



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ
Katedra hydrauliky a hydrologie

Modelový výzkum proudění na vtoku do propustku

Modelling research of the flow at the inlet to the culvert

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

Vedoucí práce: Doc. Ing. Aleš Havlík, CSc.

Bc. Daniel Sedláček

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Sedláček** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **399077**
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**
Zadávající katedra/ústav:
Studijní program: **Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Vodní hospodářství a vodní stavby**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Modelový výzkum proudění na vtoku do propustku

Název diplomové práce anglicky:

Modelling research on the flow inlet into the culvert

Pokyny pro vypracování:

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Aleš Havlík CSc., katedra hydrauliky a hydrologie FSv

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **29.09.2016**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **08.01.2017**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce Doc. Ing. Aleše Havlíka, CSc. a Ing. Tomáše Pícku, Ph.D. jako konzultanta. Dále prohlašuji, že veškeré použité podklady jsou uvedeny v seznamu použité literatury, uvedeného na konci mé diplomové práce.

V Praze

Bc. Daniel Sedláček

.....



Poděkování

Rád bych poděkoval Doc. Ing. Aleši Havlíkovi, CSc. za cenné rady a trpělivost při vedení mé diplomové práce. Neméně bych chtěl poděkovat Ing. Tomáši Píckovi Ph.D. za realizaci fyzikálních modelů a za jeho cenné rady. Rovněž bych chtěl poděkovat svým rodičům, kteří mě neustále podporovali.

Výsledky této práce jsou součástí grantového úkolu TA04030373 „Zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti propustků s ohledem na převádění povodňových průtoků“, řešeného ve spolupráci následujících institucí: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka v. v. i., Pöyry Environment a.s. a České vysoké učení technické v Praze - Fakulta stavební – katedra hydrauliky. Poskytovatelem je Technologická agentura ČR v rámci programu: „Program na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje ALFA (2011-2019)“.



Obsah

Obsah	5
Anotace	8
Seznam použitých symbolů a označení	9
1 Úvod	11
2 Přehled současného stavu problematiky	12
2.1 Účel a základní parametry propustků	12
2.1.1 Srovnání propustků s mosty	12
2.1.2 Parametry návrhu a posouzení propustku	13
2.1.3 Příčný profil propustku, sklon dna a materiály	14
2.1.4 Ekologické aspekty propustků	15
2.2 Hydraulické řešení propustků	16
2.2.1 Režimy proudění v propustcích	16
2.2.1.1 Rozdělení podle česky psané literatury	16
2.2.1.2 Rozdělení podle anglicky psané literatury	18
2.2.2 Vliv řešení vtoku	20
2.2.2.1 Výzkumy zaměřené na vtoky do propustku	25
2.2.3 Řešení výtoku	34
2.2.4 Výpočty proudění	36
2.2.4.1 Propustky s volnou hladinou	36
2.2.4.2 Propustky se zatopeným vtokem	38
2.2.4.3 Propustky tlakové	40
3 Výzkum na hydraulických modelech	44
3.1 Matematické modelování	44
3.2 Fyzikální modelování	45
3.2.1 Druhy hydraulických modelů	45
3.3 Cíle výzkumu hydraulického modelování	46
3.4 Teorie podobnosti hydrodynamických jevů	46
3.4.1 Rozměrová analýza	47
3.4.2 Modelová podobnost	47
3.4.2.1 Reechův – Froudův zákon mechanické podobnosti	48
3.4.2.2 Reynoldsův zákon mechanické podobnosti	49
3.4.3 Modelování místních ztrát na vtoku do tlakového potrubí	50



4	Fyzikální modelování	52
4.1	Popis hydraulického žlabu	52
4.2	Modely	54
4.2.1	Typy vtoků a jejich varianty	56
4.2.1.1	Vtok I	56
4.2.1.2	Vtok Ia	57
4.2.1.3	Vtok Ib	58
4.2.1.4	Vtok Ic	58
4.2.1.5	Vtok II	59
4.2.1.6	Vtok IIa	60
4.2.1.7	Vtok III	60
4.2.1.8	Vtok IV	61
4.2.1.9	Vtok V	62
5	Měření	63
5.1	Měřené veličiny	63
5.1.1	Průtok	63
5.1.2	Podrobný profil hladiny	64
5.1.3	Teplota	67
5.2	Přehled provedených experimentů	68
6	Pozorování, vyhodnocení a diskuze	69
6.1	Proudění s volnou hladinou v propustku	69
6.1.1	Pozorované chování proudění	69
6.1.2	Zúžená hloubka a součinitel κ	71
6.1.3	Součinitelé β , ξ a φ	76
6.1.3.1	β – součinitel zatopení	76
6.1.3.2	ξ – součinitel místní ztráty vtokem do propustku	76
6.1.3.3	φ – rychlostní součinitel	81
6.1.4	Konzumční křivky modelů	81
6.1.4.1	Popis srovnání výzkumu s jinými	86
6.2	Tlakové proudění v propustku	88
6.2.1	Pozorované chování proudění	88
6.2.2	ξ – součinitel místní ztráty vtokem do propustku	90
6.2.2.1	Reynoldsovo číslo při modelovaném tlakovém režimu	95



