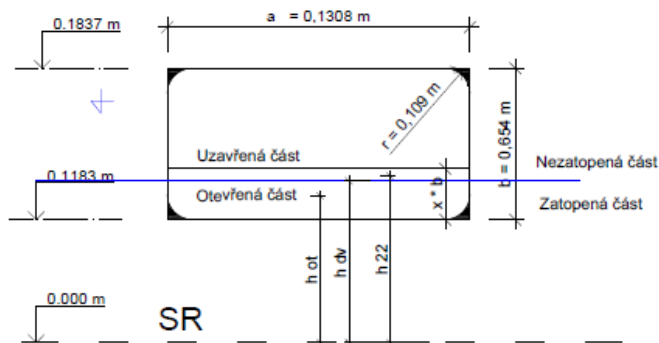
### B) Průměr potrubí spodní výpusti $D$ – vnitřní průměr potrubí je vždy $D = 0,109$

### C) Průtočná plocha $S_{potr}$ , $S_{ot}$ , $S_{11}$ , $S_{22}$ , $S_{nádrž}$ [m<sup>2</sup>]

Průtočná plocha je plocha, která vznikne řezem vedeným kolmo ke proudnici. Stanoví se dle geometrií průřezu v místě řezu a hloubky vody v místě řezu. Chyba průtočné plochy se přímo neurčuje, protože se odvíjí na základě volby profilu a pro něj definované veličiny.

### D) Výška těžiště nezatopené části výtokového otvoru $h_{22}$ [m]

Těžiště nezatopené části výtokového otvoru nad srovnávací rovinou  $h_{22}$  se vztahuje k těžišti nezatopené části výtokové plochy a určí se dle geometrie a hladiny dolní vody.



Obrázek 33 Výtokový otvor – detail a názvosloví

### E) Průtok $Q$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

Ze zavedeného předpokladu ustáleného proudění vyplývá vytvoření konstantního průtoku, tj. průtok nabývá stejné hodnoty po celé délce fyzikálního modelu. Průtok je měřen dvěma způsoby – průtokoměrem a Thomsonovým měrným přelivem.

Průtok naměřený průtokoměrem se stanoví zpětně ze záznamu jako průměrná hodnota průtoku za časový interval experimentu. Zároveň se ručně odečítá průtok z displaye průtokoměru pro případnou kontrolu záznamové hodnoty. Průtokoměr je osazen na neprůhledném potrubí spodní výpusti, protože se předpokládá, že by zde nemělo dojít k ovlivnění rychlostního pole. Výrobce uvádí chybu ultrazvukového průtokoměru  $\pm 1\%$  pro  $D > 50$  mm et  $v > 0,5$  m/s.

Průtok na Thomsonově měrném přelivu se stanoví z Thomsonovy rovnice pro pravoúhlý trojúhelníkový přeliv dle následující rovnice s podmínkou  $B/h > 8$  a  $s/h > 3$ , kde  $B$  je šířka modrého tělesa a  $b$  je šířka Thomsonova přelivu [11, p. 240] :

$$Q = 1,4 * h^{2,5}$$

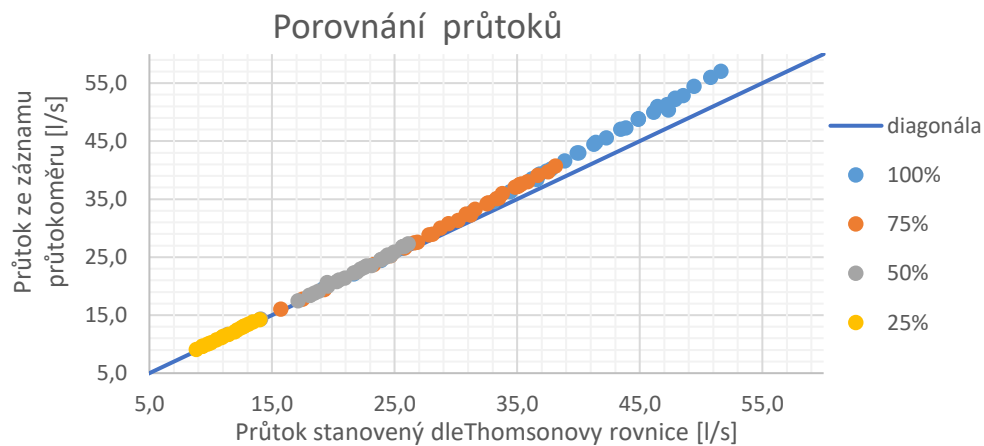
kde  $h$  přepadová výška [m]  
 $Q$  průtok stanovený dle Thomsonovy rovnice [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

Po dosažení šířky měrného přelivu  $B = 0,6$  m a výšky měrného přelivu v horní vodě  $s = 0,25$  m do podmínek Thomsonovy rovnice se vyjádří doporučené hranice pro přepadovou výšku  $h < B/8 = 0,075$  m a  $h < s/3 = 0,083$  m. Z toho plyne, že pro přepadové výšky větší než  $0,075$  m není Thomsonův měrný přeliv věrohodný. Poněvadž naměřená přepadová výška při experimentech nabývala hodnot nad  $0,1$  m, přistoupilo se k použití průtoku ze záznamu průtokoměru. Tabulka 7 níže shrnuje splnění podmínek Thomsonovy rovnice pro vybrané přepadové výšky a obsahuje vypočtené průtoky dle Thomsonovy rovnice. Do odvozených vztahů se dosazuje průtok ze záznamu průtokoměru s předpokládanou chybou  $\Delta Q = \pm 1\% = \pm 0,01 Q$ .

Ověření platnosti rovnice							
Přepadová výška	$h$	[m]	0	0.05	0.075	0.1	0.2
Průtok z rovnice	$Q$	[ $\text{l/s}$ ]	0	0.78	2.15	4.42	25.04
splnění podmínky	$h < B/8 = 0.075$ m		Ano	Ano	Mez	Ne	Ne
splnění podmínky	$h < s/3 = 0.083$ m		Ano	Ano	Ano	Ne	Ne

Tabulka 7 Ověření platnosti rovnice

Pro představu rozdílnosti průtoku je doplněn graf 1 s naměřenými průtoky ze záznamu průtokoměru a s průtoky stanovenými dle Thomsonovy rovnice ze změřených přepadových výšek. Pokud by průtok ze záznamu průtokoměru a průtok z Thomsonovy rovnice nabýval stejné hodnoty, ležel by na diagonále. Ale vykreslené body se od diagonály stáčejí směrem doleva. Průtoky stanovené dle Thomsonovy rovnice jsou menší než průtoky ze záznamu průtokoměru, rozdíl se zvětšuje s velikostí průtoku.



graf 1 Porovnání průtoků

#### F) Kóta tlakové čáry $h_d$ v profilu Tlak D

Ze změřených tlaků pomocí tlakoměrnou sondou v profilu Tlak D se pomocí kalibrační rovnice získá kóta tlakové čáry  $h_d$  nad srovnávací rovinou v daném profilu.

$$y = ax + b \Rightarrow h_d = a * p_d + b$$

kde	$p_d$	tlak naměřený na tlakoměrné sondě	[mbar]
	$h_d$	výška tlakové čáry v profilu Tlak D	[m]
	a, b	kalibrační konstanty	

Chyba tlakoměrné sondy uváděné výrobcem je 0,2 % z rozsahu, pak číselně chyba činí  $\pm 0,8$  mbar. Potom chyba výšky tlakové čáry  $\Delta h_d$  je daná vztahem:  $\Delta h_d [m] = (a * p_d + b) - ((a * (p_d \pm 0,8) + b) = a * p_d + b - a * (p_d \pm 0,8) - b = \pm 0,8 * a$ .

#### G) Hladina vody v horní nádrži před česlema nad srovnávací rovinou $h_{nádrž}$ [m]

Hladina vody v horní nádrži  $h_{nádrž}$  se měří dvěma způsoby – na číselné stupnici  $h_{šachta}$  a tlakoměrnou sondou  $h_{pšachta}$ . Hladina vody v horní nádrži  $h_{nádrž}$  je vzdálenost hladiny vody v horní nádrži k srovnávací rovině a určí se jako průměrná hodnota těchto naměřených hodnot.

$$h_{nádrž} = \frac{h_{šachta} + h_{pšachta}}{2}$$

Ručním odečtem hodnoty na číselné stupnici  $h_{sachta}$  se rovnou určí hladina vody v horní nádrži ke srovnávací rovině. Hodnota je zatížena chybou  $\pm 5$  mm, která je způsobena vlivem kolísání hladiny, osobním odhadem jedince, způsobem měření a dalšími vlivy. Obdobně jako v bodě F) se z tlaků změřenými tlakoměrnou sondou pro horní nádrž pomocí kalibrační rovnice získá hladina vody  $h_{pšachta}$ . Chyba tlakoměrné sondy je odvozená v bodě F) a nabývá hodnoty  $\pm 0,8 * a$ .

Celková chyba hladiny vody v horní nádrži  $h_{nádrž}$  se určí jako:

$$\Delta h_{nádrž} = \pm \frac{0,8*a+0,005}{2} \quad [m]$$

#### H) Hloubka vody před česlemi $h_{hloubka}$ [m]

Hloubka vody před česlemi  $h_{hloubka}$  se stanoví z hladiny vody v horní nádrži  $h_{nádrž}$  a z výšky dna horní nádrže před česlemi nad srovnávací rovinou dle vztahu:

$$h_{hloubka} = h_{nádrž} + 0,118 \quad [m]$$

Hloubka vody je zatížena chybou cca  $\Delta h_{hloubka} = \Delta h_{nádrž} = \pm \frac{0,8*a+0,005}{2}$ . Chyba hloubky vody se uvažuje při výpočtu průtočné plochy v profilu Horní nádrže před česlemi. Vlivem minimálních hodnot rychlostní výšky v daném profilu se chyba hloubky vody pro rychlostní výšku neuvažuje.

#### I) Výška hladiny vody za profilem výtoku k srovnávací rovině $h_{dv}$ [m]

Výška hladiny vody za profilem výtoku k srovnávací rovině  $h_{dv}$  v profilu Uzávěr - otvor se získá odečtením výšky dna vývaru ke srovnávací rovině od dodatečně stanovené hloubky vody ve vývaru  $h_{dno}$  v blízkosti uzávěru (pozn. hloubka je ode dna). Hloubka vody u koncového uzávěru byla stanovena dodatečně, protože pro původní účely výzkumu nebyla potřebná znalost hladiny v tomto místě. Chyba výšky hladiny se odhaduje na  $\pm 10$  mm.

$$h_{dv} = h_{dno} - 0,201 \quad [m]$$

Hloubka  $h_{dno}$  se určí za pomoci stavebních výkresů a foto a video dokumentace. Princip určení hloubky vody je takový, že se porovná naměřená délka na fotografii se skutečnou délkou. Případně se takto získaná hloubka upraví dle potřeby (například vlivem snížení u výtoku, vytvoření vírů,...). Pro získání měřítka je lepší zvolit delší hranu než kratší, například svislou hranu pilíře než svislou hranu horizontální desky, z důvodu, že se zmenšuje pravděpodobná odchylka stanovené hloubky od skutečné hloubky.

Například na fotografii níže oranžová čára představuje vzdálenost hladiny od horní hrany (žlutá čára). Modrá čára představuje vzdálenost přechodu pilíře k horní hraně (žlutá čára). Porovná-li se délka modré čáry se skutečnou hodnotou této vzdálenosti, získáme měřítko, dle kterého pak můžeme určit délku oranžové čáry. Výsledná hodnota se poté odečte od výšky horní hrany (žlutá čára) nad dnem vývaru a získá se požadovaná hloubka vody v daném místě.



Obrázek 34 Příklad

#### J) Výška osy potrubí a otvoru

Výška osy potrubí nad srovnávací rovinou vychází ze stavebních podkladů fyzikálního modelu a její hodnota je  $h_{potr} = 0,172 \text{ m}$ . Výška osy otvoru nad srovnávací rovinou se mění v závislosti na otevření segmentového uzávěru a vychází ze stavebních podkladů fyzikálního modelu. Výška osy otvoru prochází těžištěm výtakového otvoru. Pro 100 % otevření je vzorec uveden. Pro ostatní procenta otevření je spíše výhodnější použít k určení těžiště výtakového otvoru software. Určí se vzdálenost těžiště od dolní hrany výtakového otvoru a připočte se výška dolní hrany od srovnávací rovinou 0,1183 m.

- pro 100 % otevření:  $h_{ot} = \left(0,151 - \frac{b}{2}\right) + \frac{x*b}{2}$  [m]
  - pro jiná otevření:  $h_{ot} = h + 0,1183$  [m]
- |     |   |   |     |
|-----|---|---|-----|
| kde | x | procento otevření segmentu  | [-] |
|     | b | výška výtakového otvoru   | [m] |
|     | h | vzdálenost těžiště výtakového otvoru od dolní hrany výtakového otvoru | [m] |

K) Gravitační zrychlení  $g$  [ $m/s^2$ ]

Gravitační zrychlení je konstantní vstupní proměnná s hodnotou pro Českou republiku  $g = 9,81373 m/s^2$ .

L) Coriolisovo číslo  $\alpha$  [-] zavedeno hodnotou  $\alpha = 1,0$

M) součinitel zúžení  $\varepsilon$  [-]: Součinitel zúžení není znám.

N) Kinematická viskozita  $\nu$  [ $m^2/s$ ] a hustota vody  $\rho$  [ $kg/m^3$ ] :

Obě fyzikální veličiny závisí na teplotě vody. Bohužel během experimentů nebyla teplota vody měřena. Teplota vody v zásobních prostorách rozvodné sítě se naměřila v zimních měsících. Lze očekávat, že teplota vody bude vyšší v letních měsících a že se voda vlivem koloběhu v systému zahřeje. Pro kontrolu byla tato chyba zanesena do výpočtu a okomentována v kapitole *Vyhodnocení*.

teplota	vizkozita	hustota
T	$\nu * 10^6$	$\rho$
°C	$m^2 * s^{-1}$	$kg * m^{-3}$
12	1,2396	999,50
14	1,1756	999,24
16	1,1166	998,94
18	1,0616	998,59

Tabulka 8 Vizkozita a teplota vody [16]



## 5. Vyhodnocení

V páté kapitole *Vyhodnocení* se hodnotí zpracování souboru dat a interpretují se získané výsledky. Na začátku kapitoly je uvedena poznámka ke zpracování sadě stavů. Dále se v kapitole uvádí způsob kontroly kóty tlakové čáry v profilu Tlak D, interpretují se výsledky výtokového součinitele a vede se diskuse související s citlivostí vstupních dat. Ke konci kapitoly je zavedena tematika zabývající se změřenými tlaky po obvodě příčných profilů Tlak A, Tlak B a Tlak C. Kapitola končí tématem souvisejícím s postřehy chování výtokového paprsku během experimentu.

### 5.1. Zpracování souboru dat

Před měřením na fyzikálním modelu byla vybrána konkrétní procenta otevření segmentového uzávěru. Pro ně byla sestavena sada stavů, která se nastavila a proměřila na fyzikálním modelu. Sestavením sady stavů se myslí, že se pro vybraná procenta otevření segmentového uzávěru zkombinovaly okrajové podmínky hloubka vody v horní nádrži a hloubka vody ve vývaru. Ke zpracování souboru naměřených dat byl vybrán tabulkový procesor Microsoft Excel.

Podle hladiny vody ve vývaru se rozlišují na fyzikálním modelu tři situace výtoku – nezatopený (dokonalý) výtok, částečně zatopený výtok a zatopený (nedokonalý) výtok. Sada naměřených stavů pokrývá především situaci zatopeného výtoku. I přestože situace částečně zatopený výtok je zastoupená menším množstvím stavů, je tento počet adekvátní pro bakalářskou práci, protože výsledky částečně zatopeného výtoku se zdají být důvěryhodné po porovnání s výsledky zatopeného výtoku. Naopak situace nezatopeného výtoku není u některých procent otevření uzávěru vůbec zastoupena. Výsledky pro tuto situaci jsou interpretovány pouze porovnáním s ostatními situacemi pro dané procento otevření segmentového uzávěru. Je vhodné případně doměřit pro úplnost jiné stavy na fyzikálním modelu. Množství jednotlivých stavů pro vybraná procenta otevření shrnuje tabulka 9 níže.

Procento otevření segmentového uzávěru znamená procento výšky otevření koncového profilu. Například otevření segmentového uzávěru 25 % znamená 25 % výšky otevření koncového profilu. Výška koncového profilu je  $b = 64,5$  mm, pak  $x = 0,25$  a výška otevření koncového profilu je  $x * b = 0,25 * 64,5 = 16,35$  mm.

Rozdělení stavů				
Procento otevření x %	Nezatopený výtok	Částečně zatopený výtok	Zatopený výtok	Celkem
100	2	7	23	32
87.5	0	1	2	3
75	0	2	29	31
62.8	0	1	2	3
50	0	7	21	28
38.5	0	1	2	3
25	4	2	11	17
12.5	1	0	0	1

Tabulka 9 Shrnutí počtu změřených stavů

Celkem jsou vybrána čtyři hlavní procenta otevření segmentového uzávěru – 25 %, 50 %, 75 % a 100 %. Další čtyři procenta otevření segmentového uzávěru 12,5 %, 38,5 %, 62,8 % a 82,5 % jsou uvažovány jako pomocná otevření, jelikož jsou naměřena na fyzikální modelu dodatečně a obsahují menší množství změřených stavů. Pro ověření výsledků pomocných procent otevření je lepší případně provést další měření. Následující tabulka popisuje vybrané charakteristiky pro vybraná procenta otevření.

Charakteristika vybraných procent otevření segmentového uzávěru						
Procento otevření x %	Průtočná plocha výtokového otvoru	Obvod výtokového otvoru	Těžiště výtokového otvoru k srovnávací rovině	Výška výtokového otvoru	Výška dolní hrany výtokového otvoru k srovnávací rovině	Výška horní hrany výtokového otvoru k srovnávací rovině
%	m <sup>2</sup>	m	m	m	m	m
100	0.00845	0.374	0.1511	0.0654	0.1183	0.1837
87.5	0.00743	0.365	0.1470	0.0572	0.1183	0.1755
75	0.00636	0.350	0.1430	0.0491	0.1183	0.1674
62.8	0.00532	0.334	0.1389	0.0411	0.1183	0.1594
50	0.00423	0.318	0.1348	0.0327	0.1183	0.151
38.5	0.00322	0.303	0.1309	0.0252	0.1183	0.1435
25	0.00209	0.257	0.1266	0.0164	0.1183	0.1347
12.5	0.00102	0.246	0.1225	0.0082	0.1183	0.1265

Tabulka 10 Charakteristika procent otevření segmentového uzávěru

Bližší popis sady stavů je patrný z tabulkové části v Příloze 15, kde jsou vybrané naměřené a vypočtené údaje. V záhlaví tabulky (zcela nahoře) je definováno procento otevření segmentového uzávěru, název hloubky vody v horní nádrži a název hloubky vody ve vývaru. Název hloubky vody v horní nádrži může být zavádějící, protože se ponechalo původní číselné označení hladin vody z podkladů pro původní výzkum

na fyzikálním modelu v instituci VÚV TGM, v.v.i. Tato čísla vyjadřují hladinu vody ve vodní nádrži Vranov v m. n. m.. Pro naše účely platí, že název hloubky vody odpovídá možnému rozmezí hloubek na fyzikálním modelu takto:

Název hloubky vody horní nádrže	Příslušné rozmezí hloubek vody v horní nádrži (m)
N_318	0,920 – 0,940
N_331	1,780 – 1,850
N_337	2,180 – 2,210
N_342	2,500 – 2,650
N_348	2,960 – 2,980
N_355	3,380 – 3,450
V1, V2, H1,H2	různé hladiny

Tabulka 11 Název hloubky vody v horní nádrži

Název hloubky vody ve vývaru má pouze informativní význam, označuje skupinu hloubek vody ve vývaru s podobnou hodnotou. Skupina hloubek vody ve vývaru se shodným názvem se liší pro jednotlivá procenta otevření segmentového uzávěru. Například pro 100 % otevření segmentového uzávěru je pro skupinu s názvem P\_1 výška hladiny vody za profilem výtoku nad srovnávací rovinou cca 0,169 m, ale pro 25 % otevření je výška hladiny vody za profilem výtoku nad srovnávací rovinou 0,116 m. Zároveň platí, že v rámci jedné skupiny jsou stavy s různou hladinou vody v horní nádrži. Například pro 100 % otevření pro skupinu P\_1 je pět stavů s různou hloubkou vody v horní nádrži – N\_318, N\_331, N\_342, N\_348 a N\_355.

Pro představu je sada stavů vyobrazena ve vytvořeném grafu 2 *Závislost průtoku na spádu* (spád hladiny vody v horní nádrži  $h_{nádrž}$  a hladiny vody za profilem výtoku  $h_{dv}$ ). Rozsah spádu a průtoku pro jednotlivá procenta otevření segmentu je patrný z přiloženého grafu.



## 5.2. Kontrola kóty tlakové čáry v profilu Tlak D

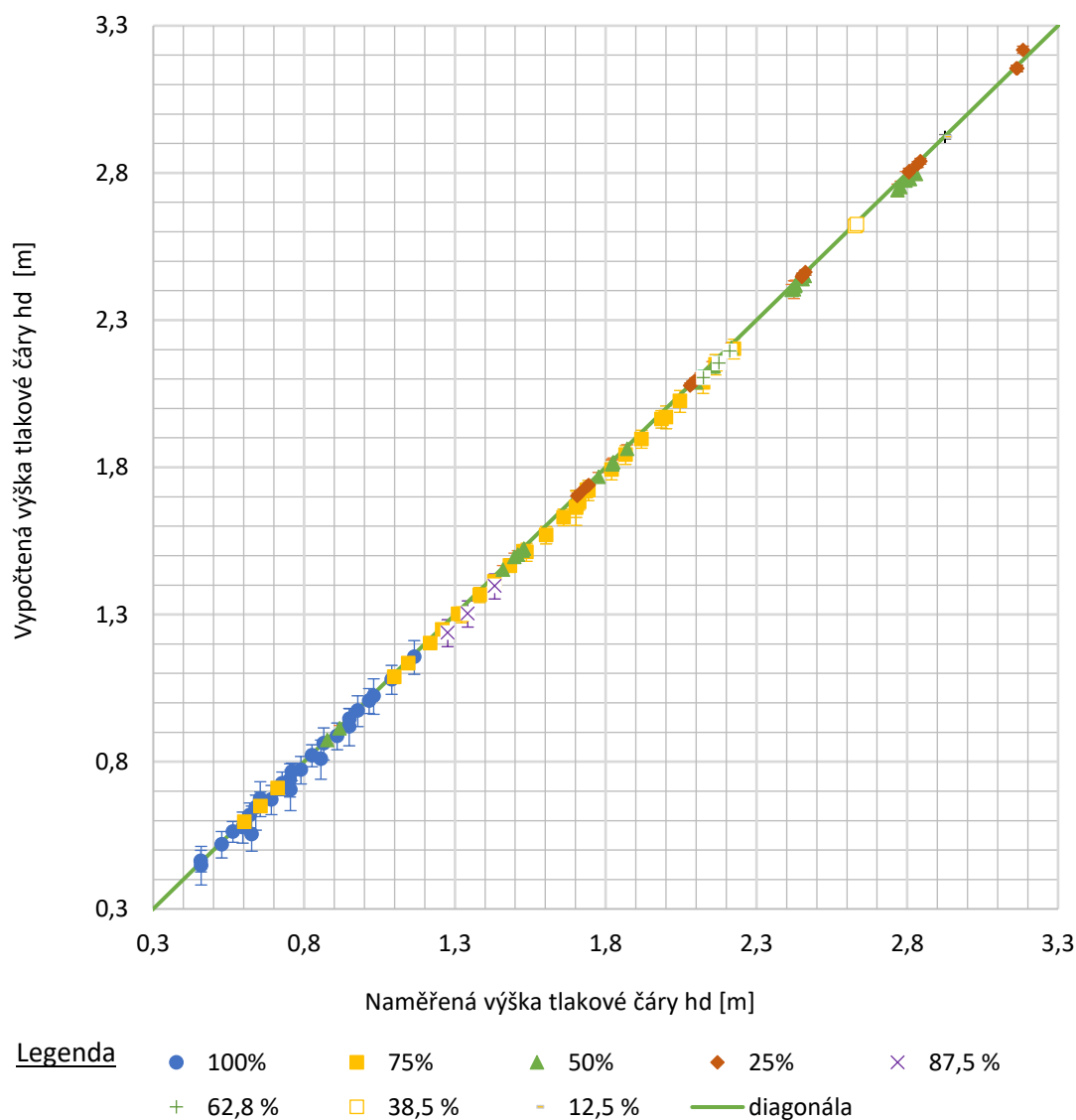
Kontrola přetlaků změřených tlakoměrnou sondou je provedena především z důvodu orientačního ověření správného navrtání otvorů tlakových odběru na fyzikálním modelu. Dalším důvodem, proč se přistoupilo ke kontrole přetlaků, je, že se kóta tlakové čáry nad srovnávací rovinou v profilu Tlak D používá pro výpočet výtokového součinitele. Kóta tlakové čáry se stanoví z přetlaků změřených na tlakoměrné sondě.

Kontrola změřených přetlaků tkví v tom, že se grafickou metodou porovná vypočtená kóta tlakové čáry nad srovnávací rovinou v profilu Tlak D se stanovenou kótou tlakové čáry nad srovnávací rovinou v profilu Tlak D. Vypočtená kóta tlakové čáry v profilu Tlak D se určí dle odvozeného vztahu pro kontrolu kóty tlakové čáry v profilu Tlak D viz kapitola 4.2 *Kontrola kóty tlakové čáry v profilu Tlak D*.

Grafická metoda je postavená na vykreslení grafu, kdy na vodorovné ose jsou vyneseny stanovené kóty tlakové čáry ze změřených přetlaků a na svislé ose jsou vyneseny vypočtené kóty tlakové čáry. Diagonálně vynesena úhlopříčka reprezentuje shodné kóty tlakové čáry, tj. stanovená kóta tlakové čáry je zcela rovna vypočtené kótě tlakové čáry. Jelikož do výpočtu vstupují naměřené veličiny zatížené chybou, je i výsledná vypočtená kóta tlakové čáry zatížena chybou. Tuto chybu, nebo-li možný rozsah vypočtené kóty tlakové čáry, reprezentují na grafu tzv. chybové úsečky. Platí-li podmínka, že jsou body rozloženy rovnoměrně v blízkosti diagonály a zároveň diagonála neopustí oblast vymezenou chybovými úsečkami, můžeme prohlásit vypočtené kóty tlakové čáry za podobné se stanovenými kótami tlakové čáry. Pak lze vycházet při výpočtu výtokového součinitele ze změřených přetlaků.

Vytvořený graf 3 pro kontrolu kóty tlakové čáry pro všechny naměřené stavy je přiložen níže. Z přiloženého grafu 3 vyplývá, že vykreslené body na grafu se rozprostírají v blízkosti diagonály. Definovaná podmínka kontroly tlakové čáry pro grafickou metodu je splněna a může se vycházet ze změřených přetlaků pro stanovení kóty tlakové čáry v profilu Tlak D. Pro otevření segmentu na 75 % a méně nabývají chybové úsečky malé hodnoty. Pro doplnění jsou v Příloze 14 přiloženy vytvořené grafy 25-29 pro jednotlivá otevření segmentového uzávěru.

## Kontrola kóty tlakové čáry v profilu Tlak D



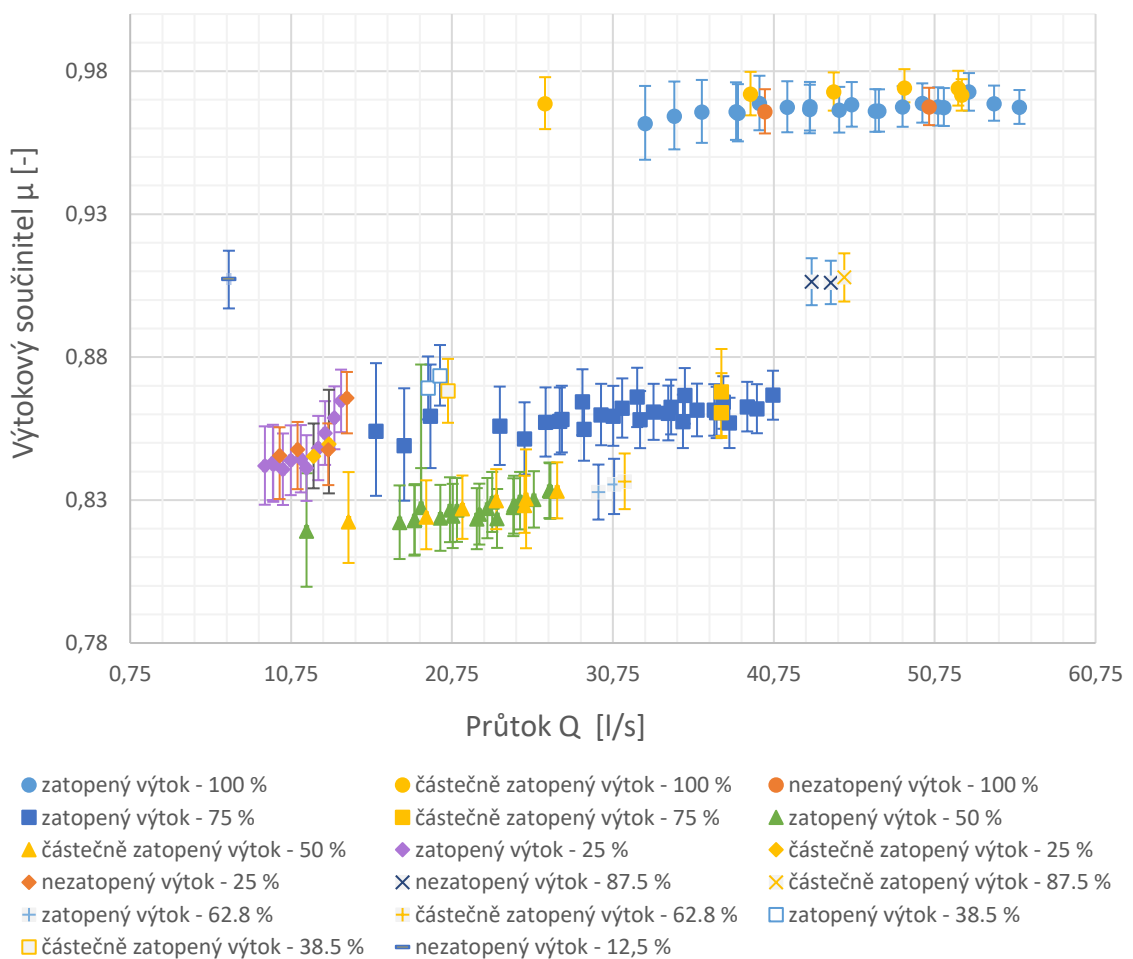
graf 3 Kontrola kóty tlakové čáry v profilu Tlak D pro všechny změřené stavy

### 5.3. Výtokový součinitel

Podle hladiny vody ve vývaru se rozlišují na fyzikálním modelu tři situace výtoku – nezatopený (dokonalý) výtok, částečně zatopený výtok a zatopený (nedokonalý) výtok. Vlivem zastoupení jednotlivých situací v sadě stavů se rozbor zaměřuje především na částečně zatopený výtok a zatopený výtok. Situace nezatopený výtok se interpretuje pouze individuálně pro dané procento otevření segmentového uzávěru. Získané výsledky výtokového součinitele lze interpretovat různými způsoby. Níže jsou uvedené některé možnosti.