7 Závěry a doporučení.....	96
Seznam použité literatury.....	99
Seznam obrázků.....	102
Zdroje fotografií, ilustrací a grafů.....	106
Seznam tabulek.....	110
Zdroje tabulek.....	111
Přílohy.....	112
Příloha 1 – tabulka: kruhový profil částečně plněný.....	112
Příloha 2 – hodnoty součinitele místní ztráty ξ užívané v USA a schémata vtoků.....	113
Příloha 3 – Moodyho diagram.....	114
Příloha 4 – schémata vtoků řešených v publikaci <i>Tests on Circular-Pipe-Culvert Inlets</i> (1955)	115
Příloha 5 – schéma hydraulického žlabu B25.....	116
Příloha 6 – doplňující fotografie z experimentů.....	117



Anotace

Práce se zaměřuje na vtoky kruhových propustků. Cílem práce je nalezení zúžené hloubky, stanovení velikosti součinitele místní ztráty na vtoku do kruhového propustku pro různé geometrie vtoku, stanovení dalších součinitelů popisujících proudění v propustcích a pozorování jevů proudění.

K řešení byly použity metody fyzikálního modelování. Byly zkonstruovány modely propustků s odlišnými vtoky, včetně modelů umístění dvou propustků vedle sebe. Byly měřeny základní režimy proudění (volná hladina v celé délce propustku, zahlcený vtok propustku a proudění o volné hladině uvnitř propustku, tlakový režim proudění v propustku s vlivem dolní vody).

Výsledky jsou zpracovány formou bezrozměrných grafů a přehledných tabulek. Na základě zjištěných údajů jsou formulována doporučení. Součástí práce je i rešerše současných znalostí problematiky.

Klíčová slova: *propustek, hydraulika propustků, vtok, geometrie vtoku, volná hladina, tlakové proudění, místní ztráta, zúžená hloubka, součinitel, vír, kapacita, fyzikální modelování, zahlcení vtoku*

Abstract

This work focuses on inlets of circular culverts. The aim of work is to find minimum depth past inlet, determination of the entrance loss coefficient for different inlet types, determine coefficients describing the flow in culverts and observation of the flow.

The methods of physical modelling were used for finding the solution. Several culvert models with different inlets were constructed, including multiple culverts. The inlet and outlet control types of flow were measured.

The results are reported in nondimensional charts and clearly arranged tables. The recommendations based on research results are formulated. The work also includes bibliographic research of current knowledge of the issue.

Keywords: *culvert, culvert hydraulics, inlet, inlet geometry, free flow, full flow, head loss, contracted depth of flow, coefficient, whirlpool, capacity, physical modelling, submerged inlet*



Seznam použitých symbolů a označení

b	šířka koryta, žlabu nebo propustku (u obdélníkového propustku) [m]
D	průměr propustku [m]
E	energetická výška průřezu [m]
g	gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]
H	výška vody před propustkem nebo výška obdélníkového propustku [m]
i_e	sklon čáry energie [-]
i_0	podélný sklon [-]
k	drsnostní výška; značeno také Δ [m]
L	délka propustku [m]
L_p	délka propustku [m]
p_a	atmosférický tlak [Pa]
Q	průtok [m^3/s]
R	hydraulický poloměr [m]
Re	Reynoldsovo číslo [-]
Re_{kv}	Reynoldsovo číslo; kvadratická oblast [-]
S_c	plocha průřezu proudění v místě zúžené hloubky [m^2]
S_k	průtočná plocha v místě kritické hloubky [m^2]
S_D	plocha příčného profilu propustku [m^2]
S_σ	plocha průřezu proudění v místě zatopené zúžené hloubky [m^2]
v	rychlost proudění vody v propustku [m/s]
v_d	rychlost proudění dolní vody (za propustkem) [m/s]
v_h	rychlost proudění vody před vtokem do propustku [m/s]
v_p	rychlost proudění vody v propustku [m/s]
v_σ	rychlost v místě zatopené zúžené hloubky [m/s]
y	hloubka vody před vtokem do propustku [m]
y_c	hloubka vody v místě zúžené hloubky [m]
y_d	hloubka vody za výtokem z propustku [m]
y_h	hloubka vody před propustkem [-]
y_k	kritická hloubka [m]
y_σ	zatopená zúžená hloubka [m]
Z_m	místní ztráta [m]
Z_r	Brodova ztráta náhlým rozšířením proudu [m]
Z_t	ztráta třením [m]
α	Coriolisovo číslo [-]
β	součinitel zatopení (vtoku) [-]
Δ	převýšení dolní vody nad horní hranou propustku; též označení drsnostní výšky [m]
Δ_{min}	mezní hodnota rozdílu hladin v propustku a za ním, při níž bude výtok zatopen [m]
k	součinitel výškového zúžení [-]

Seznam použitých symbolů a označení



λ	součinitel ztráty třením [-]
ν	kinematická viskozita vody [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
ξ	ztrátový součinitel; součinitel místní ztráty na vtoku (někdy značeno ζ) [-]
φ	rychlostní součinitel [-]