První možností je závislost výtokového součinitele na průtoku. Z přiloženého grafu 4 *Závislost výtokového součinitele na průtoku* si lze všimnout závislosti průtoku na procentu otevření segmentového uzávěru. Se zvýšením procentem otevření segmentového uzávěru nabývá průtok vyšších hodnot a rozsah průtoku se pro jednotlivé dílčí stavy zvyšuje. Dále z grafu vyplývá závislost výtokového součinitele na procentu otevření segmentového uzávěru. Například pro 100 % otevření nabývá výtokový součinitel hodnoty kolem cca 0,970, ale pro 50 % otevření nabývá hodnoty cca 0,827. V rámci jednoho procenta otevření segmentového uzávěru, například pro 25 % otevření, je vidět, že hodnota výtokového součinitele roste se zvýšením průtoku. Tempo růstu výtokového součinitele je pro jednotlivá procenta otevření individuální. Pro 25 % otevření je růst strmější, ale pro 100% otevření je růst pozvolnější.

### Závislost výtokového součinitele na průtoku



graf 4 Závislost výtokového součinitele na průtoku

Následující možnosti jsou ukázkou závislosti výtokového součinitele na bezrozměrné veličině. Grafy je možné uplatnit, jak pro fyzikální model, tak i pro reálnou stavbu. Naopak graf *Závislost výtokového součinitele na průtoku* lze využít až po přepočtu skutečných hodnot průtoku dle pravidel podobnosti z reálné stavby na fyzikální model.

Druhou možností je závislost výtokového součinitele na procentu otevření segmentového uzávěru. Při zpracování výsledků bylo zjištěno, že výtokový součinitel pro 38,5 % otevření segmentového uzávěru výrazně vybočuje od očekávaného průběhu křivky. Pravděpodobnou příčinou je nesprávné nastavení segmentového uzávěru při experimentu na fyzikálním modelu. Důkazem toho je pokus stanovení výtokového součinitele z naměřených hodnot pro toto procento otevření s menší obměnou, kdy se navýšilo procento otevření segmentového uzávěru cca o 1 % a poupravily se veličiny závislé na této změně, tj. průtočná plocha výtokového otvoru, těžiště výtokového otvoru a případně změna výběru odvozeného vztahu pro výtokový součinitel dle situace výtoku. Hodnota výtokového součinitele se zařadila po této úpravě do očekávaného průběhu grafu. Pro zjištění hodnoty výtokového součinitele pro 38,5 % otevření je vhodné případně provést nové měření na fyzikálním modelu. Pro další vyhodnocení je 38,5 % otevření segmentového uzávěru vyřazeno.

Průměrná hodnota výtokového součinitele pro procenta otevření segmentového uzávěru se řeší statistickým způsobem a určí se aritmetickým průměrem ze souboru dat se zanedbáním velmi odlehlých hodnot. Chyba výtokového součinitele obsahuje v sobě kumulaci možných chyb během měření a rozšiřuje rozsah výsledků výtokového součinitele. Získané výsledky výtokového součinitele jsou použity při vykreslení grafu závislosti výtokového součinitele na procentu otevření segmentového uzávěru, dále i pro graf závislosti na podílu průtočných ploch. Z výsledků výtokového součinitele plyne, že hodnoty výtokové součinitele pro jednotlivé typy výtoků nabývají podobných hodnot. Z toho vyplývá, že výtokový součinitel není závislý na dolní podmínce hloubky vody ve vývaru.

Ve vykreslených grafech se používají tzv. chybové úsečky. Změřené veličiny na fyzikálním modelu vstupují do výpočtu s chybou a přenášejí tuto chybu určitým způsobem na výslednou veličinu. Tím se rozšiřuje rozsah výsledku pro vypočtenou veličinu. Určení samotné chyby vypočtené veličiny se zabývá kapitola *Citlivostní analýza*. Chybové úsečky se uplatní při prokazování jakéhokoliv trendu, například



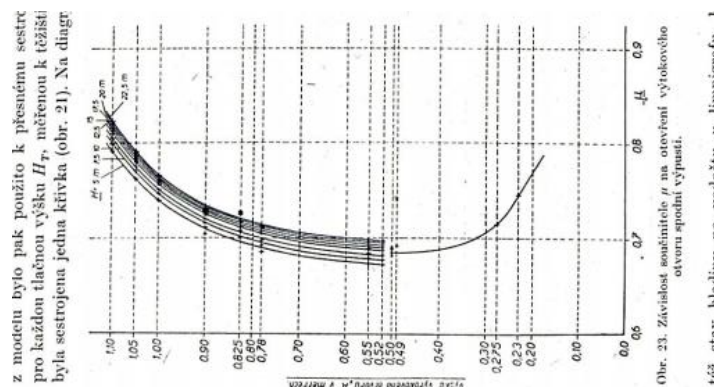
závislosti výtokového součinitele na procentu otevření segmentového uzávěru. Pokud se hodnoty pohybují v pásu výrazně užším než chybové úsečky, tak takový trend není příliš průkazný. V tomto případě se ukázalo, že je závislost výtokového součinitele na procentu otevření segmentového uzávěru opodstatněná.

Průměrné hodnoty výtokového součinitele dle procenta otevření včetně zanesení chyby						
procento otevření	zatopení výtokového otvoru dolní vodou	výtokový součinitel	hodnota součinitele s kladnou chybou	hodnota součinitele se zápornou chybou	Kladná chyba výtokového součinitele	Záporná chyba výtokového součinitele
%	-	-	-	-	%	%
100	nezatopený	0.9666	0.9740	0.9597	0.74	0.69
	částečně zatopený	0.9722	0.9792	0.9656	0.71	0.65
	zatopený	0.9670	0.9792	0.9553	1.23	1.15
87.5	nezatopený	-	-	-	-	-
	částečně zatopený	0.9079	0.9156	0.9004	0.78	0.74
	zatopený	0.9062	0.9145	0.8979	0.84	0.83
75	nezatopený	-	-	-	-	-
	částečně zatopený	0.8641	0.8786	0.8521	1.47	1.19
	zatopený	0.8597	0.8786	0.8399	1.91	1.95
62.8	nezatopený	-	-	-	-	-
	částečně zatopený	0.8365	0.8455	0.8262	0.91	1.02
	zatopený	0.8341	0.8438	0.8245	0.98	0.95
50	nezatopený	-	-	-	-	-
	částečně zatopený	0.8278	0.8408	0.8160	1.32	1.16
	zatopený	0.82699	0.8396	0.8145	1.28	1.23
38.5 (vyřazeno)	nezatopený	-	-	-	-	-
	částečně zatopený	0.8681	0.8790	0.8578	1.09	1.03
	zatopený	0.8713	0.8824	0.8602	1.13	1.09
25	nezatopený	0.8502	0.8600	0.8385	0.99	1.16
	částečně zatopený	0.8474	0.8627	0.8332	1.55	1.40
	zatopený	0.8475	0.8609	0.8343	1.37	1.30
12.5	nezatopený	0.9073	0.9172	0.8970	1.00	1.02
	částečně zatopený	-	-	-	-	-
	zatopený	-	-	-	-	-

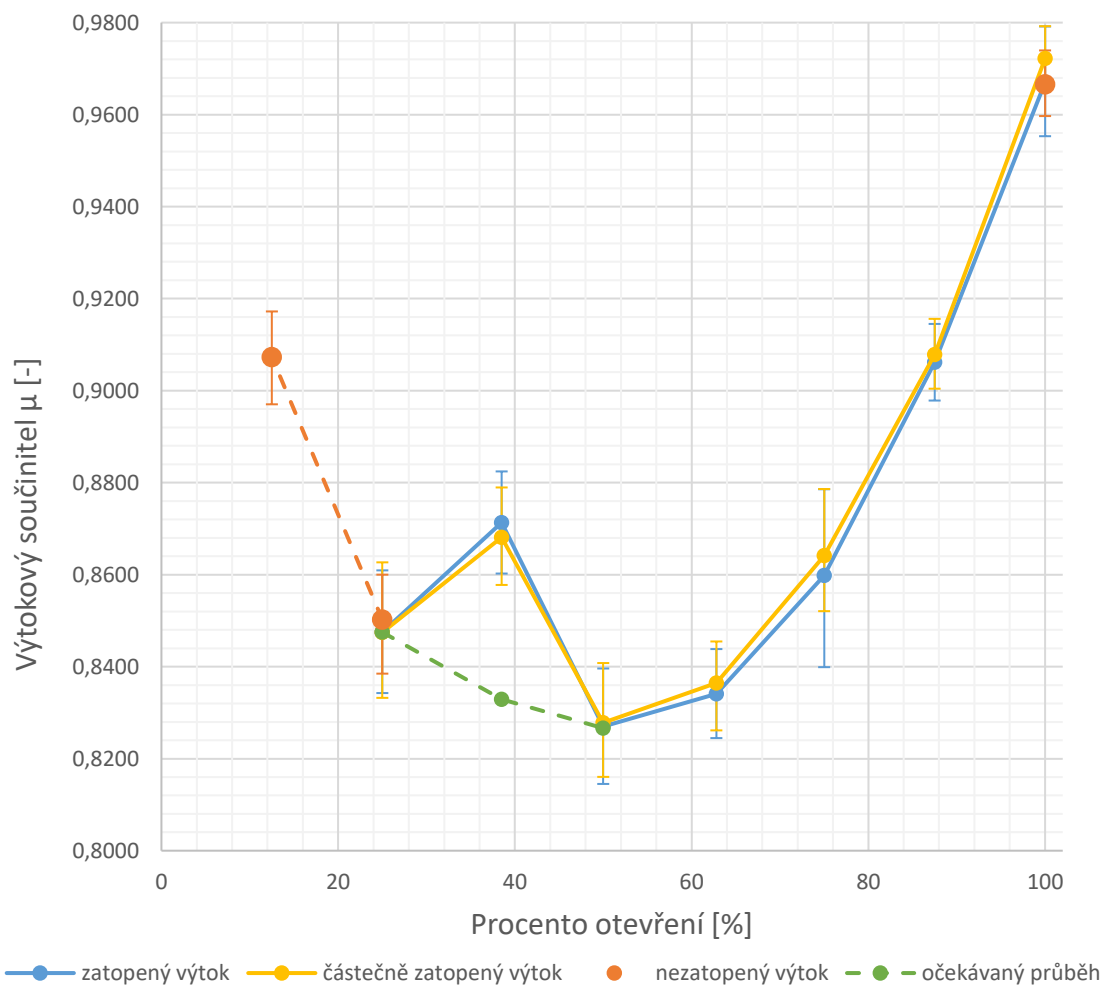
Tabulka 12 Průměrná hodnota výtokového součinitele pro procenta otevření segmentového uzávěru

Průběh křivky pro částečně zatopený výtok je velmi podobný s průběhem křivky pro zatopený výtok. Pro zatopený a částečně zatopený výtok se očekává podobnost průběhu křivky jako pro nezatopený výtok mezi otevřením uzávěru 12,5 % až 25,0 %. Jelikož hodnota součinitele pro nezatopený výtok pro otevření uzávěru 25 % a 100 % se nachází v blízkosti ostatních bodů výtokového součinitele pro zbývající stavy, očekává se podobný trend tvaru křivky pro nezatopený výtok jako pro obě zbývající situace. Křivka má tvar podobný průběhu parabole. Pro 50 % otevření nabývá výtokový součinitel

nejnižší hodnoty. Se zvýšením nebo se snížením procenta otevření se výtokový součinitel zvyšuje. Inspirací pro hypotézu průběhu očekávané křivky je graf závislosti výtokového součinitele na výšce výtokového otvoru v literatuře Výzkum spodních výpustí přehrad. [17] Výtokový součinitel je pro celou spodní výpust přehrady na Blanici u Husince a zahrnuje v sobě ztráty pro vtokový objekt, potrubí, přechodový kus a segmentový uzávěr, otočený hradicí konstrukcí segmentu proti proudu vody. Výzkum byl proveden na fyzikálním modelu i na reálné stavbě. [17]

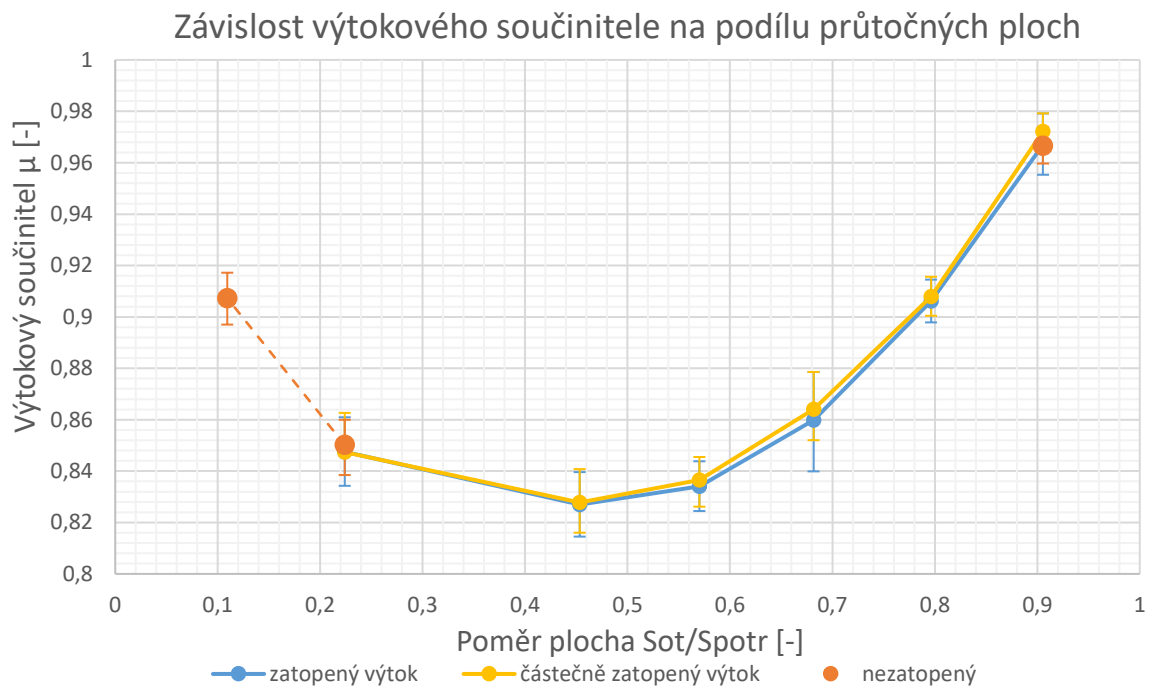


Obrázek 35 Závislost výtokového součinitele (svislá osa) na výšce otevření výtokového otvoru spodní výpusti v metrech [17]

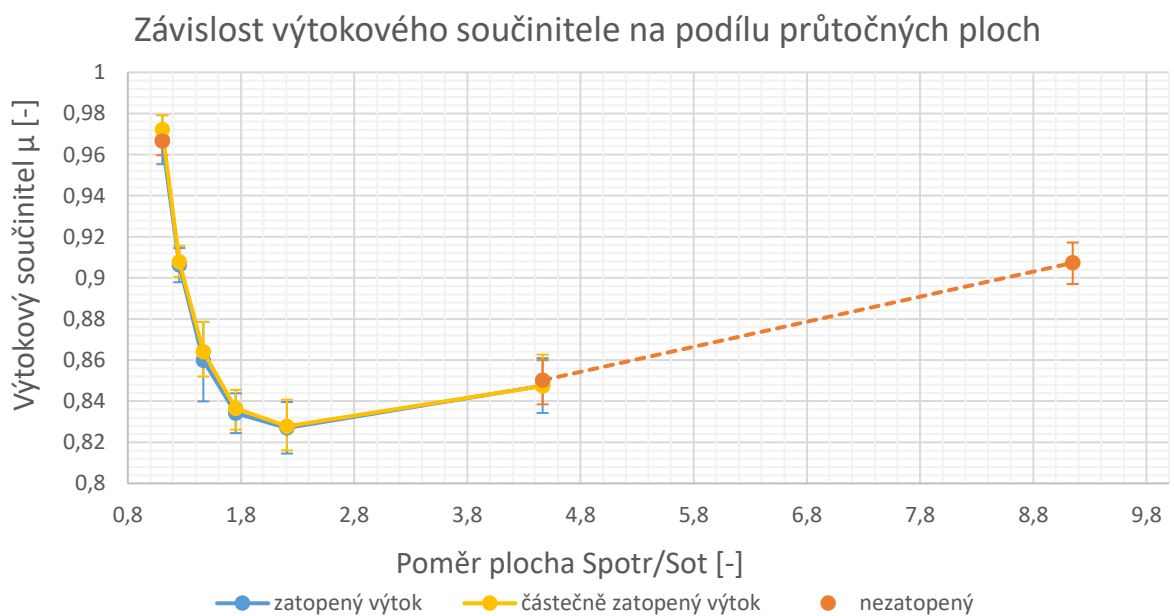


graf 5 Závislost výtokového součinitele na procentu otevření segmentového uzávěru

Třetí možností je závislost výtokového součinitele na podílu průtočné plochy výtokového otvoru ku průtočné ploše potrubí. Průběh křivky je velmi podobný s grafem 5 závislosti výtokového součinitele na procentu otevření segmentového uzávěru. Případně obrácením podílu průtočných ploch se stane pouze to, že se průběh křivky otočí o 180° kolem osy y. Klesající část křivky se smrští a stoupající část křivky se výrazně protáhne. Tyto uvedené grafy jsou pouze jako ukázka možné další interpretace získaných výsledků, nové informace neposkytují.



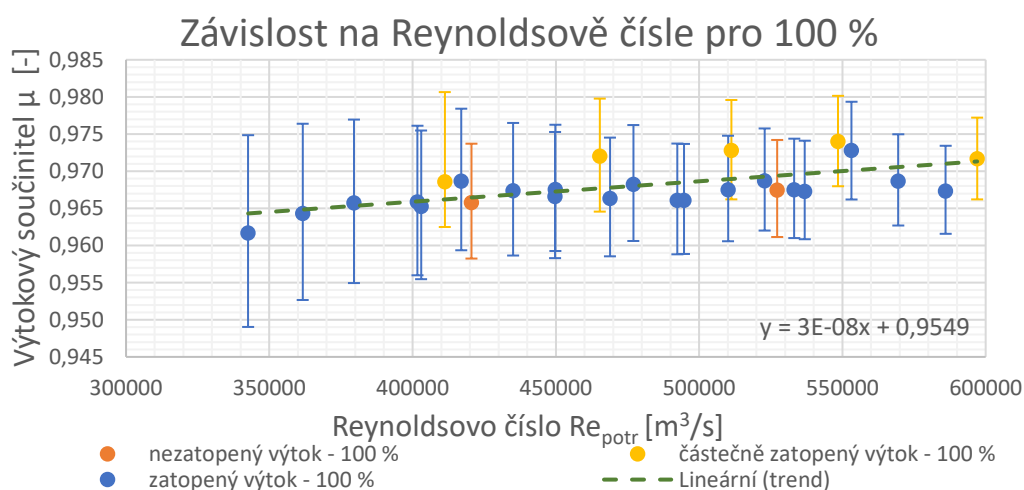
graf 6 Závislost výtokového součinitele na podílu průtočných ploch



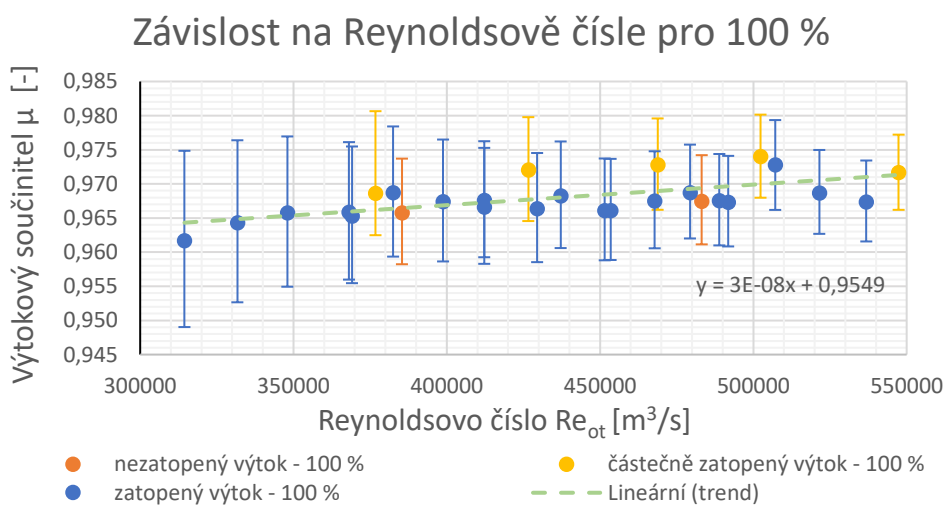
graf 7 Závislost výtokového součinitele na podílu průtočných ploch

Čtvrtou možností je závislost výtokového součinitele na Reynoldsově čísle pro začátek i konec koncového uzávěru. Níže jsou vykresleny grafy 8 -15 závislosti výtokového součinitele na Reynoldsově pro jednotlivé naměřené stavy.

Průběh vykreslených bodů na grafech Závislosti výtokového součinitele na Reynoldsovo číslo pro začátek i konec koncového uzávěru jsou stejné pro jednotlivá procenta otevření uzávěru. Grafy se liší pouze rozsahem Reynoldsova čísla. Porovnájí-li se hodnoty Reynoldsova čísla na grafech 8–15 nebo v tabulkách v Příloze 15, zjistí se, že mezi 100 % a 75 % otevření je Reynoldsovo číslo pro začátek koncového uzávěru větší než pro konec koncového uzávěru a že od 62,8 % až do 25 % otevření je Reynoldsovo číslo na konci koncového uzávěru vyšší než na začátku koncového uzávěru. Mezi 75 % a 62,8 % otevření dochází k obratu tohoto trendu. Bod obratu nastane v 68,8 % otevření uzávěru. Vliv Reynoldsova čísla na výtokový součinitel není zřejmě při plném otevření uzávěru příliš průkazný.

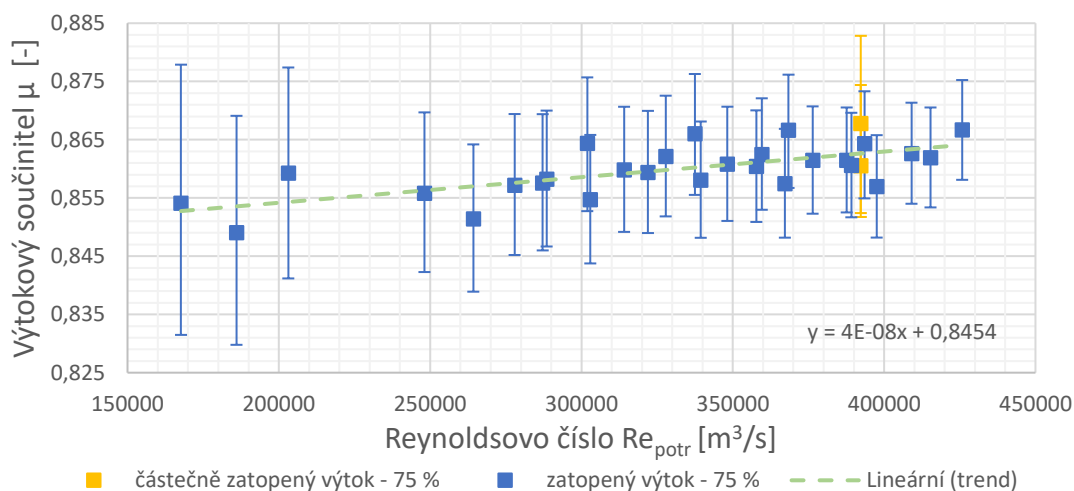


graf 8 Závislosti výtokového součinitele na Reynoldsově čísle pro začátek koncového uzávěru



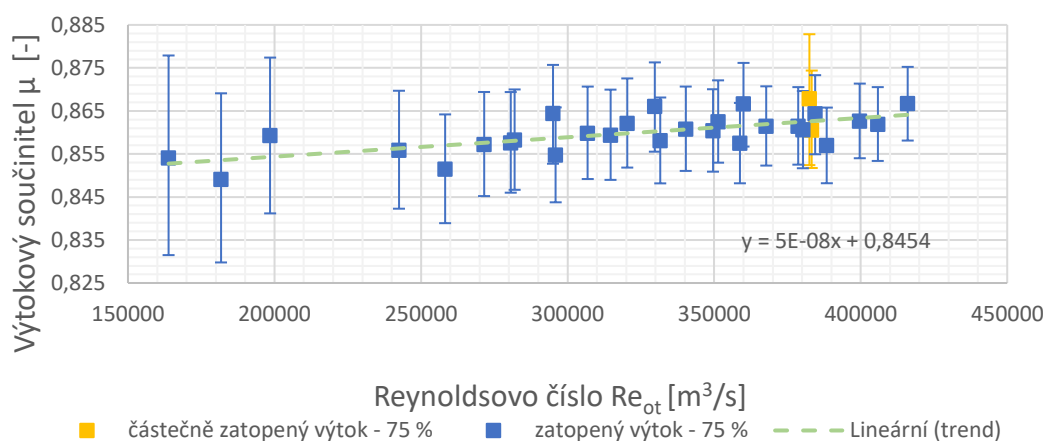
graf 9 Závislosti výtokového součinitele na Reynoldsově čísle pro konec koncového uzávěru

### Závislost na Reynoldsově čísle pro 75 %



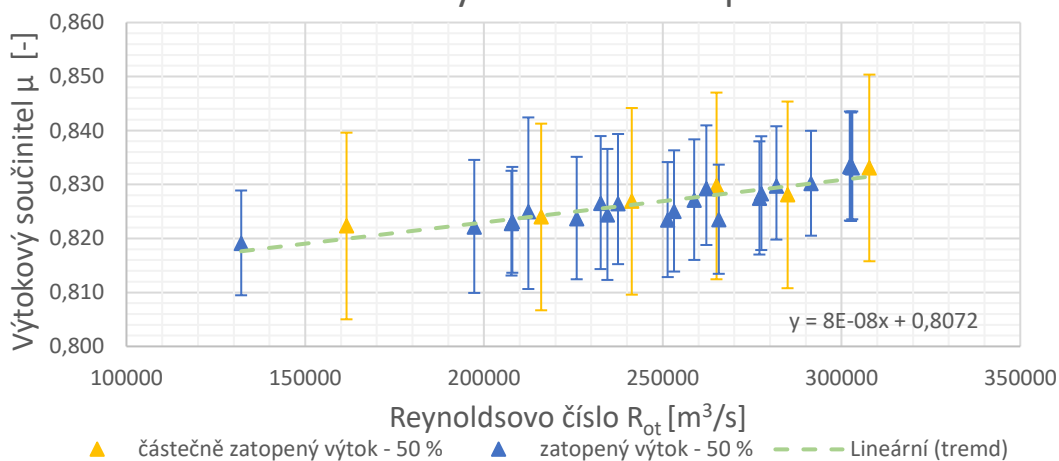
graf 10 Závislosti výtokového součinitele na Reynoldsově čísle pro začátek koncového uzávěru