1 Úvod

Propustky byly pravděpodobně vynalezeny už před několika tisíci lety v souvislosti s nutností odvodnit podmáčené oblasti, aby bylo možné toto území zemědělsky využít. Přibližně 600 př. n. l. Etruskové postavili napříč Římem přímé zděné kanály, které odvodnily jeho spodní část. Na odvodněných pozemcích bylo posléze postaveno Forum Romanum. S rozvojem budování cest byly propustky využívány, aby cesty vedené náspu nefungovaly jako hráze, ale pod nimi mohla volně odtékat [1]. Do angličtiny se slovo propustek přeloží jako „culvert“. Termín „culvert“ začal být poprvé používán v souvislosti s odvodněním silnic a železnic ve Francii okolo roku 1770 (termín „culvert“ vznikl pravděpodobně překroucením francouzského *couloir* nebo *coulouère*, což jsou výrazy pro vodní cestu nebo vodní kanál) [1].

Nyní se bez propustků obejde jen málokterá pozemní komunikace vedená v náspu. Hlavním účelem propustků je převádění vodotečí pod komunikaci nebo umožnění migrace živočichů. Ze stavebního hlediska je propustek relativně jednoduchý. Naopak z hydraulického pohledu je proudění vody v propustcích značně složitý jev. V dnešní době se neustále zvyšují požadavky na zvýšení bezpečnosti staveb současně se snahou o minimalizaci jejich dopadu na životní prostředí při zachování ekonomicky přijatelných nákladů. Tudíž je stále zapotřebí vyvíjet nová, lepší řešení; byť se jedná třeba o propustky, které mohou zdánlivě působit prostě. Propustků se ovšem každoročně realizují bezmála stovky a jejich vliv tedy je nezanedbatelný. Tím smysluplnější je prohlubovat naše teoretické i praktické znalosti hydrauliky těchto staveb.

Tato diplomová práce si klade za cíl nalezení zúžené hloubky, stanovení velikosti součinitele místní ztráty na vtoku do kruhového propustku pro různé geometrie vtoku, stanovení dalších součinitelů popisujících proudění v propustcích a pozorování jevů proudění.

Práce je rozdělena do sedmi kapitol. Sled kapitol odpovídá postupu řešení celé práce. Úvodní kapitola poskytuje ucelený přehled současné metodiky řešení. Po úvodní kapitole následuje kapitola, která se zabývá výzkumem na hydraulických modelech a popisuje fyzikální modelování včetně základní teorie podobnosti hydrodynamických jevů. Další dvě kapitoly popisují výzkum v hydraulické laboratoři a rozebírají měření postavených na fyzikálních modelech. Následuje stěžejní kapitola, v níž jsou vyhodnocena pozorování a naměřená data z experimentů. Závěr shrnuje provedené práce, získané poznatky a doporučení.



2 Přehled současného stavu problematiky

2.1 Účel a základní parametry propustků

Termínem *propustek* se označuje mostní objekt (popř. jeho funkční celek) s kolmou světlostí mostního otvoru od 0,4 do 2,0 m včetně [2], jak je definováno v normě ČSN 73 6200. Objekty o světlosti do 0,40 m se obvykle zařazují jako součást potrubního vedení, chrániček, kolektorů apod. [2] Propustky se používají primárně pro převádění vody z vodotečí pod pozemními komunikacemi jako silnice nebo železnice. Tyto vodoteče jsou mnohdy po většinu roku bez stálého průtoku v korytě. Dále se propustky realizují v zemních tělesech komunikací v inundačním území toku, kde propustky umožňují zprůtočnění toho území [3; 4].



Obr. 1 Typický betonový propustek obdélníkového profilu



Obr. 2 Typický propustek z vlnitého plechu kruhového profilu s betonovou čelní stěnou a bočními křídly

2.1.1 Srovnání propustků s mosty

Naše norma řadí propustky mezi mosty; přesto jsou mosty a propustky významně odlišné. Je úkolem inženýra rozhodnout, jestli je vhodnější použít v daném místě propustek nebo most. Hlavními hodnotícími kritérii jsou: hydraulika, estetičnost a cena konstrukce [4]. U propustků většinou [5]:

- převládá délka nad šířkou (ve směru proudění) a tudíž jsou víc podstatné ztráty třením;
- je pevné dno, které není ze stejného materiálu, jako je koryto toku;
- nastává i tlakové proudění v případě velkých průtoků;
- je větší riziko zanesení sedimenty nebo ucpání profilu splávním.

Propustky používáme [4]:

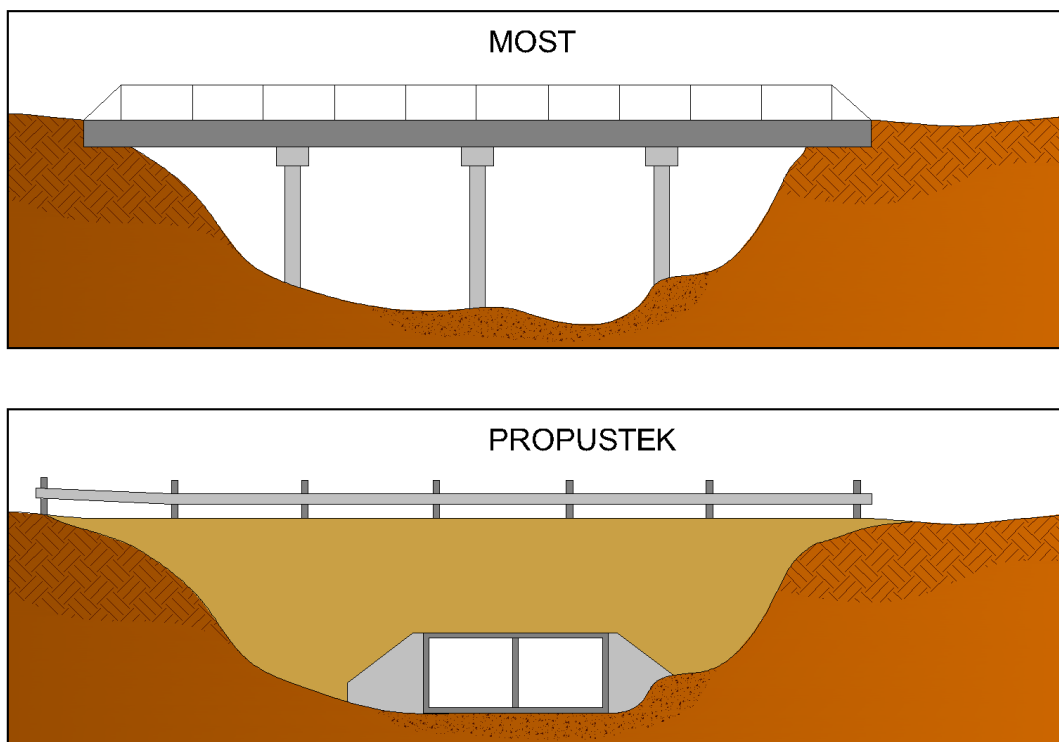
- když je most hydraulicky nevhodný;
- kde je přijatelné množství splavenin a nejsou problémy s ledovými jevy;
- když jsou ekonomičtější než mosty.



Mosty používáme [4]:

- v místech, kde jsou propustky nevhodné;
- když jsou ekonomičtější než propustky;
- je na toku velké množství splavenin a jsou významné ledové jevy;
- když chceme minimalizovat omezení průtočného profilu (povodně);
- chceme-li snížit negativní vliv na životní prostředí, pokud je propustek nevyhovující;
- pro splnění požadavků přístupnosti a užití daného území.

Propustky jsou takřka vždy levnější než mosty a to jak při výstavbě, tak i v dlouhodobém horizontu při následné údržbě díla. Avšak mosty méně blokují průtočný profil a mají tedy menší negativní vliv při povodních. Mosty také mají menší vliv na životní prostředí. Dále je u propustků problematický vstup do těchto děl a to jak pro osoby vykonávající údržbu, tak pro veřejnost (především pro děti) [4; 5].



Obr. 3 Srovnání mostu a propustku ve stejném profilu

2.1.2 Parametry návrhu a posouzení propustku

Hydraulický návrh a posouzení propustku zahrnuje [3]:

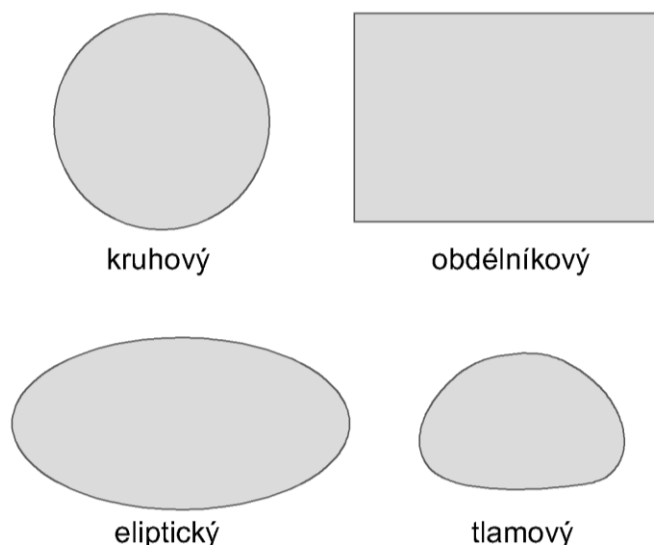
- návrh tvaru a velikosti příčného profilu propustku,
- návrh délky a podélného sklonu propustku,
- návrh tvarového řešení vtokové části propustku,
- posouzení režimu proudění v propustku,
- výpočet průběhu hladiny před propustkem, v propustku a za propustkem,
- posouzení průtočné kapacity a vzduť hladiny před ním,
- způsob tlumení kinetické energie vodního proudu za výtokem z propustku.