### Závislost na Reynoldsově čísle pro 75 %



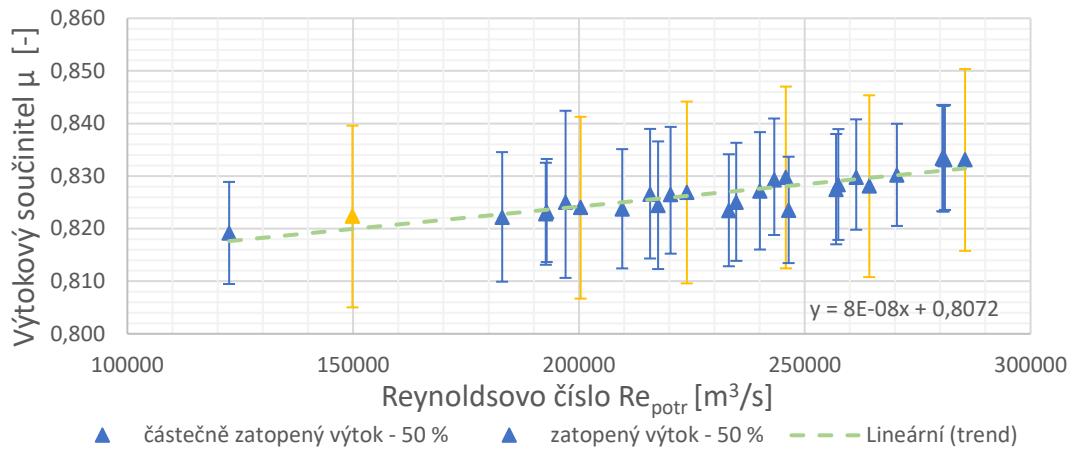
graf 11 Závislosti výtokového součinitele na Reynoldsově čísle pro konec koncového uzávěru

### Závislost na Reynoldsově čísle pro 50 %



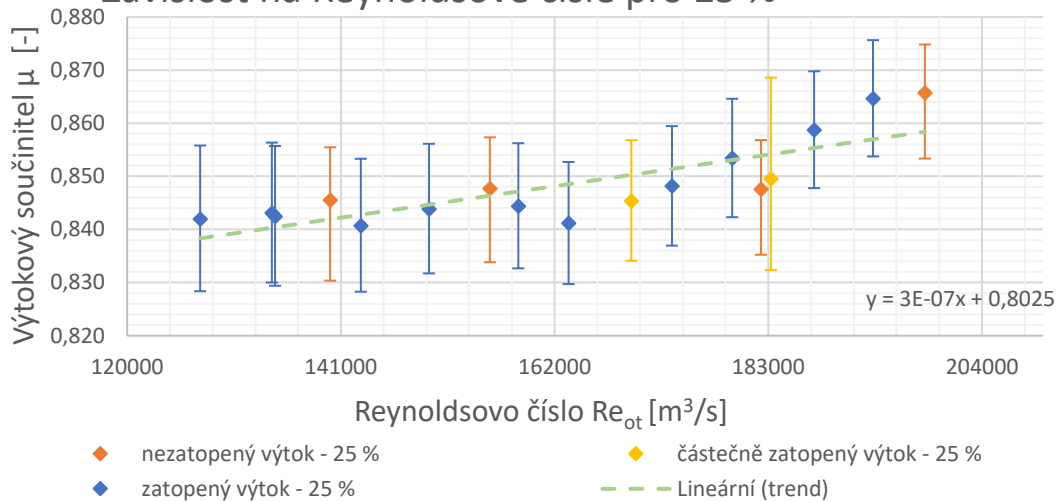
graf 12 Závislosti výtokového součinitele na Reynoldsově čísle pro začátek koncového uzávěru

### Závislost na Reynoldsově čísle pro 50 %



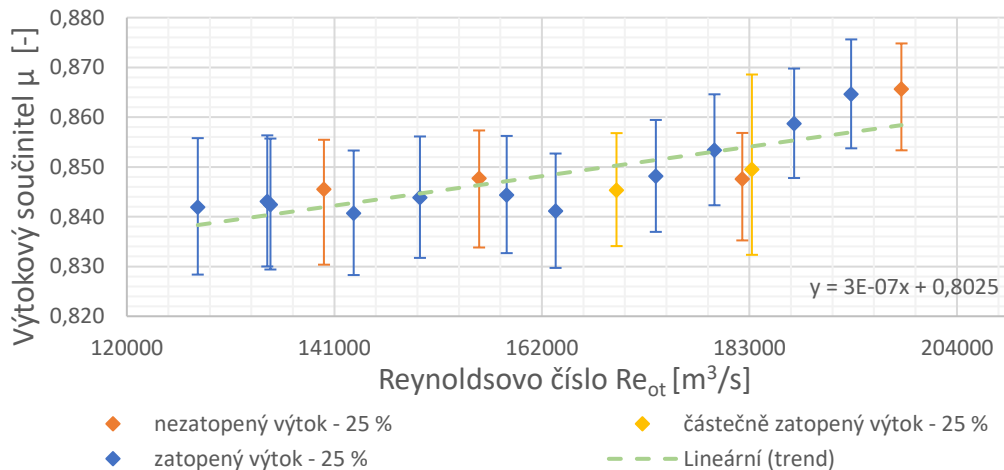
graf 13 Závislosti výtokového součinitele na Reynoldsovo čísle pro konec koncového uzávěru

### Závislost na Reynoldsově čísle pro 25 %



graf 14 Závislosti výtokového součinitele na Reynoldsově čísle pro začátek koncového uzávěru

### Závislost na Reynoldsově čísle pro 25 %



graf 15 Závislosti výtokového součinitele na Reynoldsově čísle pro konec koncového uzávěru

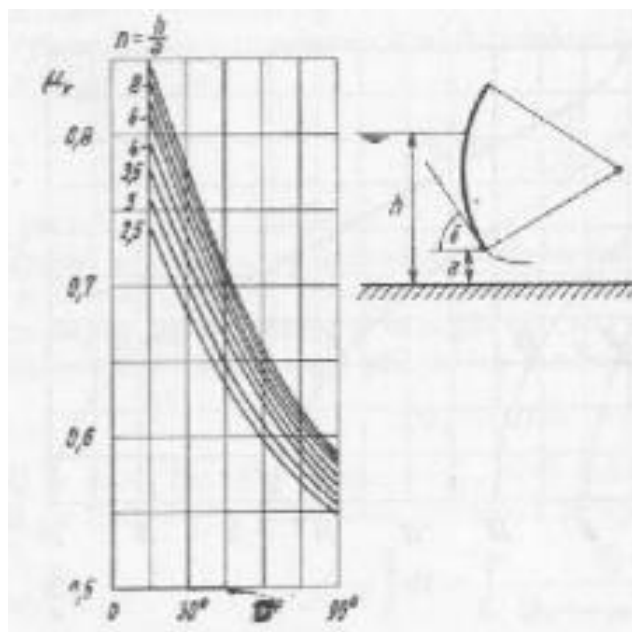
Předchozí poznámka o průběhu vykreslených bodů a podobnosti Reynoldsových čísel lze dokázat z podílu Reynoldsových čísel  $\frac{Re_{ot}}{Re_{potr}}$ . Podíl je závislý na průměru spodní výpusti, konstantě  $\pi$  a omočeném obvodu výtokového otvoru. Jelikož vyjmenované veličiny jsou konstantní pro jednotlivá otevření segmentového uzávěru, nabývá podíl stejné hodnoty pro všechny stavy pro dané procento otevření. Vlivem toho jsou průběhy grafů pro dané otevření segmentového uzávěru totožné. Se změnou procenta otevření segmentového uzávěru se mění omočený obvod výtokového otvoru, proto se mění i hodnota Reynoldsova čísla.

V případě vykreslení závislosti výtokového součinitele na tomto podílu vyjde podobný průběh křivky jako v grafu závislosti výtokového součinitele na procentu otevření segmentového uzávěru.

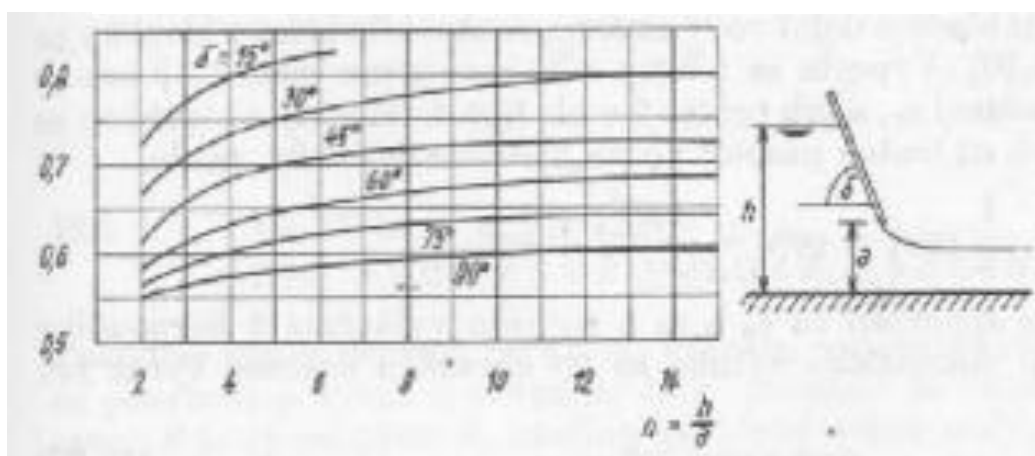
#### 5.4. Porovnání výsledků výtokového součinitele s existujícími fakty

Protože je u segmentovaného uzávěru osa otáčení natočena proti vodě, je svým způsobem uzávěr jedinečný a je složité k němu najít obdobný vědecký výzkum na našem území. Výsledky výtokového součinitele lze porovnat alespoň s jiným podobným uzávěrem – například se stavidlem nebo se segmentovým uzávěrem (segment je umístěn opačným způsobem).

Výsledky výtokové součinitele jsou poněkud vyšší než výtokový součinitel pro stavidlo nebo pro segmentový uzávěr dle grafů 12.18 a 12.19 na straně 211 v literatuře Hydraulika [11]. Při naklonění stavidla nebo segmentového uzávěru více po vodě nabývá výtokový součinitel již podobných hodnot, ale přesto je výtokový součinitel pro navrhovaný segmentový uzávěr stále o něco málo vyšší. Důvodem toho je tvar přechodového kusu, protože dochází k menšímu zúžení paprsku za otvorem a k menším ztrátám mechanické energie. Hodnota výtokového součinitele se podobá hodnotě výtokového součinitele pro otvor s plynulým bočním usměrněním  $\mu = 0,80 - 0,85$  uvedeného v tabulce 12.1 na straně 204 téže literatury. [11]



Obrázek 36 Závislost výtokového součinitele na procentu otevření segmentového uzávěru [11]



Obrázek 37 Závislost výtokového součinitele na procentu otevření stavidla [11]

## 5.5. Citlivost vstupních dat

V odvozeném vztahu pro výtokový součinitel nebo pro kótu tlakové čáry v profilu Tlak D se vyskytují dva druhy veličin – naměřené veličiny a odvozené veličiny. Odvozené veličiny se získají kombinací naměřených veličin. Například odvozená veličina rychlost v potrubí se získá kombinací naměřené veličiny průtoku a průtočné plochy potrubí. Naměřená veličina představuje „nejzákladnější“ veličinu, která je získaná samotným měřením nebo případně vyplývá z geometrie fyzikálního modelu.

Vlivem mnoha okolností může být naměřená veličina zatížena chybou, pak tato veličina nabývá většího rozpětí hodnot než pouze jedné hodnoty. Po dosažení veličiny do odvozeného vztahu se chyba přenáší i na výslednou hodnotu výtokového součinitele



nebo kóty tlakové čáry v profilu Tlak D. Důsledkem toho nabývají výsledné hodnoty většího rozsahu než pouze jedné hodnoty.

Dle chyby měření se dělí naměřené veličiny na dvě skupiny – na skupinu nezatíženou chybou a na skupinu zatíženou chybou. Naměřené veličiny nezatížené chybou nabývají neměnné hodnoty a nemají vliv na změnu výsledné hodnoty. Naopak naměřené veličiny zatížené chybou rozšiřují možnosti výsledků výtokového součinitele, případně kóty tlakové čáry, neboť přenášejí svou chybu prostřednictvím výpočtu do výsledku. Též závisí i na jejich množství. Liší se, zdali do odvozeného vztahu vstupuje jedna, dvě či více proměnlivých veličin, protože se pokaždé odvozený vztah chová jiným způsobem.

Chyba výtokového součinitele nebo chyba kóty tlakové čáry se vyjádří jako procentuální odchylka od naměřené hodnoty. Procentuální odchylka výtokového součinitele nebo kóty tlakové čáry je podíl rozdílu maximální/minimální hodnoty veličiny s nezatíženou hodnotou veličiny ku nezatížené hodnotě veličiny. Chybou nezatížená hodnota veličiny je získána dosazením naměřených veličin do odvozeného vztahu. Maximální a minimální hodnota veličiny je získána dosazením upravených naměřených veličin do odvozeného vztahu, tj. naměřená data jsou navýšena/snížena o svou chybu. Maximální/minimální hodnota se uvažuje jako nejnepříznivější kombinace upravených naměřených veličin tak, aby hodnota výtokového součinitele nebo kóty tlakové čáry byla největší/nejmenší.

Postup určení chyby je následující. Zaprvé se zjednoduší odvozený vztah pro výtokový součinitel a pro kótu tlakové čáry v profilu Tlak D tak, aby obsahoval pouze naměřené veličiny. Zadruhé pro naměřené veličiny zatížené chybou se určí možné kombinace tak, že se buď vyskytují s hodnotou navýšenou o svou chybu (+) nebo s hodnotou sníženou o svou chybu (-). Do upraveného vztahu se dosadí dle této kombinace upravené naměřené veličiny. Uvažuje se, že se vyskytnou všechny naměřené veličiny zatížené chybou současně. Nakonec se vybere nejnepříznivější kombinace.

## 5.5.1. Stanovení chyby výtokového součinitele

### 5.5.1.1. Stanovení chyby výtokového součinitele

#### 1) Zjednodušení odvozeného vztahu

Jelikož jsou pro tři situace dle hladiny dolní vody odvozeny tři odvozené vztahy pro výtokový součinitel, je výše popsán postup nutné aplikovat pro každý odvozený vztah samostatně. Úpravou všech tří odvozených vzorců pro výtokový součinitel se získají konkrétní dosazované naměřené veličiny, na nichž je výtokový součinitel závislý.

První skupina naměřené veličiny nezatížené chybou obsahuje délku potrubí  $L$ , průměr potrubí  $D$ , průřeznou plochu potrubí  $S_{potr}$ , průřeznou plochu výtokového otvoru  $S_{ot}$ , gravitační zrychlení  $g$  a výšku k těžišti výtokového otvoru k srovnávací rovině  $h_{ot}$ .

Druhá skupina naměřené veličiny zatížené chybou obsahuje průtok  $Q$ , výšku hladiny dolní vody za profilem výtoku k srovnávací rovině  $h_{dv}$ , součinitel ztráty třením  $\lambda$ , kótu tlakové čáry v profilu Tlak  $D$   $h_d$ , průřeznou plochu zatopené části výtokového otvoru  $S_{11}$ , průřeznou plochu nezatopené části výtokového otvoru  $S_{22}$  a výšku těžiště plochy nezatopené části výtokového otvoru  $h_{22}$ .

A) Ukázka odvození vztahu pro zatopený výtok:

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{Q}{S_{ot}} * \frac{1}{\sqrt{2g * \sqrt{h_E - h_{dv}}}} = \frac{Q}{S_{ot}} * \frac{1}{\sqrt{2g * \sqrt{\frac{\alpha v_{potr}^2}{2g} + h_d - \sum Z_t - h_{dv}}}} = \\ &= \frac{Q}{S_{ot}} * \frac{1}{\sqrt{2g * \sqrt{\frac{Q^2}{2g * S_{potr}^2} + h_d - \lambda \frac{L}{D} \frac{Q^2}{2g S_{potr}^2} - h_{dv}}}} \end{aligned}$$

B) Ukázka odvození vztahu pro nezatopený výtok:

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{Q}{S_{ot}} * \frac{1}{\sqrt{2g * \sqrt{h_E - h_c}}} = \frac{Q}{S_{ot}} * \frac{1}{\sqrt{2g * \sqrt{\frac{\alpha v_{potr}^2}{2g} + h_d - \sum Z_t - h_{ot}}}} = \\ &= \frac{Q}{S_{ot}} * \frac{1}{\sqrt{2g * \sqrt{\frac{Q^2}{2g * S_{potr}^2} + h_d - \lambda \frac{L}{D} \frac{Q^2}{2g S_{potr}^2} - h_{ot}}}} \end{aligned}$$

C) Ukázka odvození vztahu pro částečně zatopený výtok (pozn.  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $h_{22}$  jsou závislé na  $h_{dv}$ ):

$$\mu = \frac{Q}{S_{11} \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{h_E - h_{dv}} + S_{22} \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{h_E - h_{22}}} =$$

$$= \frac{Q}{S_{11} \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{\frac{Q^2}{2gS_{potr}^2} + h_d - \lambda \frac{L}{D} \frac{Q^2}{2gS_{potr}^2} - h_{dv}} + S_{22} \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{\frac{Q^2}{2gS_{potr}^2} + h_d - \lambda \frac{L}{D} \frac{Q^2}{2gS_{potr}^2} - h_{22}}}$$

## 2) Určení nejneprůzračnější kombinace

Dále se odvodí všechny možné kombinace naměřených veličin zatížené chybou a určí se nejvíce či nejméně příznivý stav. V tabulce níže jsou kombinace vypsány a vyznačeny nejneprůzračnější kombinace na konkrétních vybraných případech.

A) Kombinace pro zatopený výtok – pro 100 % otevření pro stav N\_331, P\_2

Naměřené veličiny				
název veličiny	jednotka	minimální hodnota s chybou	hodnota	maximální hodnota s chybou
Q	m <sup>3</sup> /s	38	38.4	38.8
h <sub>d</sub>	m	0.555	0.564	0.572
h <sub>dv</sub>	m	0.273	0.283	0.293
λ	-	0.0135	0.0136	0.0138
S <sub>ot</sub>	m <sup>2</sup>	-	0.008452	-
S <sub>potr</sub>	m <sup>2</sup>	-	0.009331	-
g	m/s <sup>2</sup>	-	9.81	-
L	m	-	0.15	-
D	m	-	0.109	-

Tabulka 13 Naměřené veličiny

Kombinace maximální									
veličina	hodnota	kombinace							
Q	hodnota	+	+	+	+	+	+	+	+
h <sub>d</sub>	hodnota	+	+	-	+	-	+	-	-
h <sub>dv</sub>	hodnota	+	+	+	-	+	-	-	-
λ	hodnota	+	-	+	-	-	+	+	-
výtokový součinitel	0.96915	0.96915	0.96900	0.97644	0.96064	0.97628	0.96079	0.96788	0.96773

Kombinace minimální									
veličina	hodnota	kombinace							
Q	hodnota	-	-	-	-	-	-	-	-
h <sub>d</sub>	hodnota	+	+	-	+	+	-	-	-
h <sub>dv</sub>	hodnota	+	+	+	-	-	+	-	-
λ	hodnota	+	-	+	-	+	-	+	-
výtokový součinitel	0.96416	0.96416	0.96401	0.97164	0.95543	0.95558	0.97149	0.96286	0.96271

Tabulka 14 Kombinace - nejneprůzračnější stav

B) Kombinace pro nezatopený výtok – pro 100 % otevření pro stav V1, P\_6

Naměřené veličiny				
název veličiny	jednotka	minimální hodnota s chybou	hodnota	maximální hodnota s chybou
Q	m <sup>3</sup> /s	49.4	50.4	51.4
h <sub>d</sub>	m	0.618	0.627	0.635
h <sub>ot</sub>	m	-	0.151	-
λ	-	0.0128	0.0129	0.0131
S <sub>ot</sub>	m <sup>2</sup>	-	0.00845	-
S <sub>potr</sub>	m <sup>2</sup>	-	0.00933	-
g	m/s <sup>2</sup>	-	9.81	-
L	m	-	0.15	-
D	m	-	0.109	-

Tabulka 15 Naměřené veličiny

Kombinace maximální					
veličina	hodnota	kombinace			
Q	hodnota	+	+	+	+
h <sub>d</sub>	hodnota	+	+	-	-
λ	hodnota	+	-	+	-
výtokový součinitel	0	0.89217	0.89205	0.89784	0.89772
Kombinace minimální					
veličina	hodnota	kombinace			
Q	hodnota	-	-	-	-
h <sub>d</sub>	hodnota	+	+	-	-
λ	hodnota	+	-	+	-
výtokový součinitel	0	0.88544	0.88532	0.89122	0.89110

Tabulka 16 Kombinace – nejnepříznivější stav

C) Kombinace pro částečně zatopený výtok – pro 100 % otevření pro stav N\_331, P\_1

Naměřené veličiny				
název veličiny	jednotka	minimální hodnota s chybou	hodnota	maximální hodnota s chybou
Q	m <sup>3</sup> /s	38.9	39.3	39.7
h <sub>d</sub>	m	0.450	0.458	0.466
h <sub>dv</sub>	m	0.159	0.169	0.179
λ	-	0.0134	0.0135	0.0137
S <sub>11</sub>	m <sup>2</sup>	0.0053	0.0066	0.0078
S <sub>22</sub>	m <sup>2</sup>	0.0032	0.0019	0.0007
h <sub>22</sub>	m	0.1706	0.1765	0.18131
S <sub>potr</sub>	m <sup>2</sup>	-	0.009331	-
g	m/s <sup>2</sup>	-	9.81	-
L	m	-	0.15	-
D	m	-	0.109	-

Tabulka 17 Naměřené veličiny

Kombinace maximální									
veličina	hodnota	kombinace							
Q	hodnota	+	-	+	+	-	+	-	-
$h_d$	hodnota	+	+	+	-	-	-	-	+
$h_{dv}$	hodnota	+	+	+	+	+	+	+	+
$\lambda$	hodnota	+	+	-	+	+	-	-	-
$S_{22}$	hodnota	+	+	+	+	+	+	+	-
$S_{11}$	hodnota	+	+	+	+	+	+	+	-
$h_{22}$	hodnota	+	+	+	+	+	+	+	-
výtokový součinitel	0.96857	0.96580	0.9610	0.96564	0.97230	0.96772	0.97219	0.9675	0.96085

Kombinace minimální									
veličina	hodnota	kombinace							
Q	hodnota	+	-	+	+	-	+	-	-
$h_d$	hodnota	+	+	+	-	-	-	-	+
$h_{dv}$	hodnota	-	-	-	-	-	-	-	-
$\lambda$	hodnota	+	+	-	+	+	-	-	-
$S_{22}$	hodnota	-	-	-	-	-	-	-	-
$S_{11}$	hodnota	-	-	-	-	-	-	-	-
$h_{22}$	hodnota	-	-	-	-	-	-	-	-
výtokový součinitel	0.96857	0.95945	0.95451	0.959305	0.96587	0.96108	0.96572	0.9609	0.95435

Tabulka 18 Kombinace – nejnepříznivější stav

Z uvedených tabulek vyplývá, že pro všechny tři situace se maximální hodnota výtokového součinitele stanoví kombinací průtoku zvýšeného o chybu, z výšky hladiny dolní vody zvýšenou o chybu, z kóty tlakové výšky v profilu Tlak D sníženou o chybu a ze součinitele ztrát třením navýšeného o chybu. Při stanovení nejnepříznivější kombinace pro částečně zatopený výtok se uvažovalo, že průtočná plocha zatopené a nezatopené části výtokového otvoru a těžiště nezatopené části výtokového otvoru je závislé na výšce hladiny dolní vody za profilem výtoku k srovnávací rovině. Minimální hodnota pro výtokový součinitel se stanoví kombinací z opačných hodnot než pro maximální hodnotu, tj. z průtoku sníženého o chybu, z výšky hladiny dolní vody sníženou o chybu, z kóty tlakové výšky v profilu Tlak D zvýšenou o chybu a ze součinitele ztráty třením sníženého o chybu. Touto kombinací je průměrná chyba výtokového součinitele pro zatopený výtok 1,2 %, pro částečně zatopený výtok 1,25 % a pro nezatopený výtok 1,15 %.

Po bližším prozkoumání tabulek se zjistí, že maximální/minimální hodnota výtokového součinitele stanovené dle zmíněných kombinací je velmi podobná

s hodnotou vypočtenou se stejnou kombinací až na opačnou hodnotu součinitele ztrát třením. Rozdíl se liší v řádu deseti tisícín. Toto pouze dokazuje, že chyba ztráty třením na úseku potrubí dlouhém 150 mm mezi profilem Tlak D a Uzávěr – začátek ovlivní velikost výtokového součinitele minimálně.

#### 5.5.1.2. Vliv jednotlivých naměřených veličin na výtokový součinitel

Naměřené veličiny nezátížené chybou nemají vliv na změnu výtokového součinitele, protože nabývají konstantní hodnoty. Naměřené veličiny zatížené chybou mají vliv na změnu výtokového součinitele, protože rozšiřují jeho rozsah výsledku, a zároveň jejich chyba tvoří jiný podíl na chybě výtokového součinitele, poněvadž se pro ně odvozený vztah pro výtokový součinitel chová jiným způsobem.

Tento vliv naměřených veličin zatížených chybou se získá následujícím způsobem. Zprv se vyjádří neovlivněná hodnota výtokové součinitele pro naměřené veličiny dosazené bez chyby do odvozeného vztahu. Poté se do odvozeného vztahu jednotlivě dosadí naměřené veličiny zvýšené nebo snižené o svou chybu a pro ně se stanoví ovlivněný výtokový součinitel. Rozdíl ovlivněného výtokového součinitele od neovlivněného výtokového součinitele vyjadřuje odchylku výtokového součinitele, tj. chybu výtokového součinitele způsobenou chybou naměřené veličiny. Chyba výtokového součinitele se vyjádří procentuálně a nabývá kladné nebo záporné hodnoty.

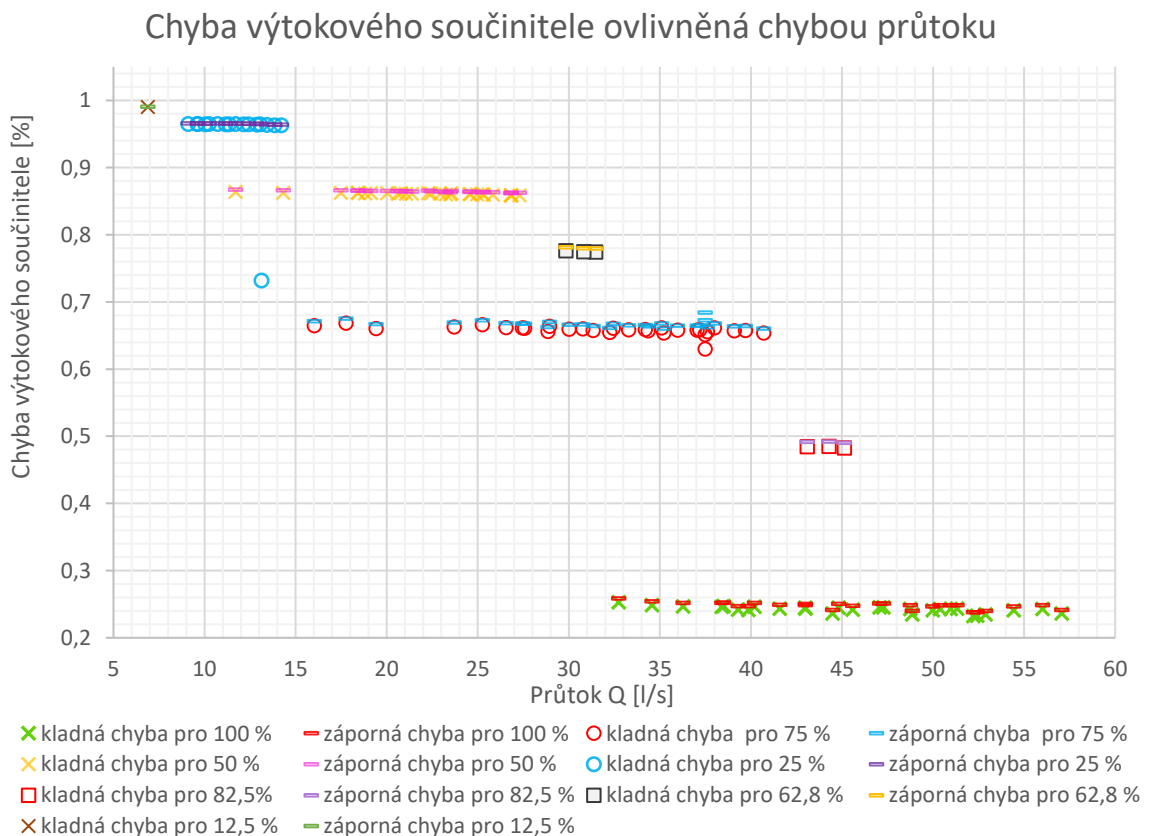
Například dosadí-li se do odvozeného vztahu naměřená veličina průtok navýšena o svou chybu (tj.  $Q = Q + 0,01Q$ ) a ostatní naměřené veličiny bez chyby, získá se ovlivněný výtokový součinitel. Jeho odečtením od neovlivněného výtokového součinitele se stanoví číselná chyba výtokového součinitele. Chyba výtokového součinitele se poté vyjádří procentuálně. Kupříkladu chyba výtokového součinitele + 0,8 % a – 0,6 % nám říká, že chyba průtoku (tj.  $0,01Q$ ) rozšiřuje možnost výsledku neovlivněného výtokového součinitele tak, že zvyšuje jeho hodnotu o 0,8 % nahoru a snižuje jeho hodnotu o 0,6 % dolů. Pak rozsah výtokového součinitele bude  $(\mu - \mu * 0,6 \%) < \mu < (\mu + \mu * 0,8 \%)$ .

Pro vybrané naměřené veličiny zatížené chybou jsou vytvořeny grafy, kdy na vodorovné ose jsou hodnoty naměřené veličiny bez chyby a na svislé ose jsou vyneseny absolutní hodnoty relativní chyby výtokového součinitele. Popsané grafy jsou přiloženy níže k vybraným naměřeným veličinám.