2.1.3 Příčný profil propustku, sklon dna a materiály

Jsou dva konstrukční směry příčného profilu propustku. První možnost je, že celý příčný řez propustku je z jednoho materiálu. Druhou možností je, že propustek tvoří jen jakousi klenbu a dno propustku, je takřka stejné jako v daném korytě. Volba příčného profilu závisí především na ceně konstrukce, sklonu dna, velikosti náspu komunikace a hydraulických charakteristikách [4].

Nejčastější používané příčné profily propustků uzavřeným průřezem jsou: kruhový a obdélníkový, případně tlamový nebo eliptický (Obr. 4) [3; 4]. U propustků se dnem stejným jako má koryto tvoří příčný profil různé varianty kleneb [4].



Obr. 4 Běžně užívané profily propustků

Norma ČSN 73 6201 udává jako minimální rozměr otvoru propustku 600 mm. Tento minimální rozměr se doporučuje volit jen pro propustky, jejichž délka ve směru proudění nepřekročí 15 m. Doporučené rozměry ovšem závisí na zvoleném sklonu dna (viz tabulka níže). Navíc je vhodné jejich velikost volit tak, aby byly realizovatelné jejich prohlídky a čištění (ideálně tedy šířka 800 mm a více). Norma určuje jako minimální sklon dna propustku 0,5 %. Maximální sklon dna je 5 %. Pokud by byl maximální sklon dna překročen, pak je nutné provést posouzení a případně navrhnout tlumení silových účinků proudu (kaskádovitě stupně, vývaňště, opevnění apod.) [6].

Sklon dna propustku	Doporučený rozměr otvoru při šířce b propustku měřené mezi římsami ve směru vodního toku				
	$b \leq 10 \text{ m}$	$10 \text{ m} < b \leq 15 \text{ m}$	$15 \text{ m} < b \leq 20 \text{ m}$	$20 \text{ m} < b \leq 30 \text{ m}$	$b > 30 \text{ m}$
J					
$J \leq 2 \%$	600 mm	800 mm	1 000 mm	1 200 mm	1 200 mm
$J > 2\%$	600 mm	600 mm	800 mm	1 000 mm	1 200 mm

Tab. 1 ČSN 73 6201 doporučené rozměry otvoru propustku

Volba materiálu propustku závisí především na jeho únosnosti, hydraulické drsnosti, odolnosti (koroze a abraze) a náročnosti na výstavbu. Nejčastěji používaným materiálem je beton (prostý i vyztužený), vlnitý plech (ocelový nebo hliníkový) a různé plasty (HDPE, PVC). V minulosti se



stavěly propustky zděné i dřevěné. Vývoj lepších materiálů pro propustky stále pokračuje (kompozitní materiály, plasty atd.). Povrch jednoho materiálu může být také překrytý jiným materiálem pro zlepšení vlastností díla např. kvůli snížení hydraulické drsnosti nebo zvýšení odolnosti materiálu proti korozi a abrazi [4].

2.1.4 Ekologické aspekty propustků

Klasický návrh propustků je založen na základě hydraulického výpočtu, jehož výsledkem je stanovení úrovně hladiny při definovaném průtoku. Po následné optimalizaci, tak aby oba parametry vyhověly, většinou dojdeme k návrhu konstrukce, která je značně menší a přímější než je koryto daného toku. Tím dochází ke zvýšení rychlosti proudění a intenzity vymílání. Propustky vytvářejí migrační překážku nejenom pro ryby, ale i pro mnoho další živočichů, kteří jsou vázáni na vodní prostředí (např. různí obojživelníci). Aby se zabránilo negativním vlivům na životní prostředí, tak je nutné upravit návrh, tak aby vyhověl i těmto požadavkům [4].

Trubní propustky vytvářejí zpravidla bariéru pro protiproudovou migraci ryb. Jako průchody pro obojživelníky jsou využitelné pouze krátké propustky (cca do 10 m) bez stálého vyššího průtoku vody. Většina druhů také nevyužívá tmavé dlouhé propustky. Pokud je propustek suchý nebo příležitostně smáčený, tak jej může občas využívat vydra a další živočichové; nejedná se však o optimální řešení. Využitelnost propustků omezuje použití usazovacích jímek před vtokem do propustku nebo vývařístě na jeho výtoku. Tyto konstrukce mohou zcela znemožnit živočichům vstup do propustku. Nevhodné je taktéž umístění česlí na vtoku, neboť česle vytváří úplnou bariéru pro všechny skupiny živočichů a zcela tak zamezují všem ekologickým funkcím toku [7].



Obr. 5 Ekologicky nevhodné řešení výtoku propustku

Obecnou zásadou optimálního řešení je podle možností vždy nahrazovat trubní propustky rámovými (s obdélníkovým profilem). Zde je možné bezbariérově provést samotný tok a umožnit vytvoření suchých břehů. Rámové propustky jsou využitelné pro všechny skupiny živočichů. Doporučené rozměry jsou minimálně 700 x 700 mm pro délku 10 m. Využitelnost větších trubních propustků je možné zvýšit úpravou dna tak, aby zde byl vytvořen profil toku (kyneta) s možností průchodu suchou cestou [7]. Časté je také použití větších profilů a jejich následné vyplnění (například



přibližně z jedné třetiny) stejným materiálem jako je dno toku. Nebo se rovnou propustek vytvoří jen jako klenba nad korytem toku. Díky tomu bude vodní tok minimálně narušen [4].

Se zvyšující se pozorností k ekologii roste i počet výzkumů a publikací specializovaných na toto téma. Jako jednu z mnoha jmenujme například americkou publikaci s názvem „*Culvert Design for Aquatic Organism Passage*“ (2010), která je zaměřena výhradně na toto téma.

2.2 Hydraulické řešení propustků

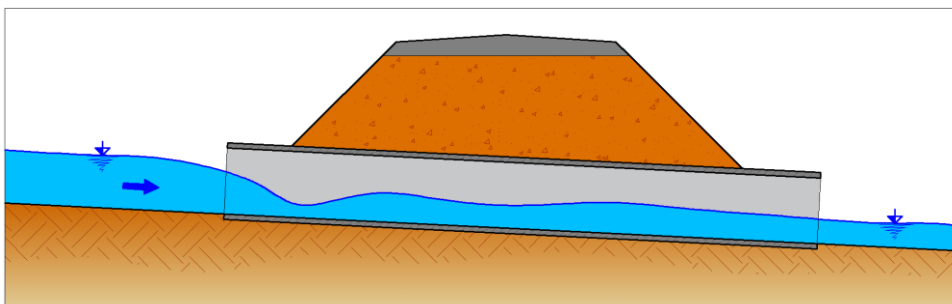
Správná teoretická analýza proudění vody v propustcích je obtížná. Propustek vytváří překážku proudění tím, že zužuje průtočný profil, což způsobuje směrové zakřivení proudnic, jež se projeví místní ztrátou energie. Zúžení průtočného profilu následně způsobuje vzduť hladiny před propustkem [8]. Proudění se mění v čase a je odlišné v každém určitém propustku. Proudění v propustku může být o volné hladině nebo tlakové a to jak v celém propustku nebo jen v jeho části. Často dochází k přechodům z bystřinného proudění na říční vodním skokem. Přitom záleží nejvíce na úrovni hladiny před a za propustkem, sklonu dna (včetně jeho poměru ke spádu kritickému a normálnímu), tvaru a velikosti příčného profilu, řešení vtoku a výtoku, délce propustku, jeho materiálech atd. [3; 4; 9]

2.2.1 Režimy proudění v propustcích

2.2.1.1 Rozdělení podle česky psané literatury

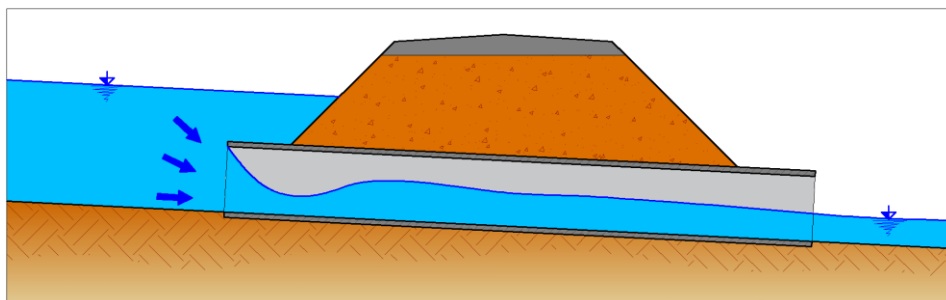
Vzhledem ke složitosti proudění v propustku rozlišovala odborná literatura více než 90 různých režimů proudění [3; 8]. Toto velké množství však bylo možné kategorizovat do skupin. Naše literatura rozlišovala tři základní skupiny [3; 8; 9]:

- a) proudění s volnou hladinou v celé délce propustku včetně výtoku;



Obr. 6 Propustek s volnou hladinou v celé jeho délce

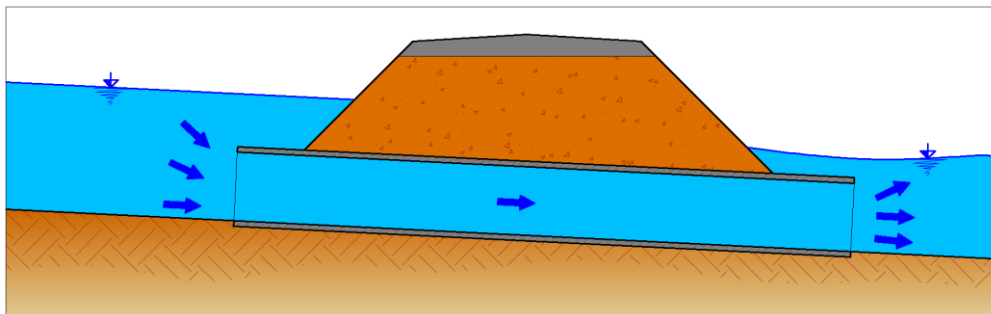
- b) proudění s volnou hladinou a zatopeným vtokem a volným výtokem;



Obr. 7 Propustek se zatopeným vtokem a volnou hladinou uvnitř propustku



c) tlakové proudění, při němž je celý profil propustku vyplněn vodou v celé své délce



Obr. 8 Propustek s tlakovým prouděním

Dále byly tyto tři základní skupiny rozlišovány na podskupiny, které rozlišovaly podmínky dolní vody. Řešilo se tedy, jestli je proudění uvnitř propustku ovlivněno dolní vodou nebo není [3].