## Průtok Q

Poněvadž Thomsonův měrný přeliv v modrém tělese nesplňuje podmínky platnosti Thomsonovy rovnice pro průtok, používá se pro výpočty průtok ze záznamu průtokoměru. Chyba průtoku nabývá hodnoty 1 % z naměřené hodnoty, tj.  $\Delta Q = \pm 1\% = 0,01 Q$ . Při stanovení vlivu chyby průtoku na chybu výtokového součinitele se postupuje dříve popsaným postupem. Z grafu je patrné, že chyba výtokového součinitele klesá s navýšením průtoku. I když větší chyba průtoku  $\Delta Q$  vzniká pro vyšší průtoky, tak chyba výtokového součinitele nabývá nejvyšší hodnoty pro nejnižší průtoky a nejnižší chyby průtoku  $\Delta Q$ . Chyba výtokového součinitele nabývá do 1 %. V grafu 16 je uvedena absolutní hodnota relativní chyby výtokového součinitele.

Pro jednotlivá procenta otevření segmentového uzávěru se vykreslené body shlukly do jedné linie. Každá linie nabývá jiné chyby výtokového součinitele. Tento jev vznikl důsledkem toho, že průtok je částečně závislý na procentu otevření segmentového uzávěru. S poklesem procenta otevření segmentového uzávěru se sníží rozsah průtoků.

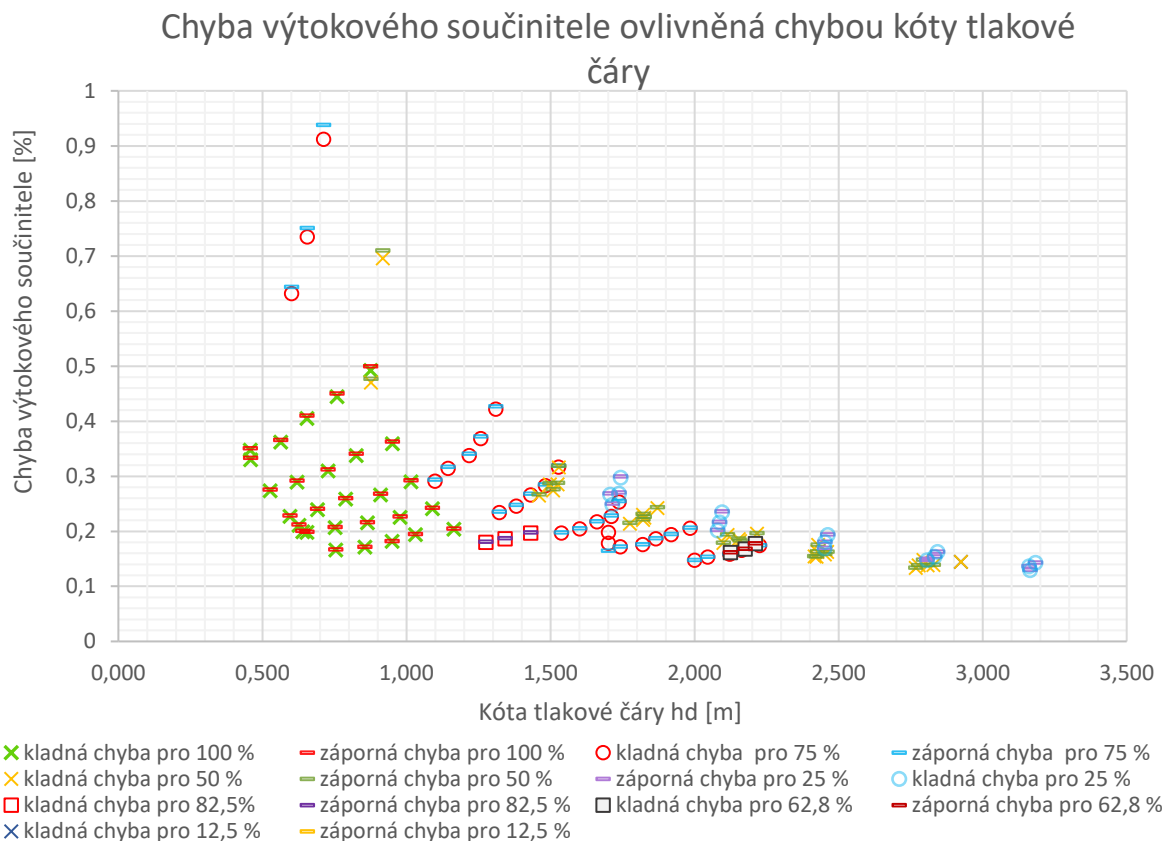


graf 16 Chyba výtokového součinitele ovlivněná chybou průtoku

### Kóta tlakové čáry v profilu Tlak D $h_d$

Chyba kóty tlakové čáry v profilu Tlak D je závislá na koeficientu  $a$  z kalibrační rovnice a vyjádří se jako  $\Delta h_d \text{ [m]} = \pm 0,8 * a$ . Koeficient  $a$  nabývá velmi podobné hodnoty pro všechny naměřené stavy. Při stanovení chyby součinitele způsobenou chybou kóty tlakové čáry se postupuje dříve popsaným postupem. Z grafu 17 vyplývá, že se zvýšením kóty tlakové čáry se snižuje chyba výtokového součinitele. Chyba výtokového součinitele nabývá do 1 %, průměrně však do 0,5 %.

Dále si lze na grafu všimnout, že vykreslené body pro jedno procento otevření se rozdělují do skupinek, které jsou od sebe vzdáleny a v kterých body vzestupně stoupají. Skupinka představuje jednu hladinu vody v horní nádrži a stoupáním hladiny dolní vody dochází ke zvýšení kóty tlakové čáry, i přetlaků. Skupinka, která v rámci jednoho procenta otevření nabývá největší absolutní chyby výtokového součinitele, představuje nejnižší hladinu vody v horní nádrži N\_318. Dále je zde vidět i, že s poklesem otevření uzávěru vzrůstá kóta tlakové čáry. V grafu je uvedena absolutní hodnota relativní chyby výtokového součinitele.

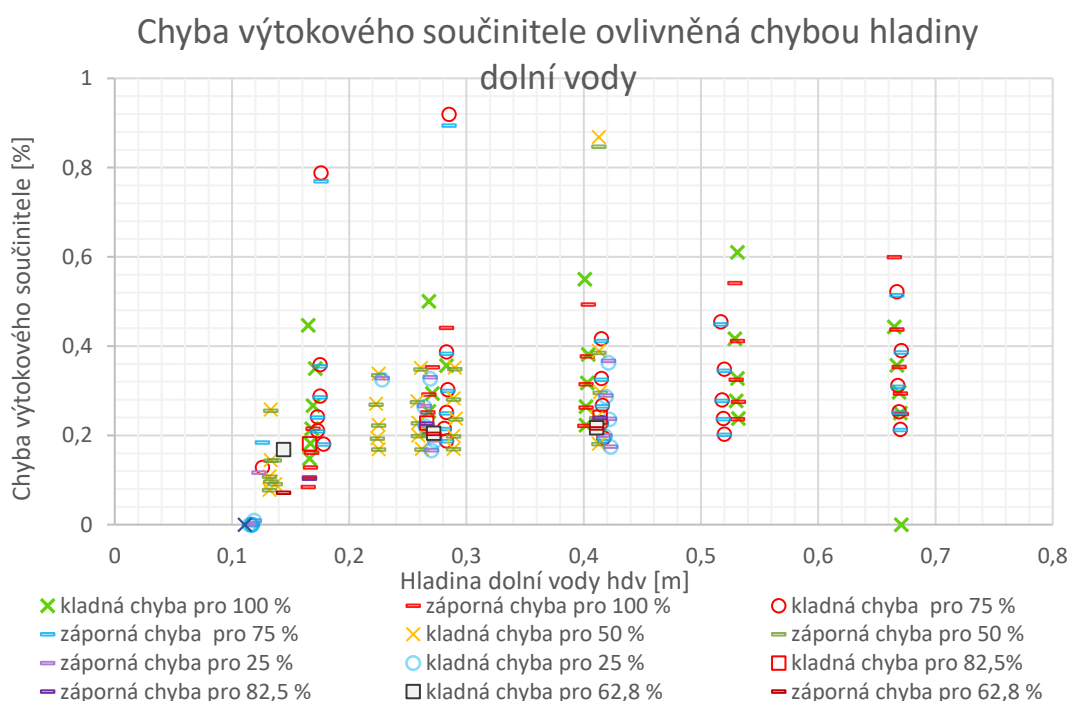


graf 17 Chyba výtokového součinitele ovlivněná chybou kóty tlakové čáry



### Výška hladiny dolní vody za profilem výtoku k srovnávací rovině $h_{dv}$

Na odvozený vzorec má vliv tato veličina pouze v případě, kdy nastane zatopený či částečně zatopený výtok. Chyba výšky hladiny dolní vody nabývá stejné hodnoty  $\pm 0,01\text{m}$ . Pokud chyba nabývá hodnoty nula, představuje daný stav nezatopený výtok. Vykreslené body jsou řazeny do sloupečku dle volby hloubky dolní vody. Chyba výtakového součinitele nabývá do 1 %. V grafu je uvedena absolutní hodnota relativní chyby výtakového součinitele. V rámci jednoho sloupečku (a i v rámci procenta otevření segmentu) je nižší chyba výtakového součinitele pro nejvyšší hladinu vody v horní nádrži a pro nejnižší průtok. Nejvyšší chyba výtakového součinitele je pro nejnižší hladinu vody v horní nádrži a pro nejvyšší průtok.



graf 18 Chyba výtakového součinitele ovlivněná chybou hladiny dolní vody

### Součinitel ztráty třením $\lambda$

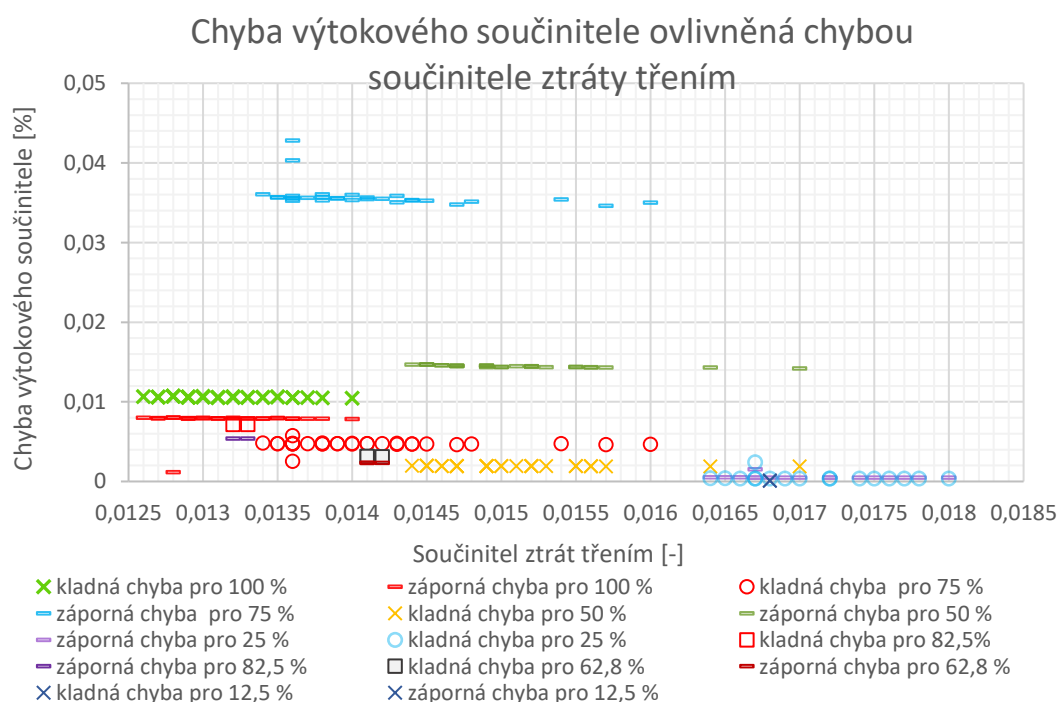
Bezrozměrná veličina součinitel ztráty třením se odvozuje pomocí vybraných vzorců, které jsou v případě hydraulicky hladkého potrubí závislé pouze na Reynoldsově čísle. Neboť hodnota Reynoldsova čísla se pohybuje řádově okolo  $10^5$ , platnost vzorců je splněna. Tekutina proudí v potrubí spodní výpusti turbulentním prouděním.

Reynoldsovo číslo je závislé na dvou veličinách – na průtoku a na teplotě vody. Průtočná plocha potrubí nabývá konstantní hodnoty, proto je rychlost v potrubí spodní výpusti závislá pouze na průtoku. Viskozita vody by se za normálních podmínek odvodila

dle teploty vody, ale z důvodu, že nebyla měřena teplota vody v průběhu měření, muselo se přistoupit k jinému řešení, jak teplotu stanovit.

Zprvce se určilo rozmezí teploty vody 14 °C – 18 °C. Dolní hranice udává teplotu vody v zásobním prostoru rozvodné sítě změřeném zpětně v zimním období a horní hranice demonstruje očekávaný vliv zahřátí vody vlivem letních teplot a koloběhu vody v rozvodné síti. Zadruhé se pro tři vybrané stavy a pro tři teploty ve zvoleném rozmezí (14 °C, 16 °C a 18 °C) spočítaly hodnoty Reynoldsova čísla a součinitele ztráty třením. Celý postup výpočtu se opakoval pro průtok zvýšeném či sníženém o chybu, aby se nezanedbal při vytvoření chyby součinitele ztráty třením vliv chyby průtoku. Zatřetí porovnáním vypočtených hodnot součinitele ztráty třením mezi sebou se zvolil postup pro výpočet součinitele ztráty třením a uměle se vytvořila chyba součinitele ztráty třením. Součinitele ztráty třením se vypočítá dle vzorce Frenkela pro teplotu 16 °C. Kladná chyba součinitele ztráty třením činí 0,0002 a záporná hodnota součinitele ztráty třením činí 0,0001. Uměle utvořená chyba součinitele ztráty třením v sobě nese jak vliv chyby průtoku, vliv výběru vzorce a vliv výběru teploty.

Chyba výtokového součinitele se stanoví dříve popsaným postupem v úvodu kapitoly. Chyba výtokového součinitele způsobenou chybou součinitele ztráty třením nabývá do hodnoty 0,05 %. V grafu 19 je uvedena absolutní hodnota relativní chyby výtokového součinitele.



graf 19 Chyba výtokového součinitele ovlivněná chybou součinitele ztráty třením

## Shrnutí

Z porovnání vlivu naměřených veličin zatížené chybou na výtokový součinitel vyplývá, že největší podíl na změnu výtokového součinitele vlivem své chyby má naměřená veličina průtok a nejmenší podíl na změnu výtokového součinitele má veličina součinitel ztráty třením. Dále je patrné, že naměřená veličina výška hladiny dolní vody a kóta tlakové čáry ovlivňují výtokový součinitel svoji chybou podobně. Pro celkovou chybu výtokového součinitele při působení všech naměřených veličin s chybou se jednotlivé chyby navzájem ovlivňují.

### 5.5.2. Chyba kóty tlakové čáry v profilu Tlak D

Odvozený vztah pro výtokový součinitel vychází ze stanovené kóty tlakové čáry v profilu Tlak D. Stanovená kóta tlakové čáry se určí pomocí kalibrační rovnice ze změřených přetlaků tlakoměrnou sondou. Z důvodu uvedených v kapitole 5.2 *Kontroly kóty tlakové čáry v profilu Tlak D* se přistoupilo ke kontrole stanovené kóty tlakové čáry srovnáním s vypočtenou kótou tlakové čáry. Odvozený vztah pro vypočtenou kótu tlakové čáry vychází z Bernoulliho rovnice mezi profily Horní nádrž před česlemi a profil Tlak D a je uveden v kapitole 4.2 *Kontrola kóty tlakové čáry v profilu Tlak D*. Chyba kóty tlakové čáry v profilu Tlak D se stanovuje pro vypočtenou kótu tlakové čáry v profilu Tlak D.

Obdobným způsobem jako pro výtokový součinitel se postupuje při určení kombinace pro maximální/minimální chybu pro kótu tlakové čáry. Určení kóty tlakové čáry samostatná metoda a je zcela nezávislá na výpočtu výtokového součinitele.

Odvozený vztah po úpravě:

$$h_d = h_{nádrž} + \frac{\alpha v_{nádrž}^2}{2g} - \frac{\alpha v_{potr}^2}{2g} - \sum Z_t - Z_{česle} - Z_{nátok} - Z_{šoupě} =$$
$$= h_{nádrž} + \left(\frac{1-\zeta_{česle}}{2g}\right) \frac{Q^2}{S_{nádrž}^2} - \left(\frac{1+\zeta_{nátok}+\zeta_{šoupě}+\lambda \frac{L}{D}}{2g}\right) \frac{Q^2}{S_{potr}^2}$$

Kombinace pro 100 % otevření a stav N\_331 a P\_1:

Kombinace kóty tlakové čáry									
veličina	hodnota	kombinace							
Q	hodnota	+	+	+	-	+	-	-	-
$h_{nádrž}$	hodnota	+	+	-	+	-	+	-	-
$\lambda$	hodnota	+	-	+	+	-	-	+	-
výsledek	0.464	0.440	0.446	0.427	0.493	0.433	0.500	0.480	0.486

Tabulka 19 Kombinace

Odvozené vztahy pro výtokový součinitel a pro kótu tlakové čáry se chovají zcela obráceně, i když oba vymezené úseky potrubí spodní výpusti pro metody na sebe navazují. Maximální hodnota kóty tlakové čáry se určí z kombinace průtoku zvýšeného o chybu, hloubku horní nádrži před česlemi snížené o chybu a součinitele ztráty třením zvýšené o chybu. Minimální hodnota se určí zcela z obrácených hodnot. Oproti chybě výtokového součinitele má hodnota součinitele ztráty třením větší vliv na hodnotu kóty tlakové čáry, ale s porovnáním k ostatním naměřeným hodnotám je vliv malý. Procentuální chyba kóty tlakové čáry v profilu Tlak D nabývá hodnoty pro 100 % otevření 1,05 % a pro ostatní procenta otevření průměrné hodnoty 0,6 %.

Pakliže by se uvažovalo o stanovení výtokového součinitele ze vztahu mezi profily Horní nádrž před česlemi a Uzávěr – otvor, bylo by třeba odvodit nový vztah a pro něj odvodit novou kombinaci s maximální nebo minimální chybou, protože se bude chovat zcela odlišným způsobem.

## 5.6. Průběh kóty tlakové čáry v konfuzorovém přechodovém kuse

Konfuzorový kus slouží k postupnému přechodu kruhového profilu na začátku konfuzoru na obdélníkový profil na konci konfuzoru. Spodní hrana zůstává rovná, mění se zbývající hrany. V Příloze 8 jsou uvedeny příčné řezy profilů Tlak A, Tlak B a Tlak C s vyznačenými tlakovými odběry po obvodě a podélný profil koncového uzávěru s vyznačenými profily. Tlakové odběry po obvodě ve zmíněných profilech slouží ke změření tlaku v místě daného odběru, ke změření průměrného tlaku v daném profilu a jsou umístěny rovnoměrně po celém obvodě profilu. Ze změřených přetlaků v profilu Tlak A, Tlak B a Tlak C se pomocí kalibrační rovnice určí kóta tlakové čáry nad srovnávací rovinou a vykreslí se průběh tlakové čáry v konfuzorovém přechodovém kuse.

Pro 25 %, 50 %, 75 % a 100 % otevření segmentového uzávěru jsou vybrány tři stavy - stav s nejmenšími hodnotami změřených tlaků označeného jako „Případ třetí“, stav s největšími hodnotami změřených přetlaků označeného jako „Případ první“ a nahodilý stav pro obecné změřené přetlaky označeného jako „Případ druhý“. Pro 100 % otevření nastanou největší přetlaky pro stav \_355 a P\_5 a nejmenší přetlaky pro stav H\_331 a P\_1. Pro 75 % otevření nastanou nejmenší přetlaky pro stav H\_331 a P\_1 a největší přetlaky jsou pro stav H\_355 a P\_5. Pro 50 % otevření nejmenší přetlaky nastanou pro stav H\_331 a P\_1 a největší přetlaky jsou pro stav H\_355 a P\_5.

Pro 25 % otevření nejmenší přetlaky nastanou pro stav H\_331 a P\_1 a největší přetlaky jsou pro stav H\_355 a P\_5. Ani jeden stav není s největším či s nejmenším spádem. Zároveň nahodile vybraný stav je pro všechny procenta otevření H\_348 a P\_3. Maximální průběh kóty tlakové čáry nastane pro maximální přetlak a minimální průběh kóty tlakové čáry nastane pro minimální přetlaky. (pozn. Pro stav H\_318 nebyly změřeny přetlaky. Jednotlivé vybrané stavy nabývají jiných vlastností, například průtoku.)

Maximální hodnoty kóty tlakové čáry po obvodě v profilu Tlak C pro 100 % otevření jsou po stranách přechodového kusu, naopak nižší kóta tlakové čáry je v dolní a horní části profilu. Podobný průběh křivky v profilu Tlak C mají i ostatní procenta otevření. V profilu Tlak B jsou opět maximální kóty tlakové čáry pro 100 % otevření po stranách a nižší hodnoty v horní a dolní části profilu. Průběh křivky pro ostatní procenta otevření je obdobný, křivka se v profilu Tlak B přibližuje ke křivce kóty tlakové čáry v profilu Tlak C. Pro 100 % otevření jsou v profilu Tlak A po stranách nižší kóty tlakové čáry a nahoře i dole jsou vyšší kóty tlakové čáry. Pro ostatní procenta otevření se průběh výšky tlakové čáry zcela obrátí. V profilu Tlak A jsou nejnižší hodnoty v dolní části profilu a vyšší hodnoty v horní části profilu. Pro 100 % otevření mezi profilem Tlak C a Tlak A dochází k posunu minima tvaru křivky po obvodě.

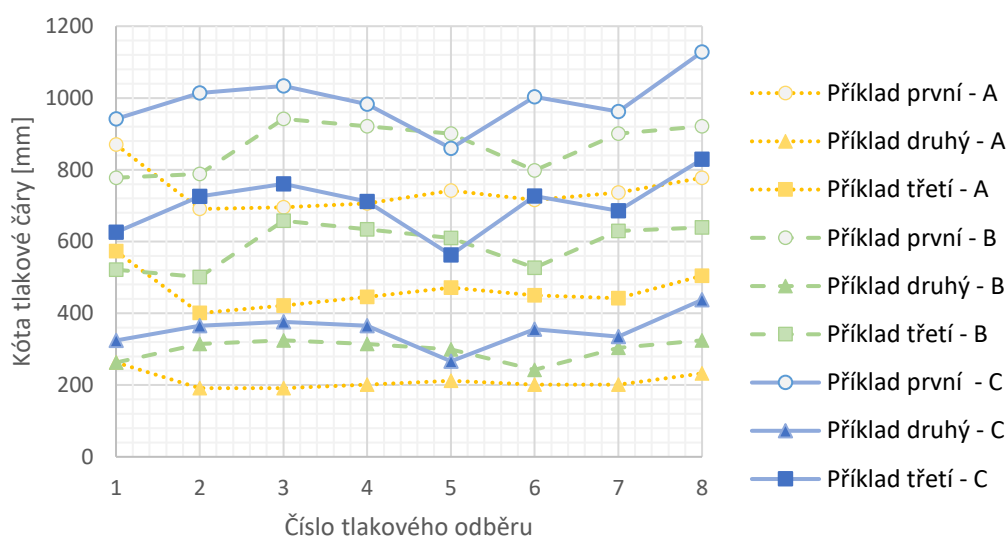
Pro 100 % otevření segmentového uzávěru by se spíše očekávalo opačný průběh kóty tlakové čáry pro profil Tlak B a Tlak C. Vlivem zešikmení horní plochy konfuzorového kusu by měla voda být tlačena na horní povrch konfuzoru a vytvářet zde maximální tlak. Naopak vlivem ustoupení bočních stěn by měl mít proud vody tendenci odtrhnout od povrchu stěny a měly by zde vznikat minimální přetlaky. Ale dle vykresleného průběhu kóty tlakové čáry je tomu naopak. Vlivem rozšíření tvaru se proud vody asi roztáhne do stran a zároveň vlivem snížení výšky horní hrany je část proudu nejspíše tlačena ze shora na boky. Kombinací obou jevů dochází k mírnému tlačení vody na boky přechodového kusu, což má za následek zvýšení tlaku po stranách. Nebo možnou příčinou tohoto jevu je příčné proudění.

S poklesem procenta otevření se chování protékající vody mění. V horní části přechodového kusu naráží voda na konci na segmentový uzávěr, hromadí se před ním a vytváří vyšší tlak na stěnu přechodového kusu. Se snížením procentem otevření se tento tlak zvyšuje vlivem nahromadění většího objemu vody, vliv nahromaděné vody dosahuje do větší vzdálenosti a tlak v profilech Tlak A, Tlak B a Tlak C se dle toho zvedá. Nižší

tlak na spodní hraně je vlivem tvaru uzávěru. Protože na konci uzávěru je umístěný výtokový otvor u spodní hrany, voda nemá překážku a vytéká bez omezení ven.

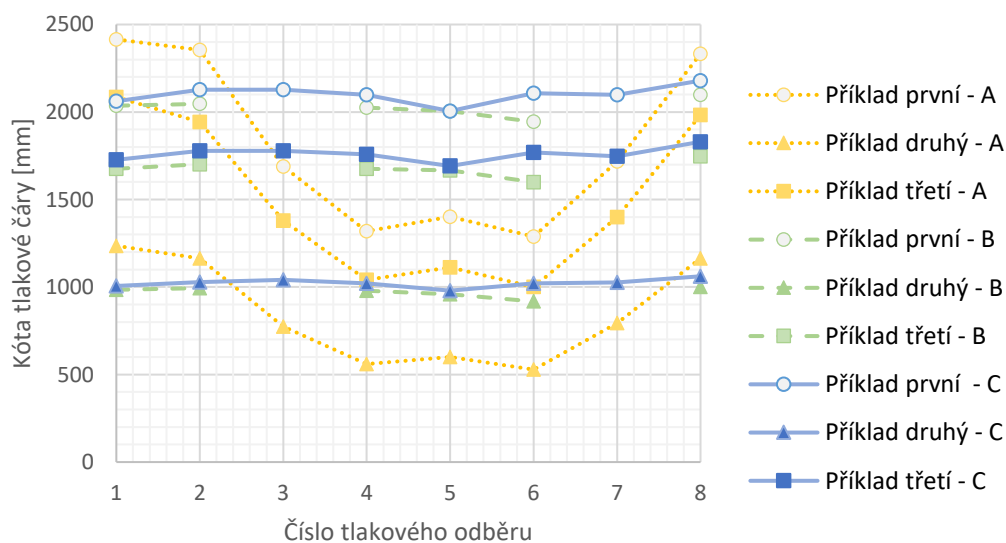
S poklesem procenta otevření se zvedá kóta tlakové čáry v každém profilu. Po délce přechodového kusu tlak klesá. Je to z důvodu, že vlivem zmenšení průtočné plochy se zrychluje rychlost v přechodovém kuse i dochází k větším ztrátám mechanické energie, a tím k poklesu tlakové čáry.