Ještě je důležité zmínit, že návrh propustků, u nichž by se počítalo se zahlcením vtoku, je možný jen za podmínek stanovených normou ČSN 73 6201 [6]:

„Přemostění vodního toku objektem, u kterého se počítá se zahlcením vtoku trubní propustky, trubní mosty apod.) a u kterého se provedení vody mostním otvorem děje obvykle za jiných podmínek než nad objektem (změna průtočného profilu, změna sklonu dna i hladiny, změna charakteru proudění, průtok pod tlakem apod.), je dovoleno pouze u malého vodního toku s plochou povodí do 50 km² a variačním rozpětím $Q_{100}/Q_1 < 6,5$ nebo jedná-li se o krátkodobý zatímní objekt. Připustnost těchto mimořádných podmínek převedení NP (pozn. NP – návrhový průtok) mostním objektem může povolit jen vodoprávní úřad na základě posouzení povodňového ohrožení území. Obecně nepřipustné je zhoršení odtokových poměrů mostním objektem. Dále je nutno posoudit zda rychlost vody při NP a KNP (pozn. KNP – kontrolní návrhový průtok) neohrožuje mostní objekt a koryto vodního toku pod ním. Rychlost vody ani při tlakovém proudění nesmí překročit hodnotu, při které by byla ohrožena bezpečnost mostního objektu a opevnění koryta pod mostem i v jeho bezprostředním okolí, včetně navazujících násypů pozemní komunikace či dráhy.“ Návrhové hodnoty N-letých průtoků a minimální volné výšky nad návrhovými hladinami jsou uvedeny v téže normě.



Obr. 10 Volný vtok do propustku během povodní



Obr. 9 Zatopený vtok během povodní; viditelná tvorba víru



2.2.1.2 Rozdělení podle anglicky psané literatury

Trochu odlišný je přístup k rozdělení režimů proudění v propustcích v anglicky psané literatuře. Kupříkladu americká publikace *HYDRAULIC DESIGN OF HIGHWAY CULVERTS* (2012) a britská publikace *Culvert design and operation guide* (2010) rozdělovala proudění v propustcích do dvou hlavních kategorií a to na [4; 5]:

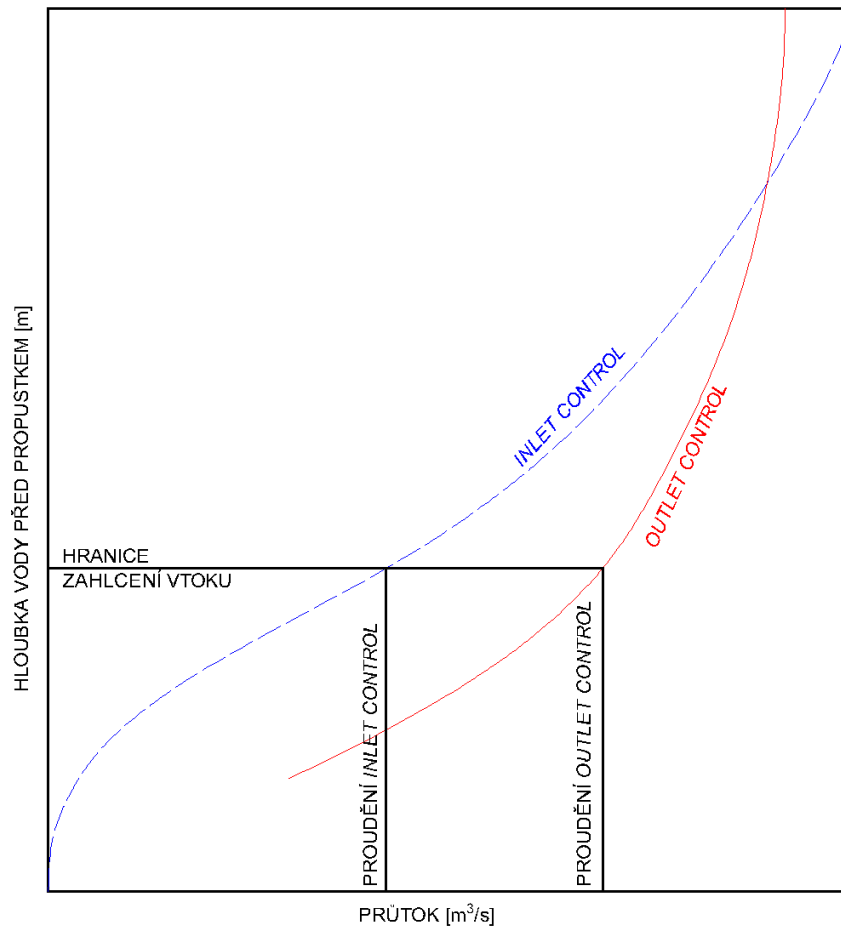
- a) *Inlet Control* (regulace vtokem); objevovala se v případě, že propustek byl schopen převést větší průtok, než mu umožňovala pojmout jeho vtoková část. Hlavní omezení a regulace průtoku tvořil tedy vtok do propustku. Blízko za vtokem se objevovala kritická hloubka a proudění ve zbytku propustku bylo bystřinné. Hydraulické vlastnosti části propustku za vtokem neměly vliv na jeho celkovou kapacitu. Hlavní vliv na proudění měla výška hladiny před propustkem a geometrie vtoku. Vtok do propustku mohl být volný nebo zatopený.
- b) *Outlet Control* (regulace výtokem); objevovala se v případě, že propustek nebyl schopen převést průtok, který umožňovala hltnost jeho vtoku. Hlavní omezení a regulace průtoku byla lokalizována na výtoku z propustku nebo ještě dále v dolní vodě (zatopení proudění v propustku dolní vodou). V propustku bylo především říční nebo tlakové proudění. Kapacitu propustku ovlivňovaly všechny geometrické a hydraulické vlastnosti propustku (geometrie vtoku a výtoku, sklon dna propustku, hydraulická drsnost propustku...).