Průběh výšky tlakové čáry nad SR po obvodě kusu v profilu Tlak A, Tlak B a Tlak C pro 100 % otevření



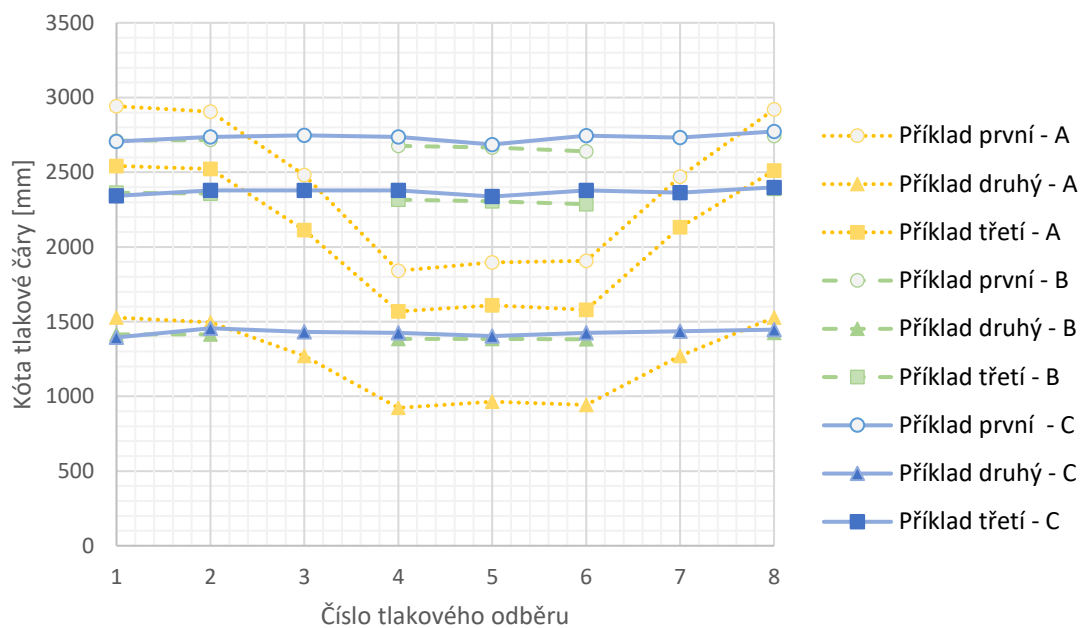
graf 20 Průběh kóty tlakové čáry nad SR po obvodě kusu v profilu Tlak A, Tlak B a Tlak C pro 100 % otevření

Průběh tlakové čáry po obvodě kusu v profilu Tlak A, Tlak B a Tlak C pro 75 % otevření



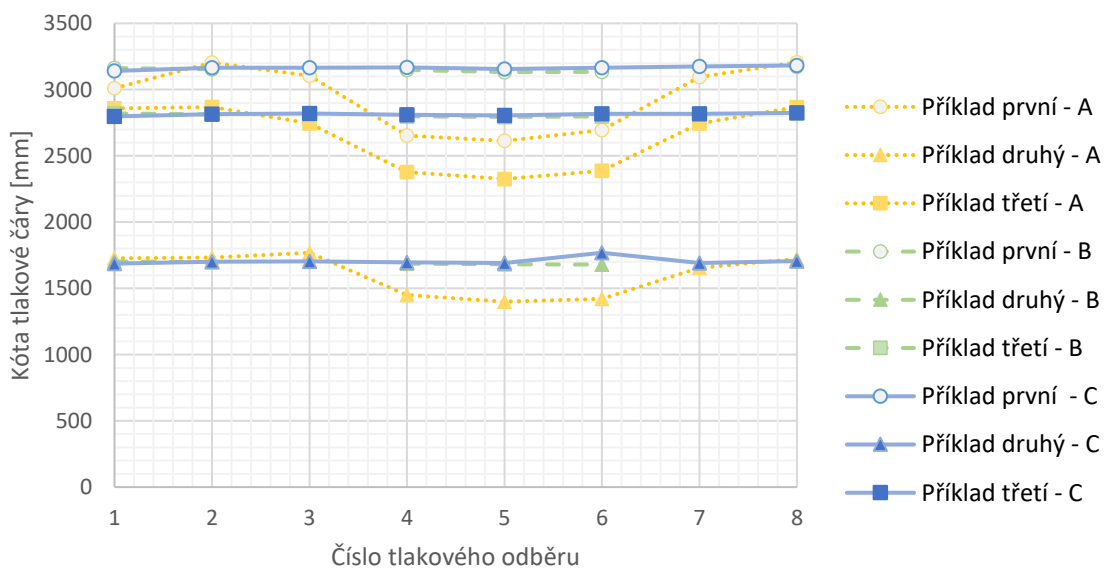
graf 21 Průběh kóty tlakové čáry nad SR po obvodě kusu v profilu Tlak A, Tlak B a Tlak C pro 75 % otevření

### Průběh tlakové čáry po obvodě kusu v profilu Tlak A, Tlak B a Tlak C pro 50 % otevření

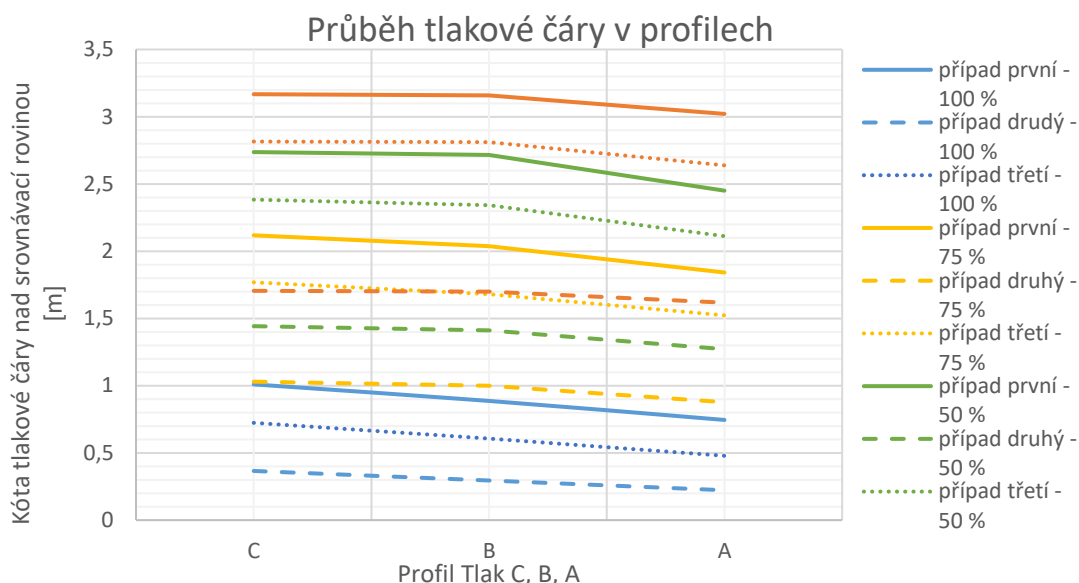


graf 22 Průběh kóty tlakové čáry nad SR po obvodě kusu v profilu Tlak A, Tlak B a Tlak C pro 50 % otevření

### Průběh tlakové čáry po obvodě kusu v profilu Tlak A, Tlak B a Tlak C pro 25 % otevření



graf 23 Průběh kóty tlakové čáry nad SR po obvodě kusu v profilu Tlak A, Tlak B a Tlak C pro 25 % otevření

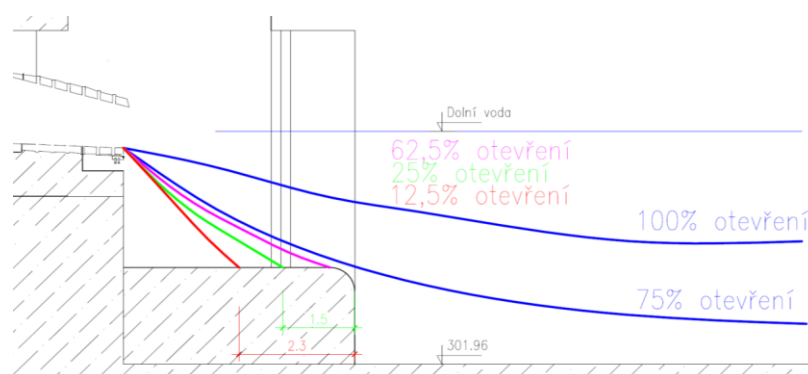


graf 24 Průběh tlakové čáry v profilech

## 5.7. Postřehy

Vlivem tvaru přechodového kusu dochází k naklonění výtokového paprsku směrem ke dnu a k rozšíření výtokové paprsku po stranách. Při snížení procenta otevření segmentového uzávěru se náklon výtokového paprsku více snižuje směrem ke dnu, až v jedné chvíli se spodní hrana výtokového paprsku dotkne stupně provizorní hradící konstrukce. Pro 100 % a 75 % otevření výtokový paprsek dopadá nad stupeň a tlumí se o rozrážeč umístěný ve vývaru. Mezi 75 % a 50 % otevření dolní hrana výtokového paprsku dosáhne hrany stupně. Mezi 50 % a 25 % spodní hrana výtokového paprsku dopadá už na hranu stupně. Pro všechna otevření segmentového uzávěru je výtokový paprsek tlumen buď přímo, nebo po odrazu ode dna vývaru o rozrážeč.

Výtokový paprsek je dále ovlivněn i hladinou vody ve vývaru. Při postupném zatápění výtokové otvoru dochází k tvorbě vírů po stranách. Občas dochází k náhlým vytrysknutím výtokového paprsku doplněnému zvukem připomínající chrochtání. K těmto situacím dochází až od určitého zatopení výtokové paprsku a do určité hloubky vody ve vývaru.



Obrázek 38 Výtokový paprsek [8]





*Obrázek 39 Ukázka víru*



*Obrázek 40 Ukázka víru u výtokového otvoru nalevo*



*Obrázek 41 Ukázka snížení hladiny vlivem výtoku, tvorba víru*

## 6. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo hydraulické posouzení nově navrhovaného koncového segmentového uzávěru spodní výpusti. Nově navrhovaný koncový segmentový uzávěr se skládá ze dvou částí – z konfuzorového kusu a hradící konstrukce segmentu. Poněvadž hydraulicky nelze od sebe oddělit jednotlivé části, posuzuje se koncový uzávěr jako jeden celek. Bakalářská práce se především zaměřila na posouzení výtokového součinitele tohoto koncového uzávěru při různých úrovních hladin.

Na fyzikálním modelu dle hladiny dolní vody dochází ke třem typům výtoku – nezatopený (dokonalý) výtok, částečně zatopený výtok a zatopený (nedokonalý) výtok. Sada stavů nepokrývá dostatečně všechny situace výtoku. Nejrozsáhleji je zastoupena situace zatopený výtok, poté částečně zatopený výtok a nejméně nezatopený výtok, který neobsahuje všechna procenta otevření. Hodnota výtokové součinitele pro 38,5 % otevření uzávěru je z vyhodnocení vyřazeno z důvodu vybočení bodu od vykreslené křivky závislosti výtokového součinitele na procentu otevření segmentového uzávěru.

Při interpretaci výtokového součinitele je výhodnější použít graf závislosti na bezrozměrné veličině, protože lze graf použít jak pro fyzikální model, tak i pro skutečnou stavbu bez přepočtu hodnot dle pravidel podobnosti z reálné stavby na fyzikální model. Výtokový součinitel je závislý především na procentu otevření segmentového uzávěru. Vykreslená křivka závislosti výtokového součinitele na procentu otevření segmentového uzávěru má tvar paraboly. Pro 50 % otevření nabývá výtokový součinitel nejnižší hodnoty. Se zvýšením nebo se snížením procenta otevření se výtokový součinitel zvyšuje. Průměrná hodnota výtokového součinitele se pohybuje pro 100 % otevření segmentového uzávěru v rozmezí 0,967 až 0,972, pro 87,5 % otevření uzávěru nabývá hodnoty 0,907, pro 75 % otevření uzávěru je 0,835 a pro 62,8 % otevření činí 0,835. Průměrná hodnota výtokového součinitele pro 25 % je 0,848 a pro 12,5 % činí 0,907. Z výsledků výtokového součinitele plyne, že hodnoty výtokové součinitele pro jednotlivé typy výtoků nabývají podobných hodnot. Z toho vyplývá, že výtokový součinitel není závislý na dolní podmínce hladiny vody ve vývaru.

Výtokový součinitel nabývá vyšší hodnoty než výtokový součinitel pro uzávěr stavidla nebo pro segmentový uzávěr umístěného opačně než navrhovaný segmentový uzávěr. Při naklonění stavidla nebo segmentového uzávěru více po vodě nabývá výtokový součinitel sice podobných hodnot, ale je stále o něco vyšší. Důvodem toho je tvar

konfuzoru, neboť pravděpodobně dochází k menšímu zúžení výtokového paprsku a k menším ztrátám mechanické energie. Hodnota výtokového součinitele pro otevření 75 % až 25 % se podobá hodnotě výtokového součinitele pro otvor s plynulým bočním usměrněním  $\mu = 0,80 - 0,85$ .

Závislost výtokového součinitele na Reynoldsově čísle poukázala na to, že hodnota výtokového součinitele se zvýšením Reynoldsova čísla roste pro dané procento otevření uzávěru. V odborné literatuře *Hydraulika* [11] je uveden na straně 205 graf, ze kterého vyplývá, že pro kruhový výtokový otvor nabývá výtokový součinitel konstantní hodnoty při hodnotě Reynoldsova čísla nad  $10^5$ . Protože přechodový kus mění pozvolna tvar z kruhového profilu na obdélníkový profil a zároveň Reynoldsovo číslo nabývá hodnoty nad  $10^5$ , může zde existovat určitá podobnost s uvedeným případem. Pak by výtokový součinitel opravdu nezávisel na Reynoldsově čísle.

Předpoklad volby stanovení výtokového součinitele nese s sebou riziko, že podobně jako součinitel ztráty třením může být součinitel ztráty místní pro koncový uzávěr (odvozený z výtokového součinitele) závislý na Reynoldsově čísle. Pro vyloučení rizika by bylo vhodné provést měření na fyzikálním modelu s jiným měřítkem a hodnoty součinitelů ztráty místní (popřípadě výtokového součinitele) porovnat.

Citlivostní analýza vstupních dat ukázala, že chyba výtokové součinitele vzniká nejvíce vlivem chyby průtoku, poté rovnocenně chybou hladiny dolní vody a chybou kóty tlakové čáry a nejméně chybou součinitele ztráty třením. Kombinací chyb změřených veličin zatížených chybou nabývá chyba výtokového součinitele hodnoty cca 1,2 %.

Během zpracování souboru dat se zjistilo, že nebyla změřena hloubka vody v těsné blízkosti koncového uzávěru. Hloubka vody v tomto místě se stanovila zpětně z pořízené foto a video dokumentace. Dále se zjistilo, že Thomsonův měrný přeliv v modrém tělese nespĺňuje podmínky platnosti Thomsonovy rovnice pro průtok. Pro výpočty se použil průtok ze záznamu průtokoměru.

V bakalářské práci se dále provedla kontrola změřených přetlaků, která potvrdila, že navrtané tlakové odběry jsou správné a že změřené přetlaky tlakoměrnou sondou lze použít. Vykreslením průběhu tlaků po obvodě příčného profilu Tlak B a Tlak C pro všechna procenta otevření uzávěru se zjistilo, že v profilu Tlak C a Tlak B se průběh křivky chová obráceným způsobem než by se očekávalo. Možnou příčinou je tvar přechodového kusu nebo případně vznik příčné rychlosti. Rozdíl tlaků po obvodě těchto

dvou příčných profilů se s poklesem otevření uzávěru snižuje. S poklesem procenta otevření se voda zarazí o hradící konstrukci segmentu, hromadí se před ní a vytváří zvýšený tlak na stěnu přechodového kusu na horní hranu konfuzoru. Během experimentu se zjistilo, že při zatopení výtokového otvoru dochází k vytvoření vírů a že výtokový paprsek je s poklesem otevření segmentové hradící konstrukce snižován směrem ke dnu, až se dotkne mezi otevřením 75 % - 50 % stupně provizorní hradící konstrukce.

## 7. Citovaná literatura

- [1] BROŽA, Vojtěch. *Přehrady Čech, Moravy a Slezska*. Liberec: Knihy 555, 2005. ISBN 80-866-6011-7
- [2] HRUBAN, Robert. Dyje. In: Moravske-Karpaty.cz [online] Halenkovice, 2.3.2015 [cit. 2020-05-14] Dostupné z: <http://moravske-karpaty.cz/prirodni-pomery/hydrografie/dyje/>
- [3] *Závod Dyje*. In: POVODÍ MORAVY: O podniku [online] Povodí Moravy, s.p., 2020 [cit. 2020-05-13] Dostupné z: <http://www.pmo.cz/cz/o-podniku/zavod-dyje/>
- [4] VÁGNER, Jiří. *Manipulační řád pro VD Vranov na řece Dyji v km 175.405*. Brno: Povodí Moravy, s.p. vodohospodářský dispečink, 2011
- [5] *80 let vodního díla Vranov 1934 -2014*. In: Povodí Moravy [online] Brno: Povodí Moravy, s.p., 2014 [cit. 2020-05-14] Dostupné z: <http://www.pmo.cz/download/mimoradna-priloha-nahled.pdf>
- [6] *Rekonstrukce vranovské hráze bude dokončena včas podle plánu*. In: POVODÍ MORAVY: Pro média - tiskové zprávy [online] Povodí Moravy, s.p., 2020, 14. prosince 2018 [cit. 2020-05-13] Dostupné z: <http://www.pmo.cz/cz/media/tiskove-zpravy/rekonstrukce-vranovske-hraze-bude-dokoncena-vcas-podle-planu/>
- [7] *VD Vranov*. In: POVODÍ MORAVY: O podniku, Vodní díla [online] Povodí Moravy, s.p., c2010-2020, 1/2012 [cit. 2020-05-13] Dostupné z: <http://www.pmo.cz/cz/o-podniku/vodni-dila/vranov/>
- [8] HLOM, Jan et al. *VD Vranov – rekonstrukce regulačních uzávěrů SV, fyzikální model*. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T.G.Masaryka, 2019. ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA
- [9] ČÁBELKA, Jaroslav a Pavel GABRIEL. *Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice*. Praha: Academia, 1987
- [10] *OPTISONOC 6300 P - Technical Datasheet: Portable ultrasonic clamp-on flowmeter*. Duisburg (Germany): KROHNE (contact: [www.krohne.com](http://www.krohne.com)), 03/2013. ISSN 4000950303.
- [11] KOLÁŘ, Václav, Cyril PATOČKA a Jiří BÉM. *Hydraulika*. Praha: SNTL, 1983
- [12] HAVLÍK, Vladimír a Ivana MAREŠOVÁ. *Hydraulika: příklady*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-010-1586-6.
- [13] KOLÁŘ, Václav. *Hydraulika*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966. Technický průvodce.
- [14] I.E.IDELCHIK, Greta R. MALYAVSKAYA a Oleg M. MARTYNENKO, M.O.STEINBERG, ed. *Handbook of hydraulic resistance*. 3rd Edition. Mumbai: Jaico Publishing House, 2008. ISBN 81-7992-118-2

- [15] HAVLÍK, Aleš a Tomáš PICEK. *Fyzikální vlastnosti potrubí* (přednáška): *Hydraulika 2*. Praha: České vysoké učení technické, Fakulta stavební, Katedra hydrauliky a hydrologie. [cit. 2020-05-13] Dostupné také z: [http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke\\_stazeni/cviceni/TABULKY\\_HY2V.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/cviceni/TABULKY_HY2V.pdf)
- [16] HAVLÍK, Aleš a Tomáš PICEK. *Hydraulika potrubí* (přednáška): *Hydraulika 2*. Praha: České vysoké učení technické, Fakulta stavební, Katedra hydrauliky a hydrologie, 68 s. [cit. 2020-05-13] Dostupné také z: [http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HYAR/ke\\_stazeni/prednasky/HYAR\\_pr\\_04.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HYAR/ke_stazeni/prednasky/HYAR_pr_04.pdf)
- [17] LÍSKOVEC, Ladislav. *Výzkum spodních výpustí přehrad*. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský, 1961. Práce a studie (Výzkumný ústav vodohospodářský)
- [18] *Povodí Moravy, s.p. podalo návrh na nařízení předběžného opatření proti panu Balíkovi na vyklizení pozemků VN Vranov*. In: POVODÍ MORAVY: Pro média, Aktuality [online]. Povodí Moravy, s.p., c2010-2020, 13. dubna 2015 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <http://www.pmo.cz/cz/media/aktuality/povodi-moravy-s-p-podalo-navrh-na-narizeni-predbezneho-opatreni-proti-panu-balikovi-na-vyklizeni-pozemku-vn-vranov/>
- [19] Slepá mapa ČR: Slepá mapa krajů ČR. In: Mapa České republiky [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <http://www.mapaceskerepubliky.cz/slepa-mapa-cr>.
- [20] I. CHARAKTERISTIKY DÍLČÍHO POVODÍ DYJE. In: Plán dílčího povodí Dyje [online]. Povodí Moravy, s.p., c2016 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: [http://pop.pmo.cz/download/web\\_PDP\\_Dyje\\_kraje/kapitola-i/kapitola-i.htm](http://pop.pmo.cz/download/web_PDP_Dyje_kraje/kapitola-i/kapitola-i.htm)
- [21] KRATOCHVÍL, Libor: *Sedimentárně-geologické studium sedimentů Vranovské přehrady*. In: Infomační systém Masarykovu univerzity. Závěrečná práce, 4. 27 2011. [Citace: 4. 4 2020.] Dostupné z: [https://is.muni.cz/th/q724x/reserse\\_kratochvil.pdf](https://is.muni.cz/th/q724x/reserse_kratochvil.pdf)
- [22] *Vranovská přehrada - Jak vzniklo toto vodní dílo: Království v srdci moravského jadrana*. In: Vranovsko.cz [online]. Miroslav: Vranovsko.cz - Turistický informační server - komplexní informace o Vranovsku a Podýjí, 2012 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <http://www.vranovsko.cz/vranovska-prehrada-jak-vzniklo-toto-vodni-dilo/>

[Pozn] Fotografie fyzikálního modelu jsou pořízeny během experimentu v rámci výzkumu proběhlého ve VÚV TGM, v.v.i. Autorem foto a video dokumentace jsou: Ing. Jan Hlom a Veronika Táboříková.

[Pozn] Výkresová dokumentace v Příloze 1 - 12 je vytvořena na základě poskytnutého materiálu z výzkumu na fyzikální modelu proběhlého v roce 2019 ve veřejné instituci VÚV TGM, v.v.i.. Dále byla poskytnuta k vypracování této bakalářské práce Závěrečná zpráva výzkumu, soubor dat s naměřenými údaji a foto i video dokumentace. Informace obsažené v této bakalářské práci týkající se výzkumu je možné použít po písemném souhlasu oprávněné osoby z VÚV TGM, v.v.i..

## 8. Seznam obrázků

Obrázek 1 VD Vranov [18] a mapa ČR mapa [19] .....	14
Obrázek 2 Fyzikální model Vodní dílo Vranov - Spodní výpust s koncovým regulačním segmentovým uzávěrem .....	19
Obrázek 3 Prostorový model hrázového tělesa .....	19
Obrázek 4 Přívod vody .....	20
Obrázek 5 Thomsonův měrný přeliv .....	20
Obrázek 6 Horní nádrž - pohled z vnějšku .....	21
Obrázek 7 Horní nádrž - pohled dovnitř .....	21
Obrázek 8 Část potrubí spodní výpusti – šoupě, profil Tlak D .....	22
Obrázek 9 Konfuzorový přechodový kus.....	22
Obrázek 10 Ovládací panel s popisem .....	24
Obrázek 11 Tlakoměrná sonda.....	24
Obrázek 12 Pracovní stůl – notebook, ovládací panel a vyhodnocovací jednotka průtokoměru .....	24
Obrázek 13 Princip průtokoměru (uváděný výrobcem) [10] .....	25
Obrázek 14 Lišta se senzory na potrubí spodní výpusti .....	25
Obrázek 15 Měrný válec s hrotovým měřítkem.....	26
Obrázek 16 Číselná stupnice na šachtě.....	26
Obrázek 17 Číselná stupnice ve vývaru.....	26
Obrázek 18 Fyzikální model – Vyznačené profily .....	31
Obrázek 19 Ztráty místní.....	33
Obrázek 20 Svislý řez česlemi.....	33
Obrázek 21 Pohled na česle ve směru proudění.....	33
Obrázek 22 Pohled na česle .....	34
Obrázek 23 Parametry česlic a rozteče .....	34
Obrázek 24 Řez nátokovým kusem .....	35
Obrázek 25 Řez šoupětem .....	35
Obrázek 26 Koncový uzávěr - detail a názvosloví (pro x % otevření).....	37
Obrázek 27 Výtokový otvor - detail + názvosloví (pro x % otevření) .....	37
Obrázek 28 Fyzikální model - názvosloví- horní šachta + délka potrubí .....	39
Obrázek 29 Profily .....	42
Obrázek 30 Detail výtokového paprsku .....	42
Obrázek 31 Výtokový otvor – detail + názvosloví .....	43
Obrázek 32 Možnosti výtoku dle hladiny dolní vody .....	43
Obrázek 33 Výtokový otvor – detail + názvosloví .....	47
Obrázek 34 Příklad .....	51
Obrázek 35 Závislost výtokového součinitele (svislá osa) na výšce otevření výtokového otvoru spodní výpusti v metrech [17].....	62
Obrázek 36 Závislost výtokového součinitele na procentu otevření segmentového uzávěru [11] .....	68
Obrázek 37 Závislost výtokového součinitele na procentu otevření stavidla [11] .....	68
Obrázek 38 Výtokový paprsek [8] .....	84
Obrázek 39 Ukázka víru.....	85
Obrázek 40 Ukázka víru u výtokového otvoru nalevo .....	85
Obrázek 41 Ukázka snížení hladiny vlivem výtoku, tvorba víru .....	85
Obrázek 42 Spodní výpust - potrubí mezi Horní nádrží a vývarem.....	107
Obrázek 43 Horní nádrž a přívod vody - jiný pohled.....	107
Obrázek 44 Koncový uzávěr bez/s segmentovým uzávěrem.....	107

Obrázek 45 Spodní výpust část (šoupě, profil Tlak D), začátek konfuzoru .....	108
Obrázek 46 Vývar .....	108
Obrázek 47 Výstavba [22].....	108
Obrázek 48 Výstavba [22].....	109
Obrázek 49 Výstavba [22].....	109
Obrázek 50 VD Vranov [22] .....	109
Obrázek 51 Zatopený výtok.....	110
Obrázek 52 Zatopený výtok.....	110
Obrázek 53 Částečně zatopený výtok pro 100 % .....	110
Obrázek 54 Částečně zatopený výtok pro 75 % .....	111
Obrázek 55 Částečně zatopený výtok pro 50 % .....	111
Obrázek 56 Nezatopený výtok pro 25 % .....	111
Obrázek 57 Zatopený výtok pro 25 % .....	112
Obrázek 58 Nezatopený výtok pro 100 % .....	112

## 9. Seznam tabulek

Tabulka 1 Technické parametry [4].....	15
Tabulka 2 Technické parametry [4].....	16
Tabulka 3 Technické parametry [4].....	16
Tabulka 4 Technické parametry [4] .....	16
Tabulka 5 Technické parametry [4].....	16
Tabulka 6 Technické parametry [7].....	17
Tabulka 7 Ověření platnosti rovnice .....	48
Tabulka 8 Vizkozita a teplota vody [16] .....	52
Tabulka 9 Shrnutí počtu změřených stavů .....	54
Tabulka 10 Charakteristika procent otevření segmentového uzávěru .....	54
Tabulka 11 Název hloubky vody v horní nádrži .....	55
Tabulka 12 Průměrná hodnota výtokového součinitele pro procento otevření segmentového uzávěru .....	61
Tabulka 13 Naměřené veličiny .....	71
Tabulka 14 Kombinace - nejnepříznivější stav .....	71
Tabulka 15 Naměřené veličiny .....	72
Tabulka 16 Kombinace – nejnepříznivější stav.....	72
Tabulka 17 Naměřené veličiny .....	72
Tabulka 18 Kombinace – nejnepříznivější stav.....	73
Tabulka 19 Kombinace .....	79
Tabulka 20 Příloha tabulka 1 .....	117
Tabulka 21 Příloha tabulka 2 .....	118
Tabulka 22 Příloha tabulka 3 .....	119
Tabulka 23 Příloha tabulka 4.....	120



## 10. Grafy

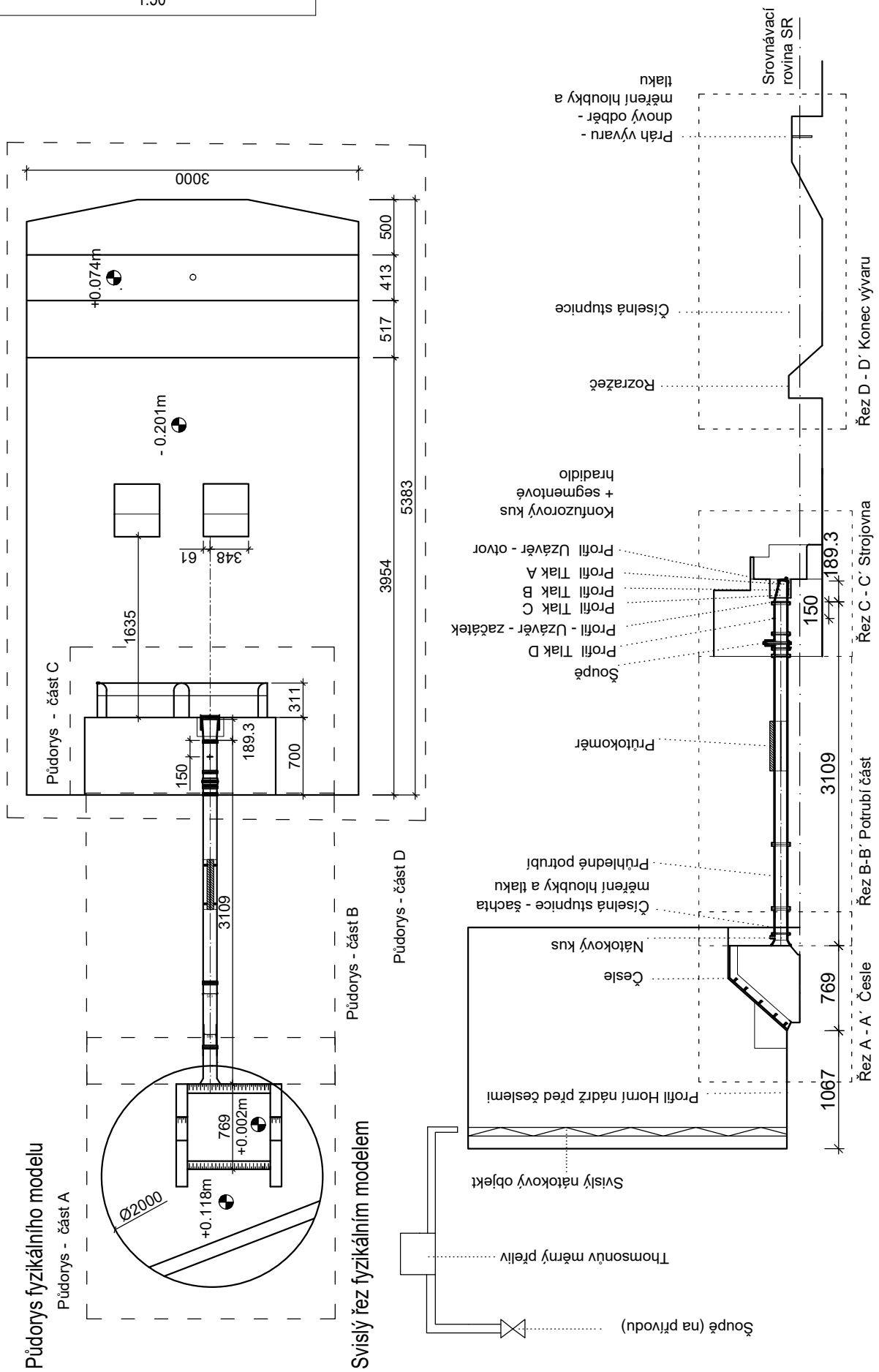
graf 1 Porovnání průtoků .....	49
graf 2 Graf závislosti průtoku na spádu .....	56
graf 3 Kontrola kóty tlakové čáry v profilu Tlak D pro všechny změřené stavy .....	58
graf 4 Závislost výtokového součinitele na průtoku .....	59
graf 5 Závislost výtokového součinitele na procentu otevření segmentového uzávěru .....	62
graf 6 Závislost výtokového součinitele na podílu průtočných ploch .....	63
graf 7 Závislost výtokového součinitele na podílu průtočných ploch .....	63
graf 8 Závislosti výtokového součinitele na Reynoldsově čísle pro začátek koncového uzávěru	64
graf 9 Závislosti výtokového součinitele na Reynoldsově čísle pro konec koncového uzávěru .	64
graf 10 Závislosti výtokového součinitele na Reynoldsově čísle pro začátek koncového uzávěru .....	65
graf 11 Závislosti výtokového součinitele na Reynoldsově čísle pro konec koncového uzávěru	65
graf 12 Závislosti výtokového součinitele na Reynoldsově čísle pro začátek koncového uzávěru .....	65
graf 13 Závislosti výtokového součinitele na Reynoldsově čísle pro konec koncového uzávěru	66
graf 14 Závislosti výtokového součinitele na Reynoldsovo čísle pro konec koncového uzávěru	66
graf 15 Závislosti výtokového součinitele na Reynoldsově čísle pro začátek koncového uzávěru .....	66
graf 16 Chyba výtokového součinitele ovlivněná chybou průtoku .....	75
graf 17 Chyba výtokového součinitele ovlivněná chybou kóty tlakové čáry .....	76
graf 18 Chyba výtokového součinitele ovlivněná chybou hladiny dolní vody .....	77
graf 19 Chyba výtokového součinitele ovlivněná chybou součinitele ztráty třením .....	78
graf 20 Průběh kóty tlakové čáry nad SR po obvodě kusu v profilu Tlak A, Tlak B a Tlak C pro 100 % otevření.....	82
graf 21 Průběh kóty tlakové čáry nad SR po obvodě kusu v profilu Tlak A, Tlak B a Tlak C pro 75 % otevření.....	82
graf 22 Průběh kóty tlakové čáry nad SR po obvodě kusu v profilu Tlak A, Tlak B a Tlak C pro 50 % otevření.....	83
graf 23 Průběh kóty tlakové čáry nad SR po obvodě kusu v profilu Tlak A, Tlak B a Tlak C pro 25 % otevření.....	83
graf 24 Průběh tlakové čáry v profilech .....	84
graf 25 Kontrola kóty tlakové čáry pro 100 % .....	114
graf 26 Kontrola kóty tlakové čáry pro 75 % .....	114
graf 27 Kontrola kóty tlakové čáry pro 50 % .....	114
graf 28 Kontrola kóty tlakové čáry pro 25 % .....	114
graf 29 Kontrola kóty tlakové čáry pro x % .....	114
graf 30 Kalibrace ukázka - graf a tabulka .....	115
graf 31 Kalibrace ukázka - graf a tabulka .....	115
graf 32 Kalibrace ukázka - graf a tabulka .....	115

## 11. Přílohy

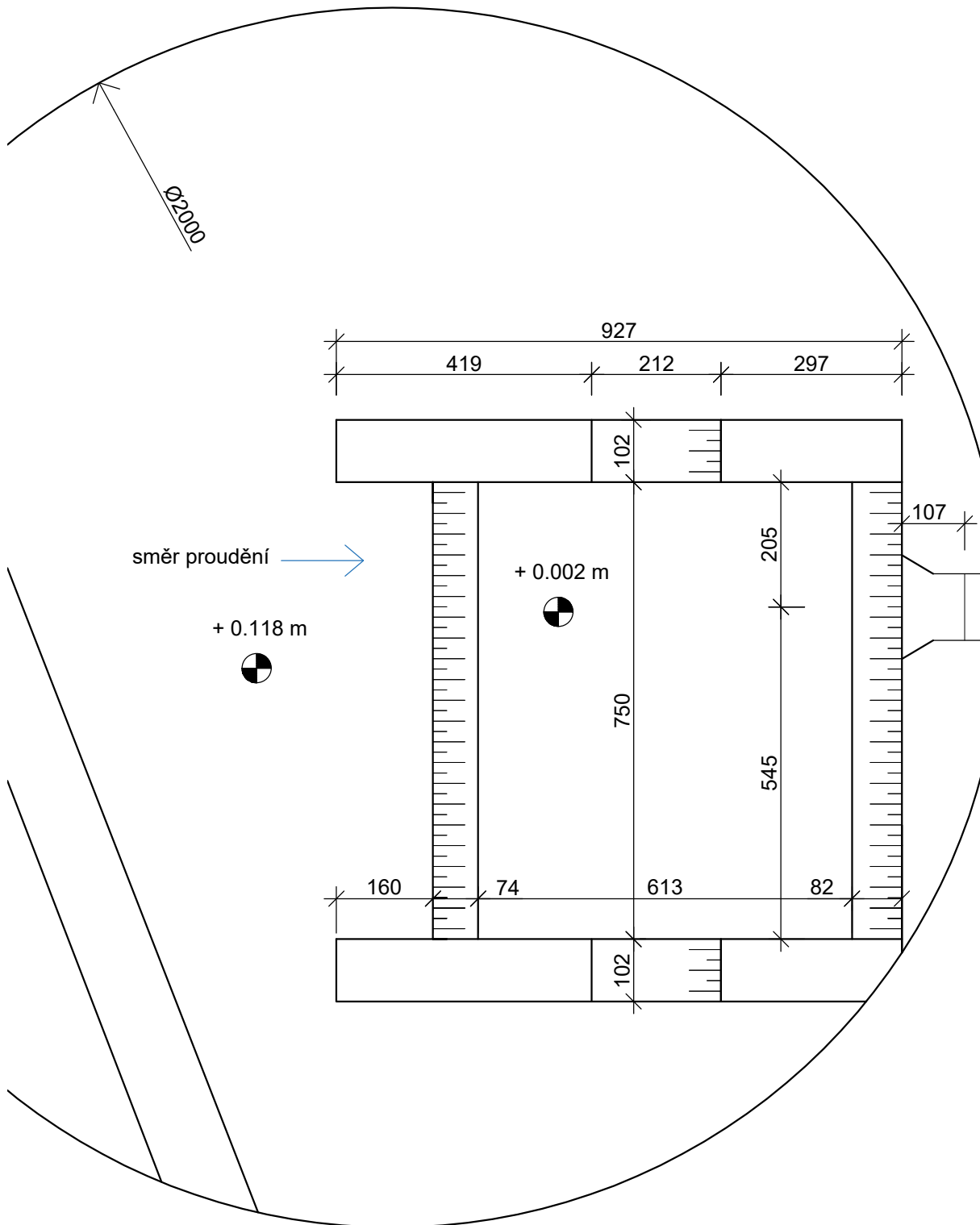
Příloha 1 Fyzikální model VD Vranov.....	95
Příloha 2 Půdorys - část A - Horní nádrž.....	96
Příloha 3 Půdorys - část C – Strojovna.....	97
Příloha 4 Půdorys a svislý řez – část spodní výpusti.....	98
Příloha 5 Půdorys a svislý řez vývar.....	99
Příloha 6 Řez česlemi.....	100
Příloha 7 Řez strojovnou.....	101
Příloha 8 Detail – Koncový uzávěr.....	102
Příloha 9 Výtokový otvor.....	103
Příloha 10 Výtokový otvor.....	104
Příloha 11 Fyzikální model VD Vranov - Názvosloví.....	105
Příloha 12 Detail armatura + Detail modré těleso.....	106
Příloha 13 Fotodokumentace – doplňující fotografie.....	107
Příloha 14 – Grafová příloha – doplňující grafy.....	113
Příloha 15 – Tabulková příloha.....	116

### Pozn.:

Výkresová dokumentace v Příloze 1 - 12 je vytvořena na základě poskytnutého materiálu z výzkumu na fyzikální modelu proběhlého v roce 2019 ve veřejné instituci VÚV TGM, v.v.i.. Informace obsažené v této bakalářské práci týkající se výzkumu je možné použít po písemném souhlasu oprávněné osoby z VÚV TGM, v.v.i..



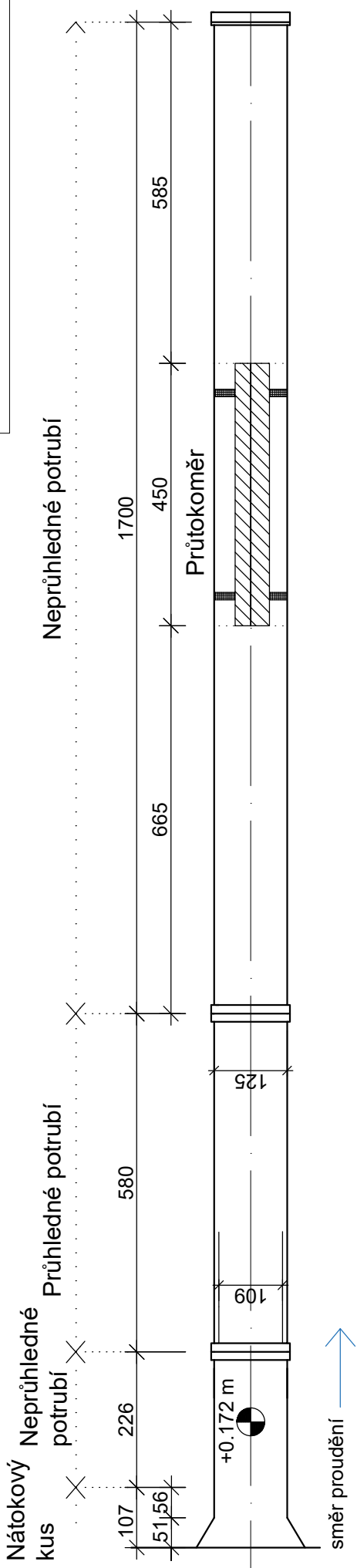
St. A - PŮDORYS NÁDVEZ (betonová sacíta)



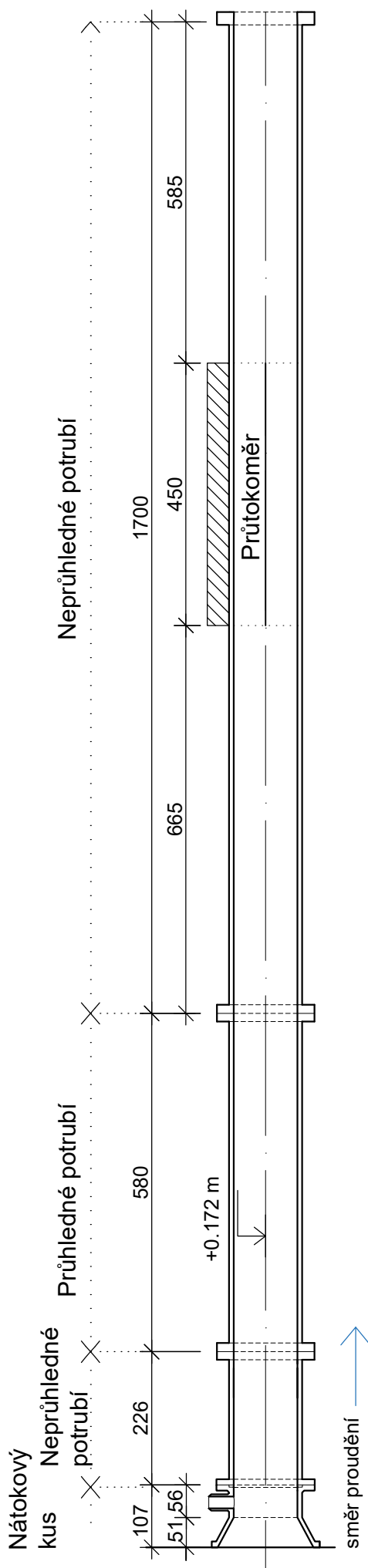


## Půdorys - část B - Potrubí spodní výpusti

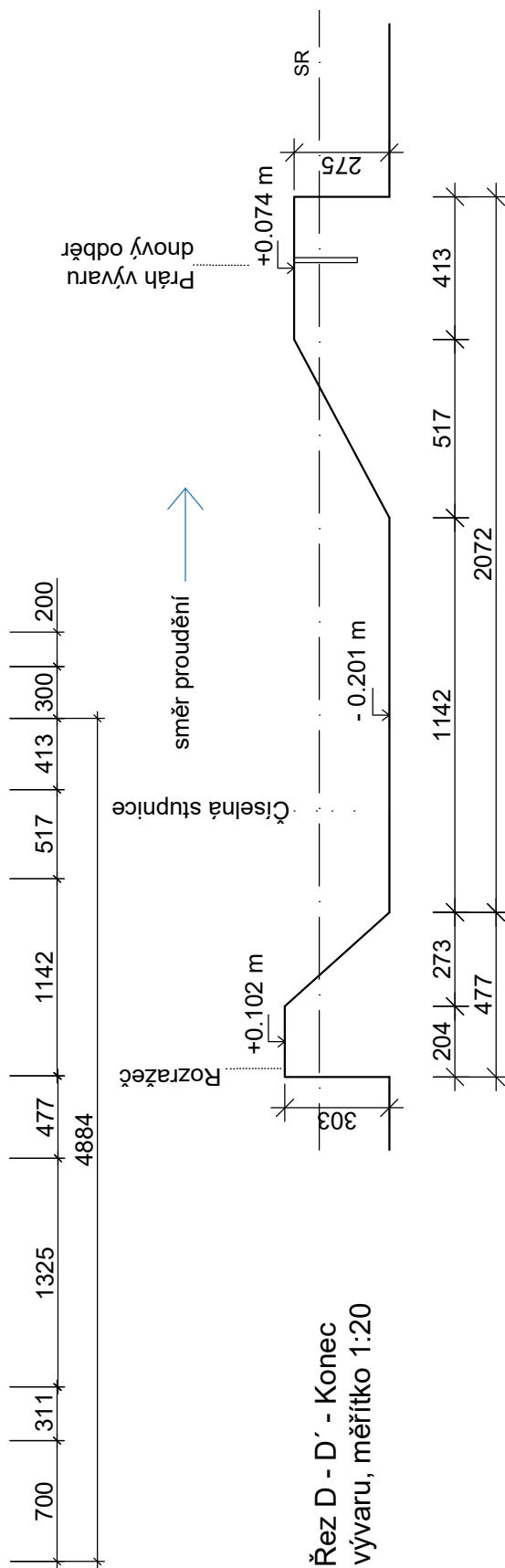
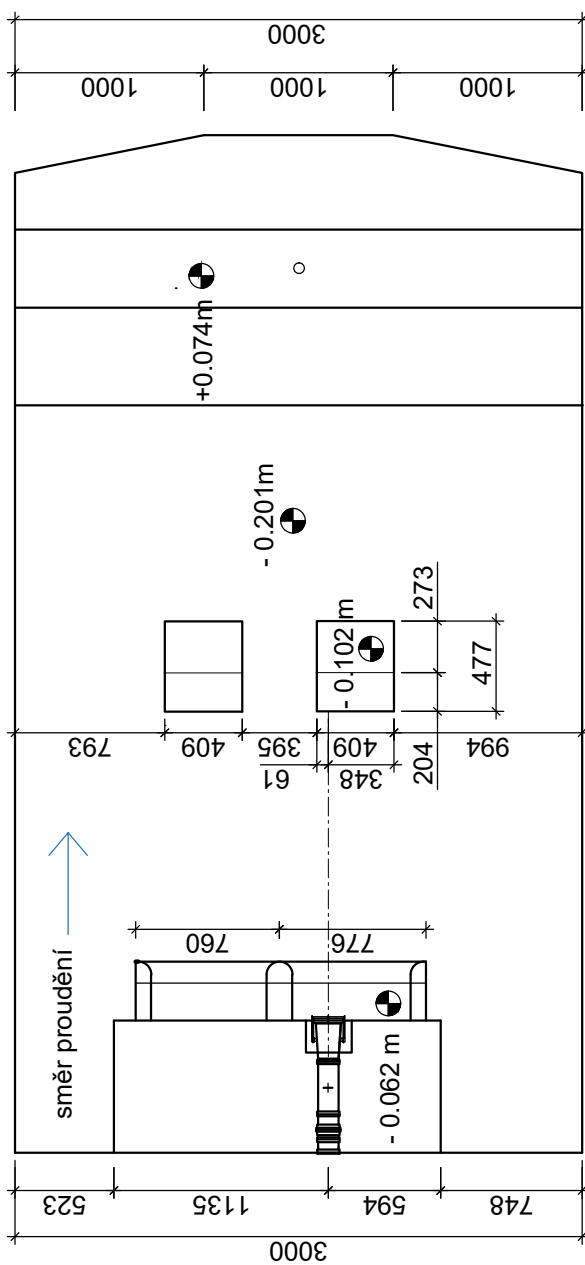
Příloha	Příloha 4 - Půdorys a svislý řez - část spodní výpusti
Měřítko	1:10



## Řez B-B' - Potrubí spodní výpusti

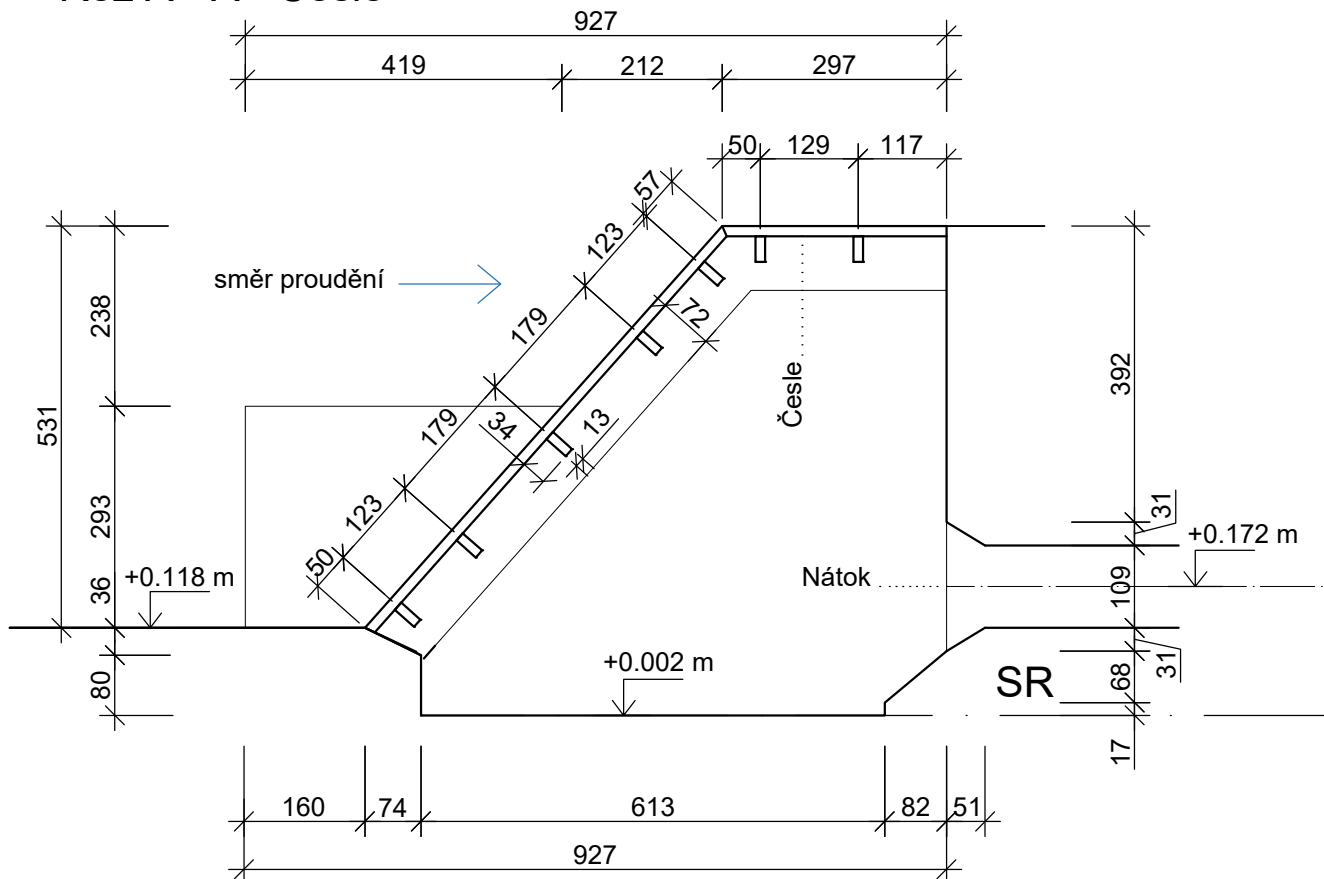


Půdorys - část D - Vývar,  
měřítko 1:40



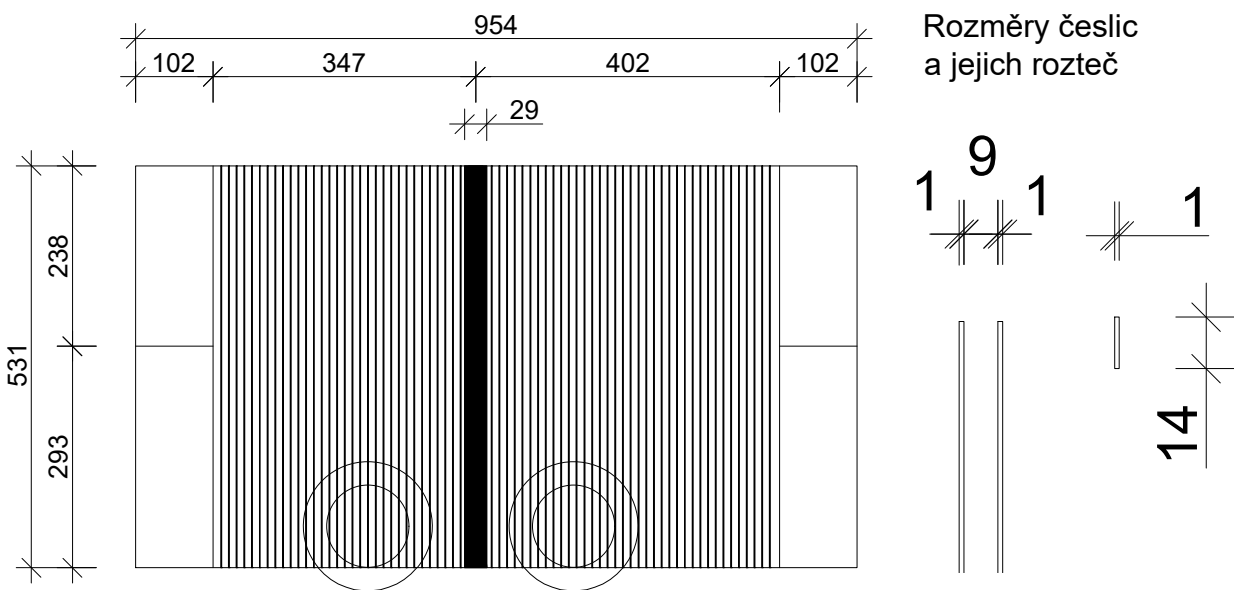
Řez D - D' - Konec  
vývaru, měřítko 1:20

### Řez A - A' Česle



### Řez E-E' - Česle

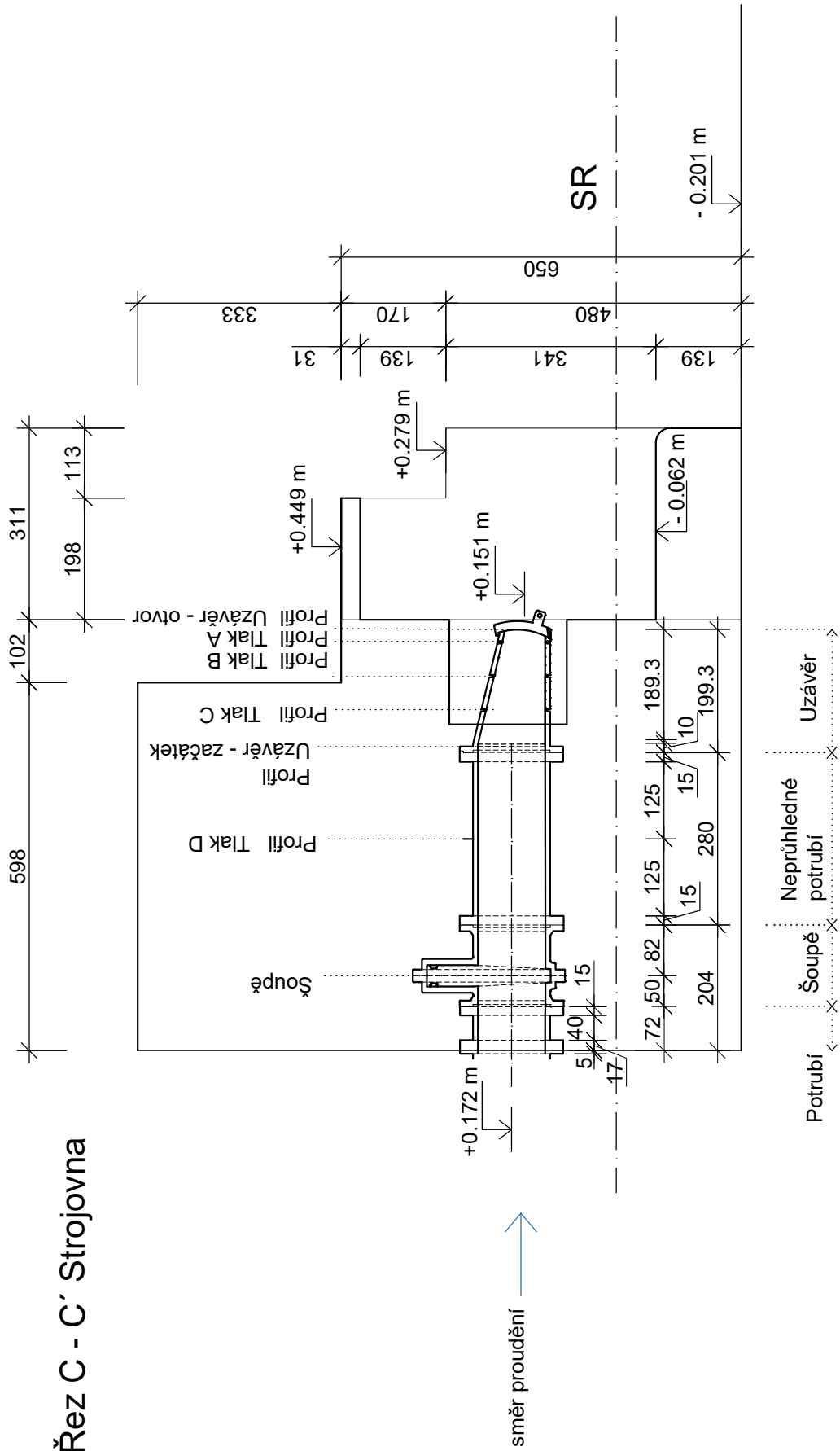
Celkem 69 česlic



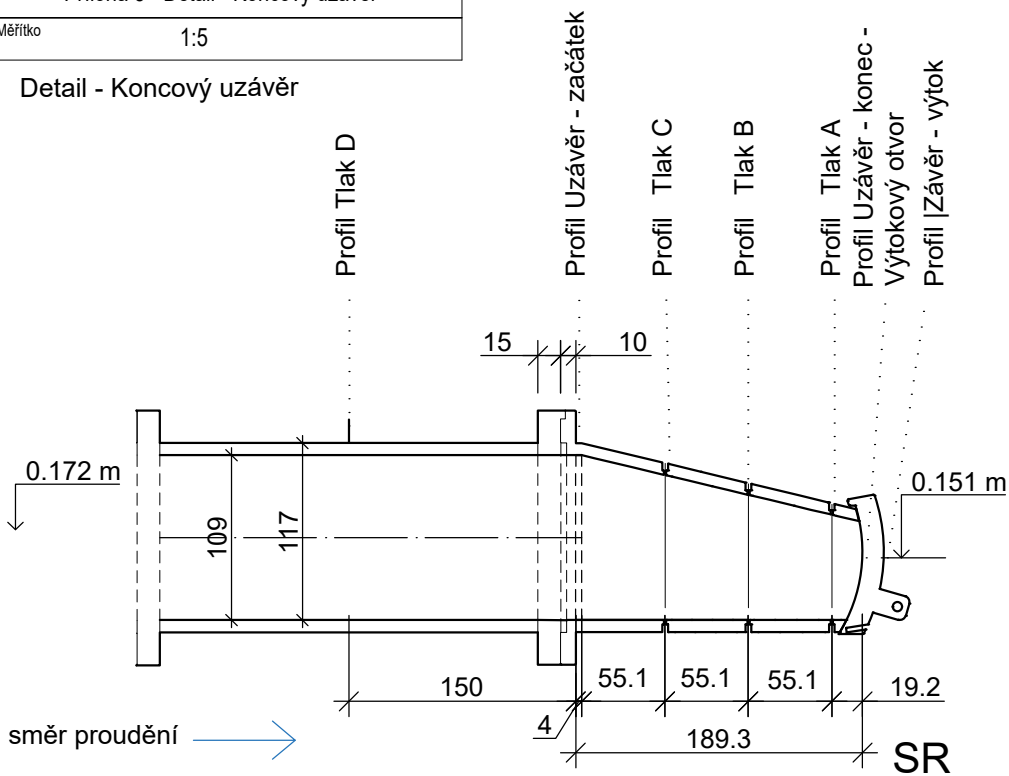


Příloha	Příloha 7 - Řez strojovnou
Měřítko	1:10

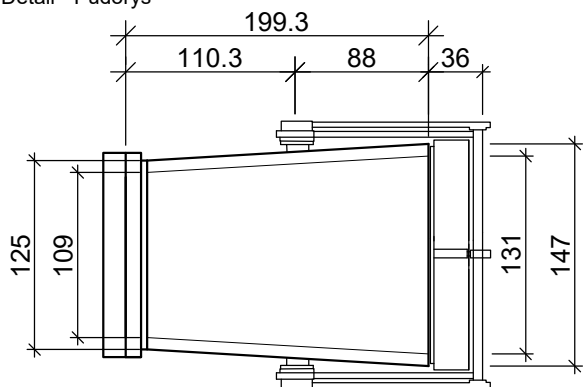
# Řez C - C' Strojovna



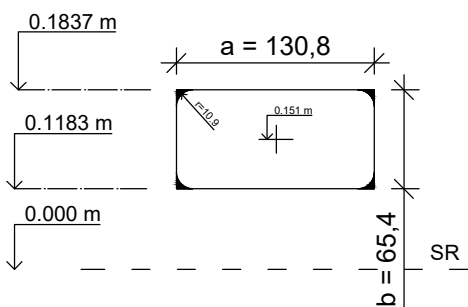
Detail - Koncový uzávěr



Detail - Půdorys



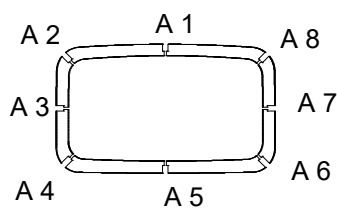
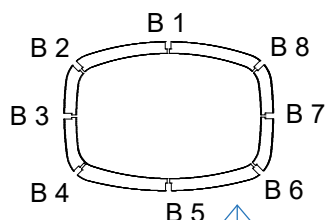
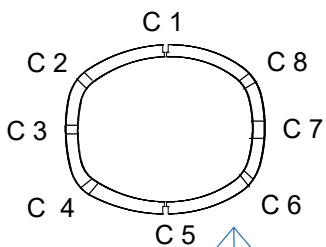
Detail - Výtokový otvor (pro 100 % otevření)



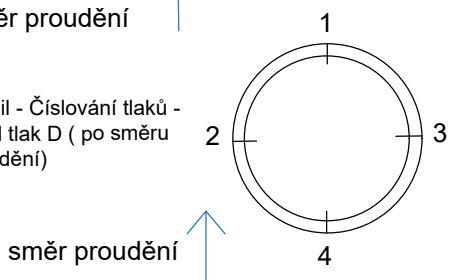
Detail - Číslování tlaků - Profil tlak C

Detail - Číslování tlaků - Profil tlak B

Detail - Číslování tlaků - Profil tlak A

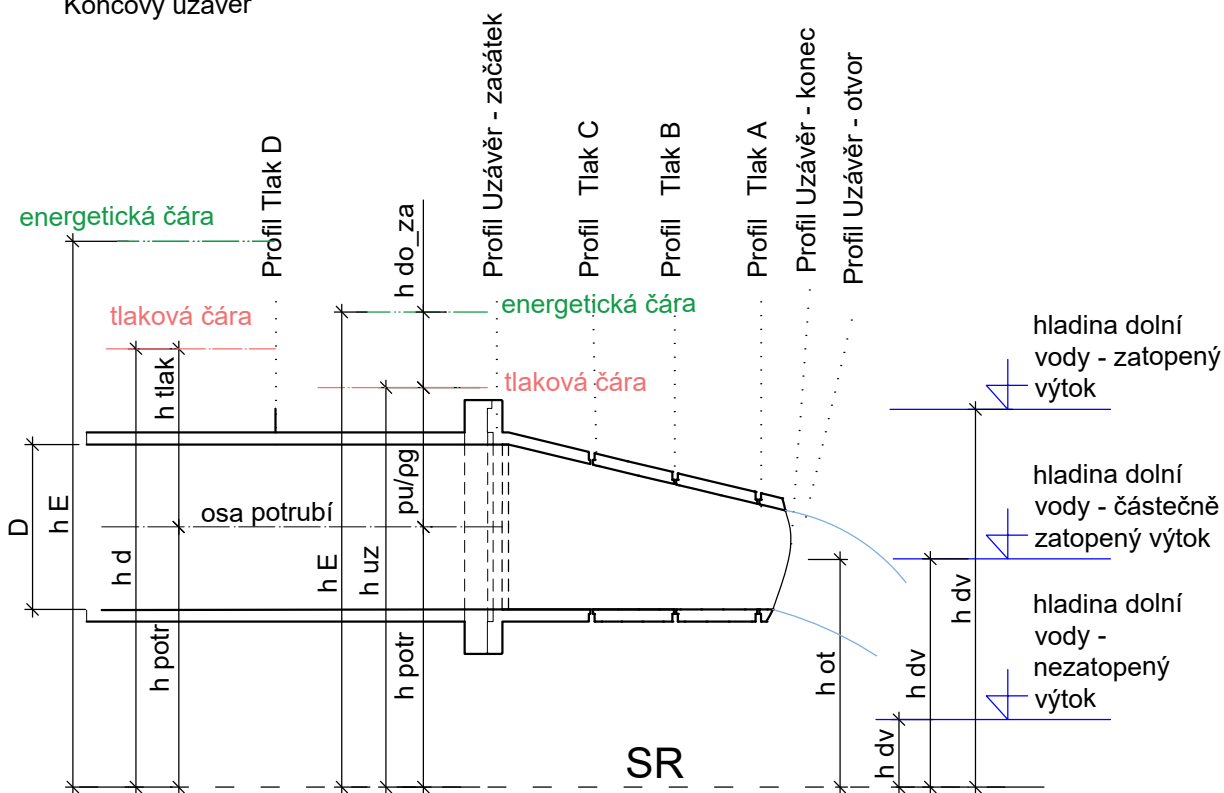


Detail - Číslování tlaků - profil tlak D (po směru proudění)



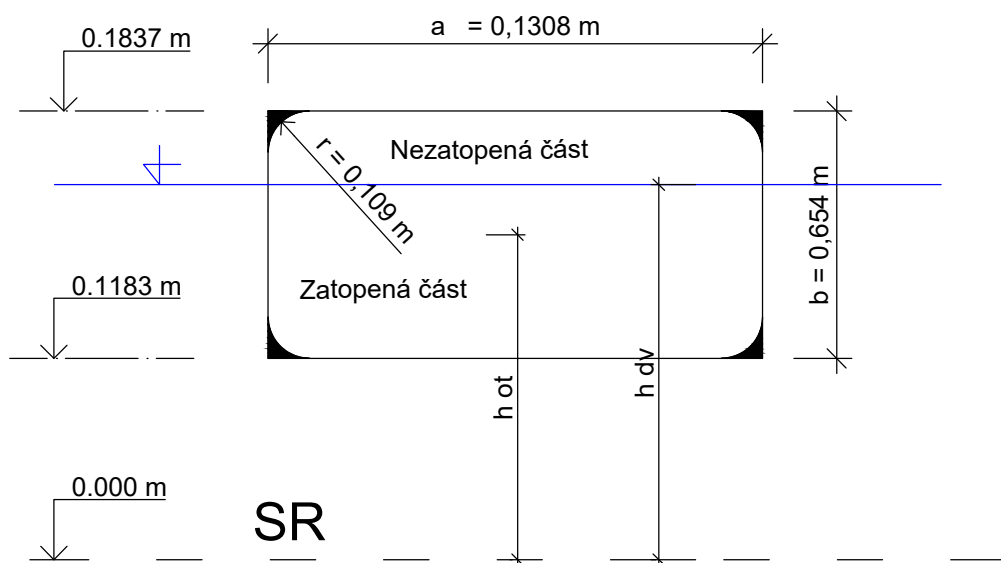
Příloha	Příloha 9 - Výtokový otvor
Měřítko	1:5, 1:2

### Koncový uzávěr

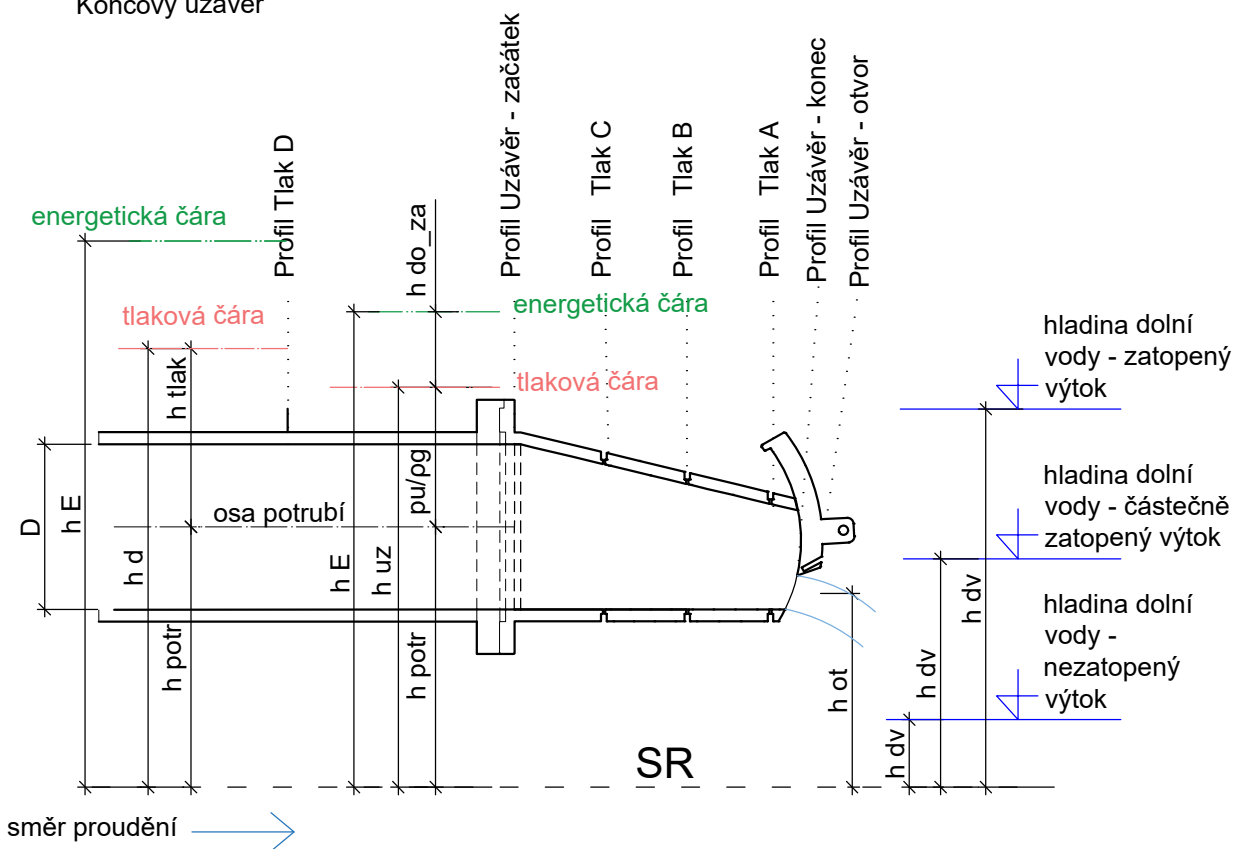


směr proudění →

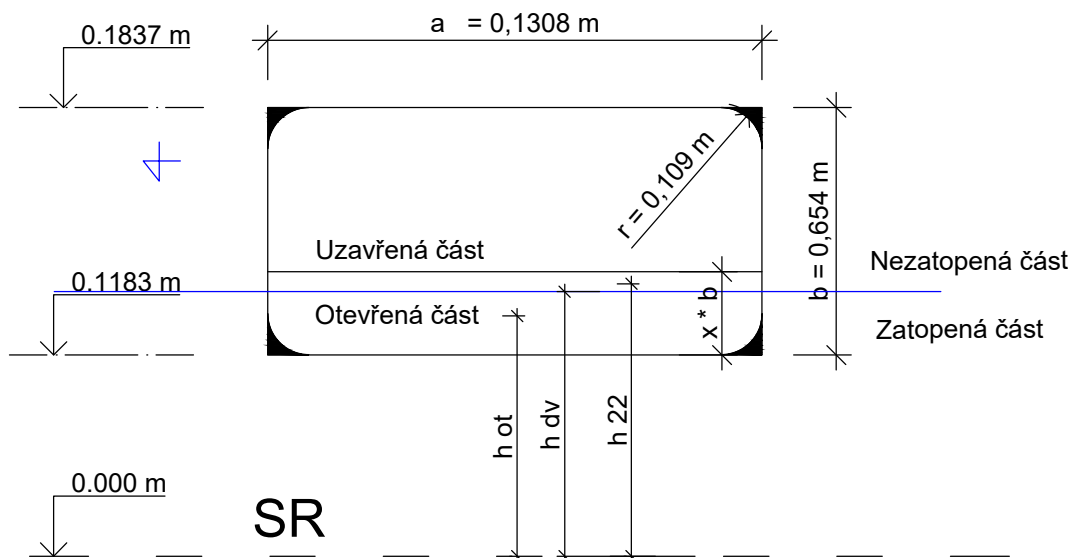
### Detail - Výtokový otvor, měřítko 1:2

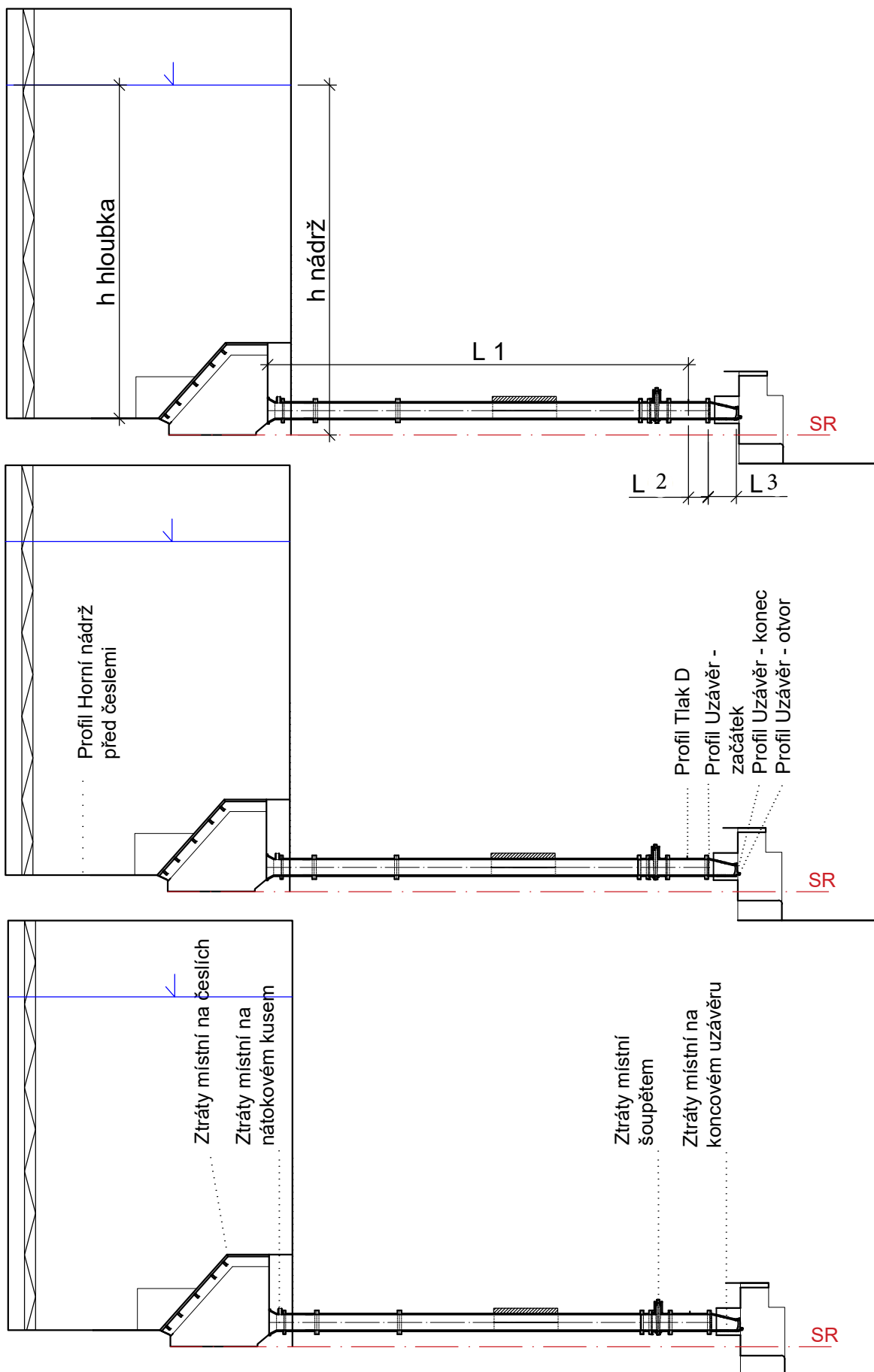


Koncový uzávěr



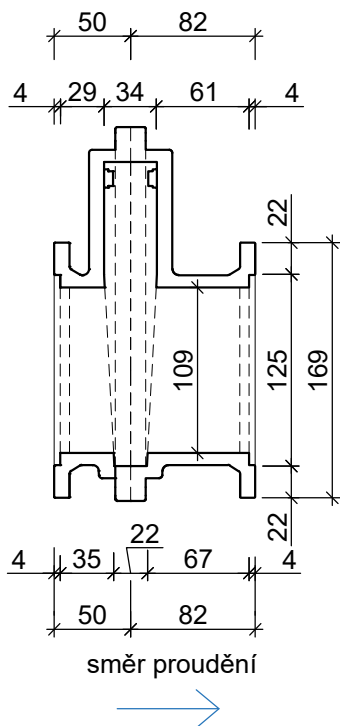
Detail - Výtokový otvor, měřítko 1:2





Detail - armatura - měřítko 1:5

Detail - Šoupě (vnitřní rozměry)



Detail - Nátokový kus

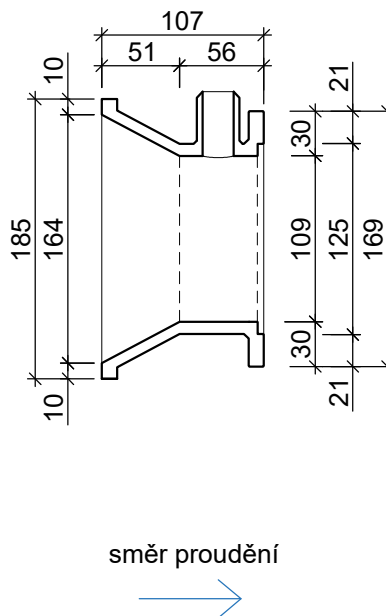
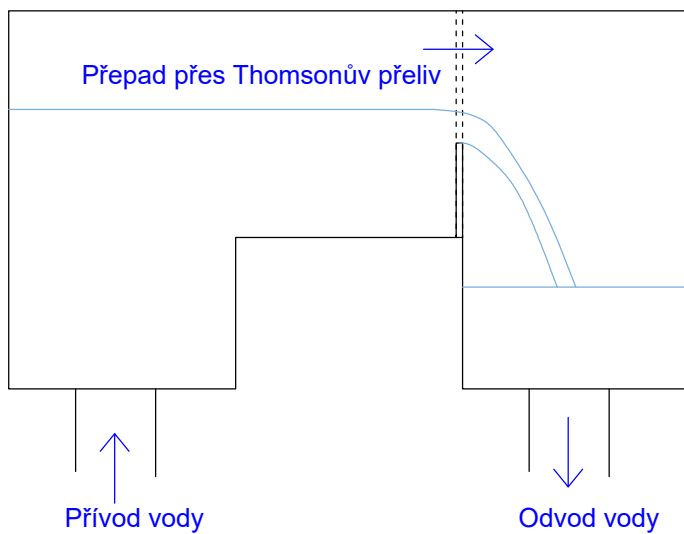
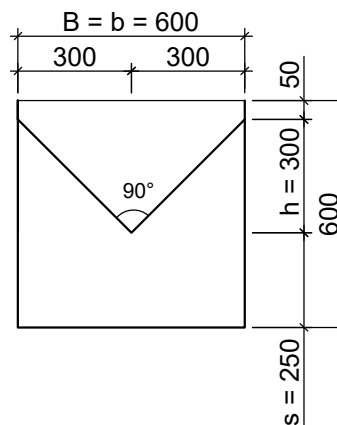


Schéma proudění vody v modrém tělese



Thomsonův měrný přeliv měřítko 1:20



*Příloha 13 Fotodokumentace – doplňující fotografie*



Obrázek 42 Spodní výpust - potrubí mezi Horní nádrží a vývarem



Obrázek 43 Horní nádrž a přívod vody - jiný pohled



Obrázek 44 Koncový uzávěr bez/se segmentovým uzávěrem

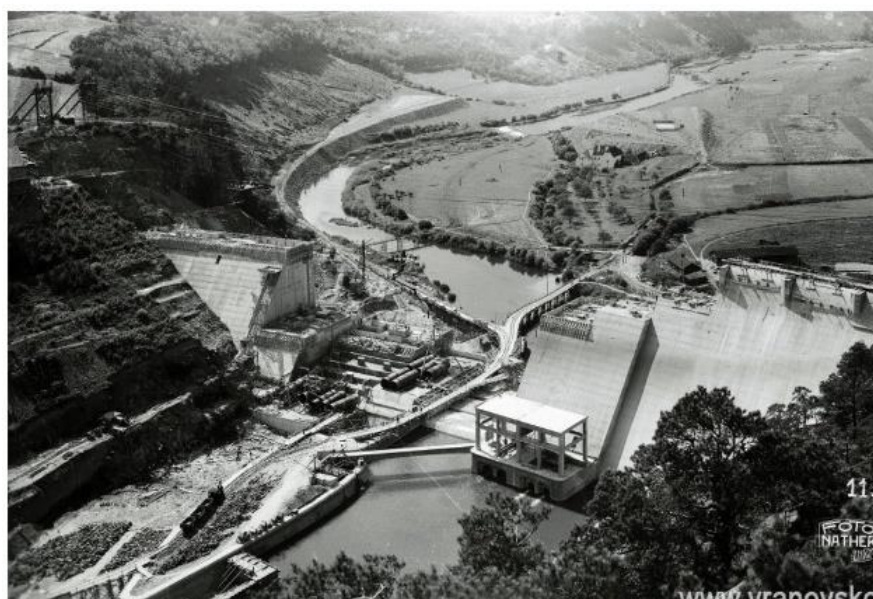




Obrázek 45 Spodní výpust část (šoupě, profil Tlak D), začátek konfuzoru

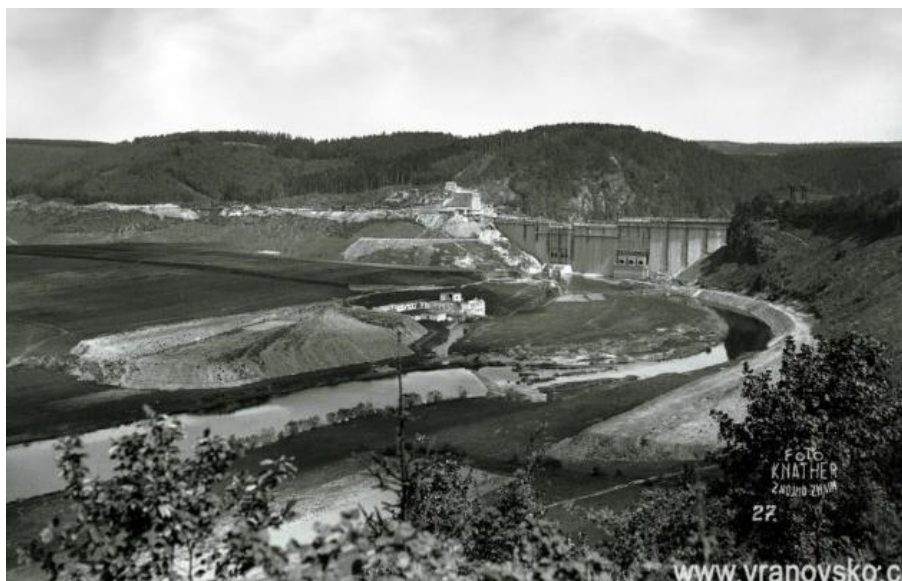


Obrázek 46 Vývar

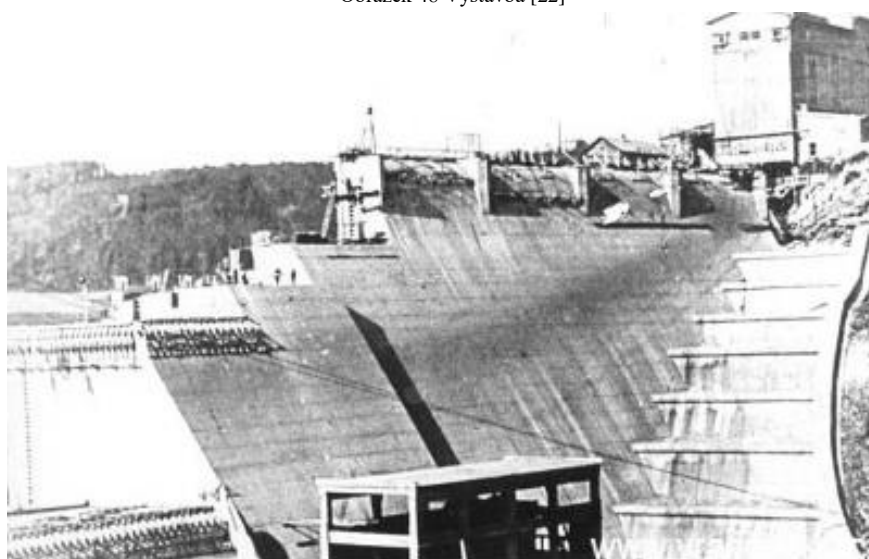


Obrázek 47 Výstavba [22]

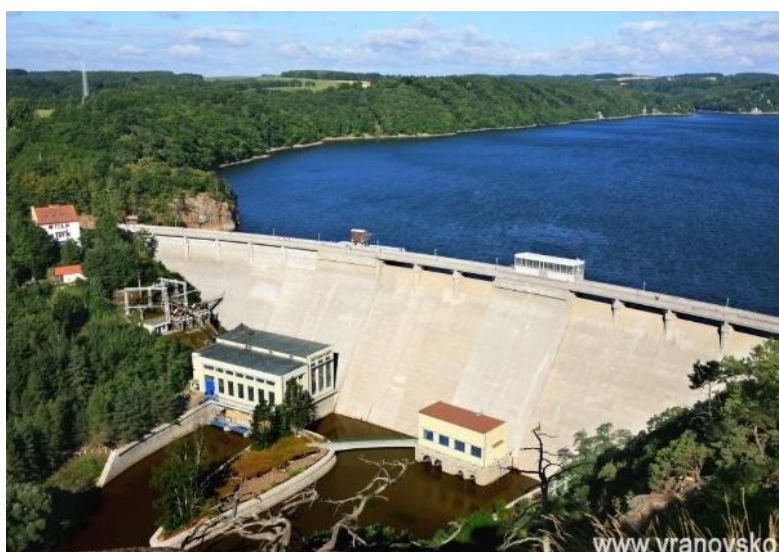




Obrázek 48 Výstavba [22]



Obrázek 49 Výstavba [22]



Obrázek 50 VD Vranov [22]



Obrázek 51 Zatopený výtok

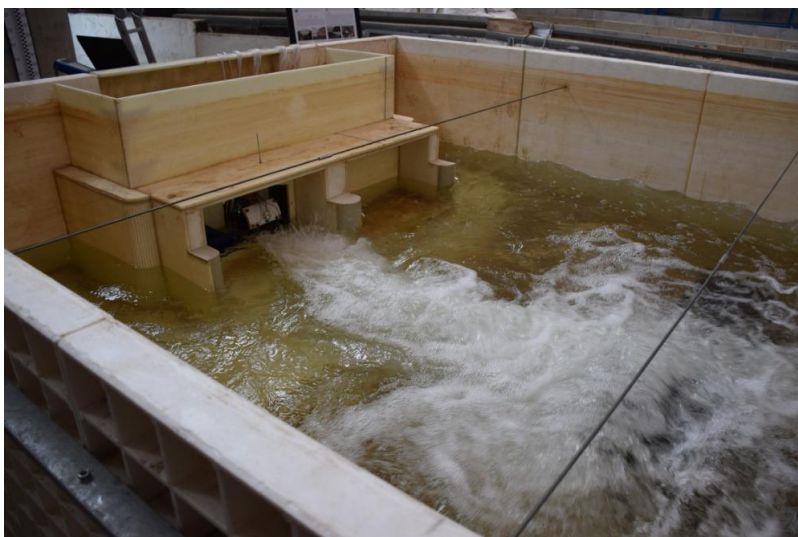


Obrázek 52 Zatopený výtok



Obrázek 53 Částečně zatopený výtok pro 100 %





Obrázek 54 Částečně zatopený výtok pro 75 %



Obrázek 55 Částečně zatopený výtok pro 50 %



Obrázek 56 Nezatopený výtok pro 25 %



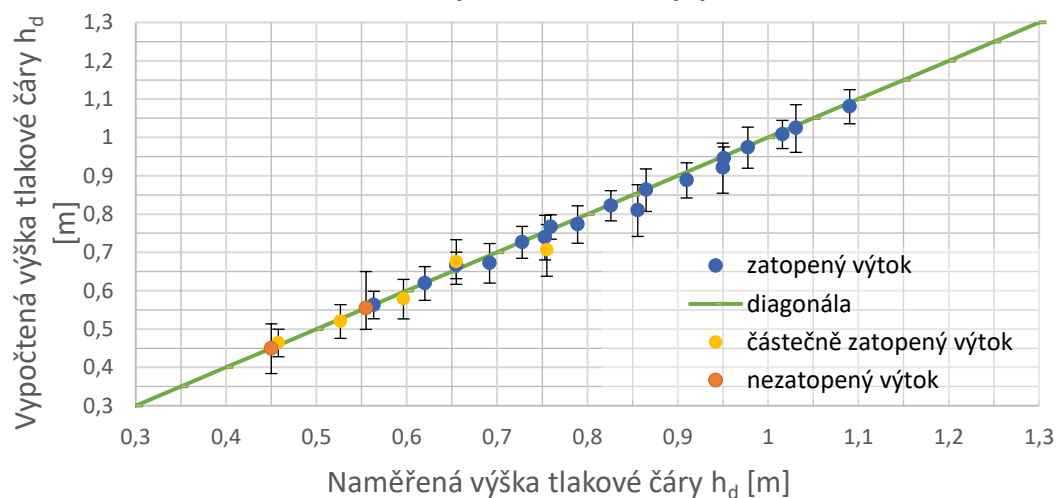
Obrázek 57 Zatopený výtok pro 25 %



Obrázek 58 Nezatopený výtok pro 100 %

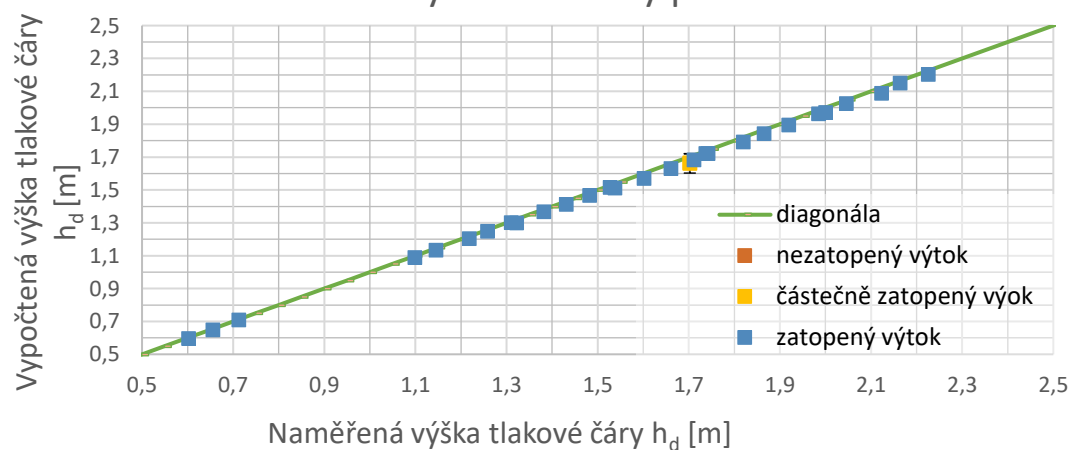
## Příloha 14 – Grafová příloha – doplňující grafy

### Kontrola kóty tlakové čáry pro 100 %



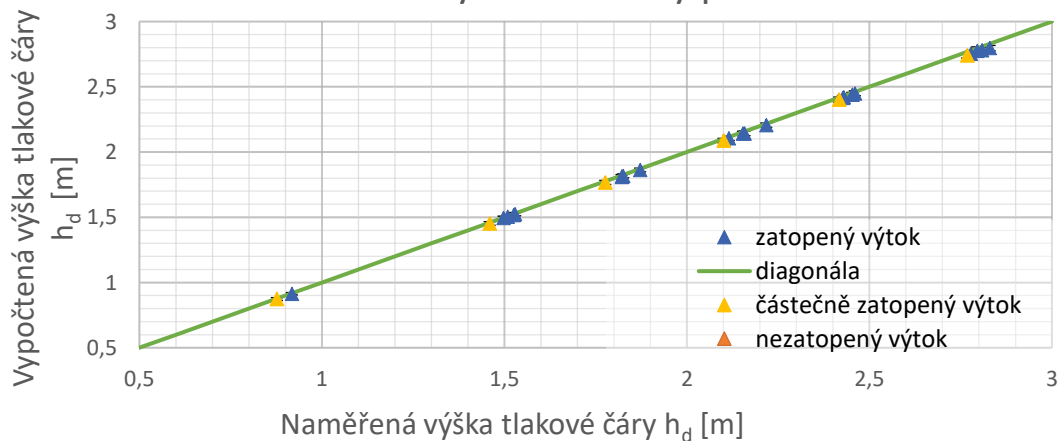
graf 25 Kontrola kóty tlakové čáry pro 100 %

### Kontrola kóty tlakové čáry pro 75 %

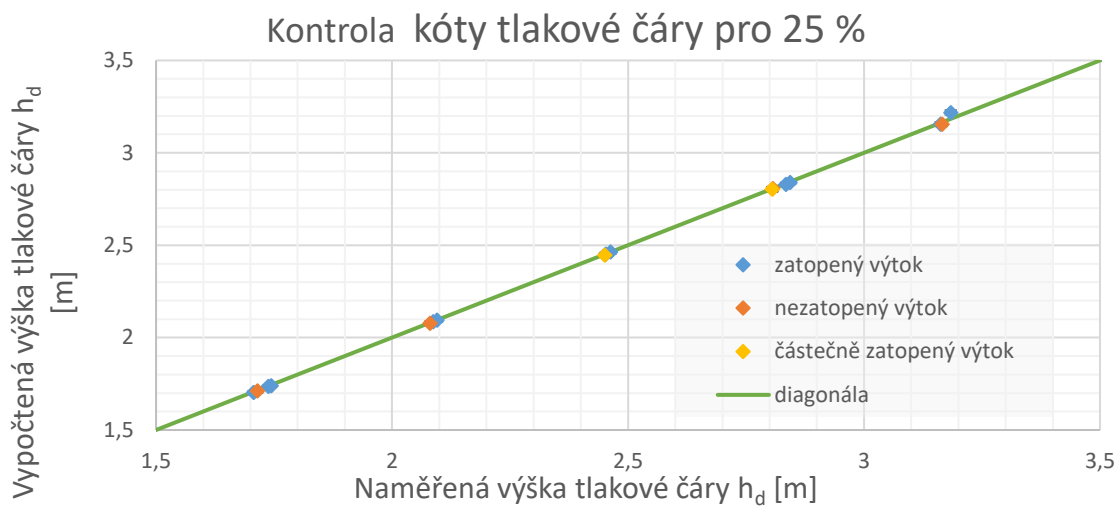


graf 26 Kontrola kóty tlakové čáry pro 75 %

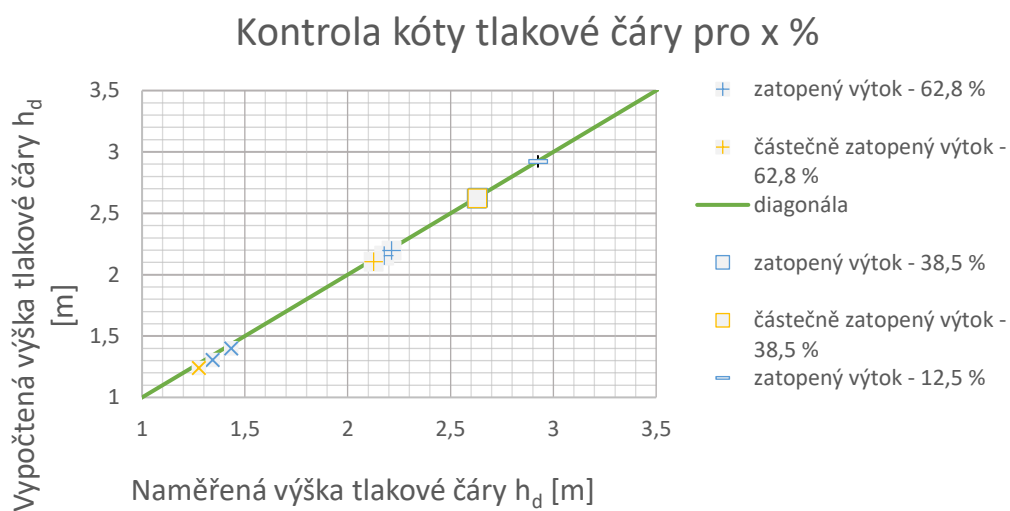
### Kontrola kóty tlakové čáry pro 50 %



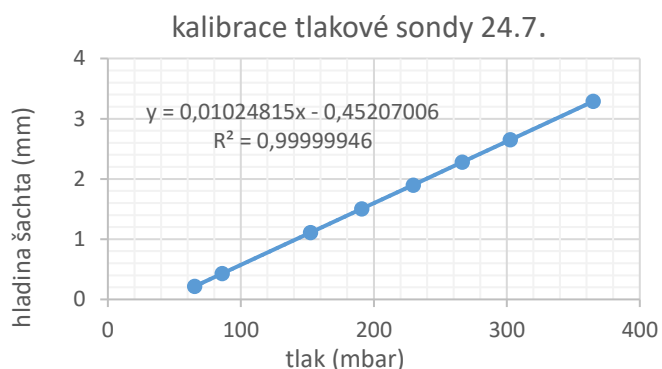
Graf 27 Kontrola kóty tlakové čáry pro 50 %



graf 28 Kontrola kóty tlakové čáry pro 25 %

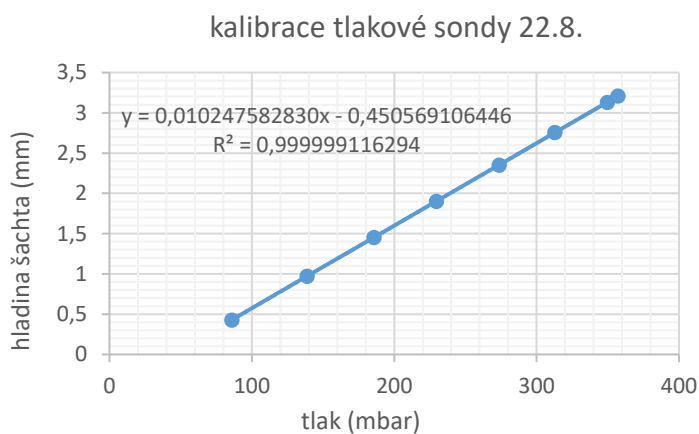


graf 29 Kontrola kóty tlakové čáry pro x %



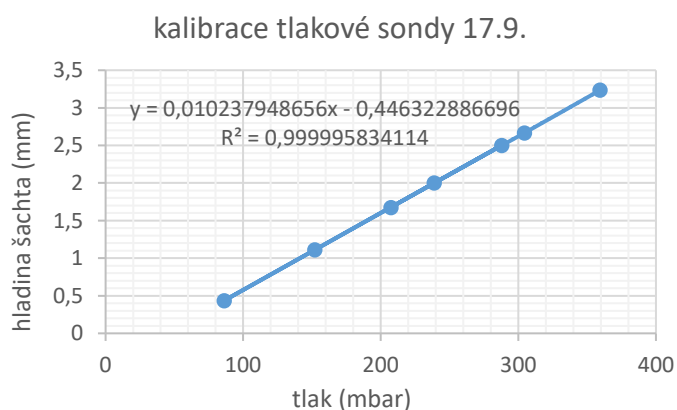
Kalibrace tlakoměrné sondy - ukázka		
24.07.2019		
tlaková sonda	tlaková sonda	tlaková sonda
mbar	mbar	mbar
365	357	357
302.7	349.6	349.6
266.5	312.8	312.8
229.6	273.6	273.6
190.9	229.5	229.5
152.5	185.7	185.7
86	138.8	138.8
65.3	85.9	85.9
parametr a		0.01025
parametr b		-0.452

graf 30 Kalibrace ukázka - graf a tabulka



Kalibrace tlakoměrné sondy - ukázka		
22.08.2019		
tlaková sonda	šachta	šachta
mbar	mm	m
357	3209	3.209
349.6	3131	3.131
312.8	2755	2.755
273.6	2352	2.352
229.5	1902	1.902
185.7	1452	1.452
138.8	973	0.973
85.9	429	0.429
parametr a		0.010248
parametr b		-0.45057

graf 31 Kalibrace ukázka - graf a tabulka



Kalibrace tlakoměrné sondy - ukázka		
17.9.2019		
tlaková sonda	tlaková sonda	tlaková sonda
mbar	mbar	mbar
359,4	3235	3,235
304,4	2666	2,666
238,8	2000	2
152	1110	1,11
86,1	435	0,435
287,9	2502	2,502
207,3	1676	1,676
parametr a		0,010238
parametr b		-0,44632

graf 32 Kalibrace ukázka - graf a tabulka

# Příloha 15 – Tabulková příloha

## Výběr naměřených a vypořtených veličin

### Vysvětlní použitých zkratk

Horní hladina	Název pro vodu v horní nádrži, označení okrajové podmínky pro stav
Dolní hladina	Název pro vodu těsně za výtakovým otvorem, označení okrajové podmínky pro stav
Výtok	Označení situace výtoku
zat	Zatopený výtok otvorem
část	Částečně zatopený výtok otvorem
nezat	Nezatopený výtok otvorem
$h_{n\acute{a}dr\acute{z}}$	Hladina vody v horní nádrži (v tabulce vztažena k spodní hraně spodní výpusti, oproti použité hodnotě ve výpočtu se liší o hodnotu 0,1175 m)
$h_{dv}$	Hladina vody těsně za výtakovým otvorem (v tabulce vztažena k spodní hraně spodní výpusti, oproti použité hodnotě ve výpočtu se liší o hodnotu 0,1175 m)
$h_d$	Kóta tlakové čáry v profilu Tlak D (v tabulce vztažena k spodní hraně spodní výpusti, oproti použité hodnotě ve výpočtu se liší o hodnotu 0,1175 m)
H	Spád
$Q_{z\acute{a}z}$	Průtok ze záznamu průtokoměru
$V_{potr}$	Rychlost v potrubí spodní výpusti a na začátku koncového uzávěru
$Re_{potr}$	Reynoldsovo číslo na začátku koncového uzávěru
$V_{ot}$	Rychlost na konci koncového uzávěru
$Re_{ot}$	Reynoldsovo číslo na konci koncového uzávěru
	$Re_{ot} = \frac{v}{\nu} * 4 * R$
R	Hydraulický poloměr
$\mu$	Výtakový součinitel



Tabulka 1 - Naměřené a vypočtené veličiny pro otevření segmentu 100 %												
Horní hladina	Dolní hladina	Výtok	$h_{nádrž}$	$h_{dv}$	$h_d$	$H$	$Q_{záz}$	$v_{potr}$	$Re_{potr}$	$v_{ot}$	$Re_{ot}$	$\mu$
			[m]	[m]	[m]	[m]	[l/s]	[m/s]	-	[m/s]	-	-
N_318	P_1	část	0.801	0.054	-	0.747	26.5	2.8	277643	3.1	254039	-
N_331		část	1.667	0.052	0.341	1.615	39.3	4.2	411234	4.7	376745	0.969
N_337		část	2.085	0.051	0.410	2.034	44.5	4.8	465319	5.3	426594	0.972
N_342		část	2.484	0.050	0.479	2.434	48.9	5.2	511244	5.8	468774	0.973
N_348		část	2.879	0.049	0.538	2.830	52.4	5.6	548486	6.2	502326	0.974
N_355		část	3.329	0.048	0.638	3.281	57.1	6.1	597027	6.8	547382	0.972
N_318	P_2	zat	0.810	0.170	-	0.640	24.5	2.6	255884	2.9	234866	
N_331		zat	1.707	0.166	0.447	1.541	38.4	4.1	401714	4.5	368117	0.966
N_337		zat	2.076	0.154	0.503	1.922	43.0	4.6	449732	5.1	412214	0.967
N_342		zat	2.451	0.151	0.575	2.300	47.3	5.1	494715	5.6	453436	0.966
N_348		zat	2.818	0.150	0.636	2.668	51.0	5.5	533213	6.0	488905	0.968
N_355		zat	3.335	0.151	0.739	3.184	56.0	6.0	586042	6.6	536837	0.967
N_318	P_3	zat	0.826	0.291	-	0.535	22.1	2.4	231195	2.6	211859	-
N_331		zat	1.678	0.287	0.538	1.391	36.3	3.9	379536	4.3	347986	0.966
N_337		zat	2.084	0.286	0.611	1.798	41.6	4.5	435086	4.9	398793	0.967
N_342		zat	2.422	0.285	0.672	2.137	45.6	4.9	477036	5.4	437139	0.968
N_348		zat	2.859	0.285	0.748	2.574	50.0	5.4	522856	5.9	479319	0.969
N_355		zat	3.302	0.284	0.833	3.018	54.4	5.8	569514	6.4	521499	0.969
N_318	P_4	zat	0.834	0.417	-	0.417	19.5	2.1	204414	2.3	186934	-
N_331		zat	1.677	0.412	0.642	1.265	34.6	3.7	361647	4.1	331689	0.964
N_337		zat	2.062	0.414	0.709	1.648	39.9	4.3	416988	4.7	382497	0.969
N_342		zat	2.478	0.413	0.793	2.065	44.8	4.8	468876	5.3	429470	0.966
N_348		zat	2.870	0.415	0.861	2.455	48.8	5.2	510093	5.8	467815	0.967
N_355		zat	3.267	0.414	0.914	2.853	52.9	5.7	553194	6.3	507120	0.973
N_331	P_5	zat	1.688	0.548	-	1.140	32.8	3.5	342608	3.9	314433	0.962
N_337		zat	2.098	0.550	0.834	1.547	38.5	4.1	402970	4.6	369076	0.965
N_342		zat	2.465	0.552	0.899	1.912	43.0	4.6	449836	5.1	412214	0.968
N_348		zat	2.842	0.553	0.973	2.289	47.1	5.0	492414	5.6	451519	0.966
N_355		zat	3.265	0.554	1.048	2.711	51.3	5.5	536874	6.1	491781	0.967
V1	P_6	nezat	2.585	- 0.004	0.510	2.589	50.4	5.4	527250	6.0	483154	0.967
V2		nezat	1.712	- 0.011	0.342	1.722	40.2	4.3	420545	4.8	385373	0.966
H_1	P_7	část	2.831	0.035	0.523	2.796	52.2	5.6	546290	6.2	500409	0.974

Tabulka 20 Příloha tabulka 1

Tabulka 2 - Naměřené a vypočtené veličiny pro otevření segmentu 75 %												
Horní hladina	Dolní hladina	Výtok	$h_{nádrž}$	$h_{dv}$	$h_d$	H	$Q_{záz}$	$v_{potr}$	$Re_{potr}$	$v_{ot}$	$Re_{ot}$	$\mu$
			[m]	[m]	[m]	[m]	[l/s]	[m/s]	-	[m/s]	-	-
N_318	P_1	zat	0.813	0.059	0.485	0.754	19.4	2.1	203129	3.1	198515	0.859
N_331		zat	1.694	0.058	0.982	1.636	28.9	3.1	301913	4.5	295013	0.864
N_337		zat	2.080	0.058	1.206	2.022	32.3	3.5	337453	5.1	329768	0.866
N_342		zat	2.461	0.056	1.421	2.405	35.2	3.8	368410	5.5	360026	0.867
N_348		zat	2.817	0.056	1.626	2.761	37.6	4.0	393490	5.9	384457	0.864
N_355		zat	3.267	0.061	1.883	3.206	40.7	4.4	425775	6.4	416044	0.867
N_318	P_2	zat	0.813	0.168	0.539	0.645	17.8	1.9	185998	2.8	181751	0.849
N_331		zat	1.678	0.166	1.028	1.512	27.6	3.0	288482	4.3	281928	0.858
N_337		zat	2.098	0.167	1.265	1.931	31.3	3.4	327816	4.9	320364	0.862
N_342		zat	2.469	0.166	1.485	2.303	34.4	3.7	359564	5.4	351337	0.862
N_348		zat	2.851	0.164	1.703	2.687	37.1	4.0	387622	5.8	378733	0.861
N_355		zat	3.255	0.166	1.929	3.089	39.7	4.3	415314	6.2	405821	0.862
N_318	P_3	zat	0.823	0.300	0.596	0.523	16.0	1.7	167672	2.5	163862	0.854
N_331		zat	1.700	0.298	1.101	1.402	26.6	2.9	277892	4.2	271502	0.857
N_337		zat	2.075	0.298	1.314	1.777	30.0	3.2	314075	4.7	306871	0.860
N_342		zat	2.468	0.299	1.544	2.169	33.3	3.6	348209	5.2	340297	0.861
N_348		zat	2.836	0.298	1.749	2.538	36.0	3.9	376364	5.7	367795	0.861
N_355		zat	3.279	0.300	2.006	2.979	39.1	4.2	409037	6.1	399688	0.863
N_331	P_4	zat	1.689	0.400	1.141	1.289	25.3	2.7	264247	4.0	258213	0.851
N_337		zat	2.076	0.403	1.366	1.673	29.0	3.1	302902	4.6	295933	0.855
N_342		zat	2.473	0.401	1.595	2.072	32.4	3.5	339399	5.1	331608	0.858
N_348		zat	2.838	0.402	1.802	2.436	35.1	3.8	367192	5.5	358799	0.857
N_355		zat	3.269	0.403	2.047	2.866	38.0	4.1	397530	6.0	388444	0.857
N_331	P_5	zat	1.678	0.550	1.193	1.128	23.7	2.5	248109	3.7	242471	0.856
N_337		zat	2.053	0.554	1.411	1.499	27.5	2.9	287186	4.3	280599	0.858
N_342		zat	2.424	0.551	1.621	1.873	30.8	3.3	321960	4.8	314639	0.859
N_348		zat	2.853	0.552	1.868	2.301	34.2	3.7	357777	5.4	349599	0.860
N_355		zat	3.271	0.553	2.109	2.718	37.2	4.0	389161	5.8	380266	0.861
H1	P_6	část	2.752	0.009	1.585	2.743	37.5	4.0	392299	5.9	383290	0.860
H2		část	2.750	0.046	1.585	2.704	37.4	4.0	392299	5.9	382489	0.868

Tabulka 21 Příloha tabulka 2

Tabulka 3 - Naměřené a vypočtené veličiny pro otevření segmentu 50 %												
Horní hladina	Dolní hladina	Výtok	$h_{nádrž}$	$h_{dv}$	$h_d$	H	$Q_{záz}$	$v_{potr}$	$Re_{potr}$	$v_{ot}$	$Re_{ot}$	$\mu$
			[m]	[m]	[m]	[m]	[l/s]	[m/s]	-	[m/s]	-	-
N_318	P_1	část	0.941	0.016	0.760	0.925	14.3	1.5	149850	3.4	161545	0.822
N_331		část	1.660	0.016	1.343	1.644	19.2	2.1	200355	4.5	215991	0.824
N_337		část	2.053	0.015	1.659	2.038	21.4	2.3	223872	5.1	241344	0.827
N_342		část	2.454	0.016	1.983	2.438	23.5	2.5	245841	5.6	265027	0.830
N_348		část	2.842	0.015	2.300	2.827	25.3	2.7	264275	6.0	284900	0.828
N_355		část	3.272	0.020	2.651	3.252	27.3	2.9	285521	6.5	307805	0.833
N_331	P_2	zat	1.701	0.108	1.392	1.593	18.8	2.0	197028	4.5	212405	0.825
N_337		zat	2.083	0.106	1.704	1.977	21.1	2.3	220319	5.0	237514	0.826
N_342		zat	2.499	0.108	2.041	2.391	23.3	2.5	243225	5.5	262208	0.829
N_348		zat	2.866	0.107	2.336	2.759	25.0	2.7	261380	5.9	281779	0.830
N_355		zat	3.263	0.108	2.661	3.155	26.9	2.9	281065	6.4	303000	0.833
N_331	P_3	zat	1.680	0.144	1.381	1.536	18.4	2.0	192870	4.4	207922	0.823
N_337		zat	2.081	0.141	1.709	1.940	20.8	2.2	217537	4.9	234514	0.824
N_342		zat	2.487	0.142	2.037	2.345	23.0	2.5	240087	5.4	258824	0.827
N_348		zat	2.825	0.142	2.310	2.683	24.6	2.6	256972	5.8	277028	0.827
N_355		zat	3.289	0.145	2.692	3.144	26.8	2.9	280762	6.3	302674	0.833
N_331	P_4	zat	1.701	0.173	1.408	1.528	18.4	2.0	192665	4.4	207702	0.823
N_337		zat	2.071	0.172	1.705	1.899	20.6	2.2	215762	4.9	232602	0.827
N_342		zat	2.430	0.174	1.998	2.256	22.5	2.4	234856	5.3	253186	0.825
N_348		zat	2.862	0.172	2.343	2.690	24.6	2.6	257458	5.8	277551	0.828
N_355		zat	3.305	0.172	2.712	3.133	26.8	2.9	280454	6.3	302341	0.833
N_318	P_5	zat	0.922	0.296	0.801	0.626	11.7	1.3	122514	2.8	132076	0.819
N_331		zat	1.679	0.296	1.412	1.383	17.5	1.9	182986	4.1	197267	0.822
N_337		zat	2.099	0.297	1.755	1.802	20.0	2.2	209576	4.7	225932	0.824
N_342		zat	2.525	0.294	2.100	2.231	22.3	2.4	233201	5.3	251401	0.823
N_348		zat	2.788	0.296	2.312	2.492	23.6	2.5	246436	5.6	265669	0.824
N_355		zat	3.240	0.296	2.678	2.944	25.8	2.8	270425	6.1	291465	0.830
H_1	P_6	část	2.848	0.019	2.307	3.220	25.4	2.7	265194	6.0	285891	0.830

Tabulka 22 Příloha tabulka 3

Tabulka 4 - Naměřené a vypočtené veličiny pro otevření segmentu 25 % a x %												
Horní hladina	Dolní hladina	Výtok	$h_{n\acute{a}dr\acute{z}}$	$h_{dv}$	$h_d$	H	$Q_{z\acute{a}z}$	$v_{potr}$	$Re_{potr}$	$v_{ot}$	$Re_{ot}$	$\mu$
			[m]	[m]	[m]	[m]	[l/s]	[m/s]	-	[m/s]	-	-
N_331	P_1	nezat	1.687	0.000	1.598	1.687	10.0	1.1	105427	4.8	139952	0.846
N_337		nezat	2.074	0.000	1.963	2.074	11.2	1.2	117141	5.3	155644	0.848
N_342		část	2.464	0.002	2.334	2.462	12.2	1.3	126903	5.8	169555	0.845
N_348		nezat	2.843	0.000	2.690	2.843	13.1	1.4	136665	6.3	182278	0.848
N_355		nezat	3.220	- 0.002	3.048	3.222	14.2	1.5	148379	6.8	198388	0.866
N_331	P_2	zat	1.672	0.111	1.590	1.561	9.6	1.0	100546	4.6	134526	0.842
N_331	P_3	zat	1.703	0.152	1.621	1.551	9.6	1.0	100546	4.6	134211	0.843
N_337		zat	2.074	0.147	1.970	1.927	10.7	1.2	112260	5.1	149658	0.844
N_342		zat	2.459	0.148	2.336	2.311	11.7	1.3	122022	5.6	163380	0.841
N_348		zat	2.861	0.156	2.717	2.705	12.9	1.4	134713	6.2	179460	0.853
N_355		zat	3.211	0.153	3.045	3.058	13.9	1.5	144474	6.6	193300	0.865
N_331	P_4	zat	1.699	0.304	1.627	1.395	9.1	1.0	95665	4.4	127173	0.842
N_337		zat	2.073	0.302	1.979	1.771	10.2	1.1	107380	4.9	142952	0.841
N_342		zat	2.463	0.305	2.346	2.158	11.4	1.2	119094	5.4	158436	0.844
N_348		zat	2.863	0.301	2.727	2.562	12.4	1.3	129832	6.0	173523	0.848
N_355		zat	3.264	0.306	3.067	2.958	13.4	1.5	141546	6.4	187514	0.859
H_1	P_5	část	2.840	0.006	2.689	3.258	13.1	1.4	136665	6.3	183255	0.850
Horní hladina	Dolní hladina	Výtok	$h_{n\acute{a}dr\acute{z}}$	$h_{dv}$	$h_d$	H	$Q_{z\acute{a}z}$	$v_{potr}$	$Re_{potr}$	$v_{ot}$	$Re_{ot}$	$\mu$
			[m]	[m]	[m]	[m]	[l/s]	[m/s]	-	[m/s]	-	-
87.50%	P_1	část	2.852	0.049	1.159	2.803	45.1	4.8	472470	6.1	442094	0.908
87.50%		zat	2.855	0.149	1.226	2.706	44.3	4.8	463684	6.0	434252	0.906
87.50%		zat	2.862	0.297	1.315	2.564	43.1	4.6	450994	5.8	422489	0.906
62.80%	P_1	část	2.843	0.027	2.008	2.816	31.5	3.4	328972	5.9	337384	0.836
62.80%		zat	2.858	0.155	2.059	2.704	30.8	3.3	322139	5.8	329886	0.835
62.80%		zat	2.850	0.294	2.095	2.556	29.9	3.2	312377	5.6	320247	0.833
38.50%	P_1	část	2.875	0.009	2.513	2.866	20.5	2.2	214759	6.4	242671	0.868
38.50%		zat	2.855	0.155	2.510	2.700	20.0	2.1	208902	6.2	236796	0.873
38.50%		zat	2.837	0.309	2.516	2.528	19.3	2.1	201093	6.0	228016	0.869
12.50%	P_4	nezat	2.850	- 0.006	2.808	2.856	6.9	0.7	72237	6.8	100132	0.907

Tabulka 23 Příloha tabulka 4