Tyto dvě hlavní kategorie byly následně rozděleny do dalších podkategorií. Ty rozdělovaly propustky na propustky s nezatopeným a zatopeným vtokem. Následně byly uvedeny jednotlivé základní případy.

Názorně byl rozdílný průběh obou hlavních kategorií (*Inlet Control* a *Outlet Control*) patrný na konzumčních křivkách propustku (viz Obr. 11). V následující tabulce (Tab. 2) je přehledně vidět, které parametry mají vliv na proudění v případech, kdy je rozhodující vtok nebo naopak dolní voda a výtok.

Vliv	Inlet Control (regulace vtokem)	Outlet Control (regulace výtokem)
Horní voda	X	X
Plocha příčného profilu	X	X
Tvar příčného profilu	X	X
Geometrie vtoku	X	X
Hydraulická drsnost propustku	–	X
Délka propustku	–	X
Sklon propustku	X	X
Dolní voda	–	X

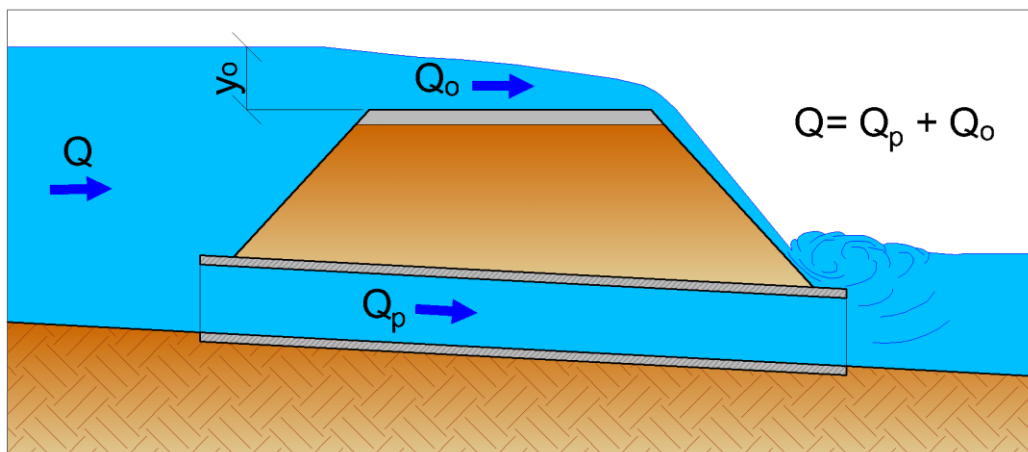
Tab. 2 Uplatňující se vlivy při návrhu propustku; pozn. pro situaci, kdy má hlavní vliv vtok se vlivy plochy a tvaru příčného profilu vztahují ke vtoku do propustku, v případě že je hlavní vliv výtoku tak, se tyto vlivy vztahují k celé délce propustku



Obr. 11 Konzumní křivky propustku

Legenda: Inlet control – bez vlivu dolní vody; Outlet control – vliv dolní vody

Kromě toho rozlišovala anglicky psaná literatura ještě jeden důležitý případ, který byl v naší literatuře opomíjený. Jedná se o případ, kdy došlo k přelítí vozovky. Horní voda tedy došla k takové úrovni, že se začala přelévat přes komunikaci. Tento případ, který by vůbec neměl nastat, byl řešen početně jako součet průtoku propustkem a průtoku, který přepadá přes komunikaci (počítaný jako přepad přes širokou korunu; v případě vyšší úrovně dolní vody počítaný jako přepad nedokonalý) [4; 5]. Protože tento krajní případ nebyl předmětem výzkumu, tak nebude dále v této práci rozepisován.



Obr. 12 Schéma přelítí vozovky

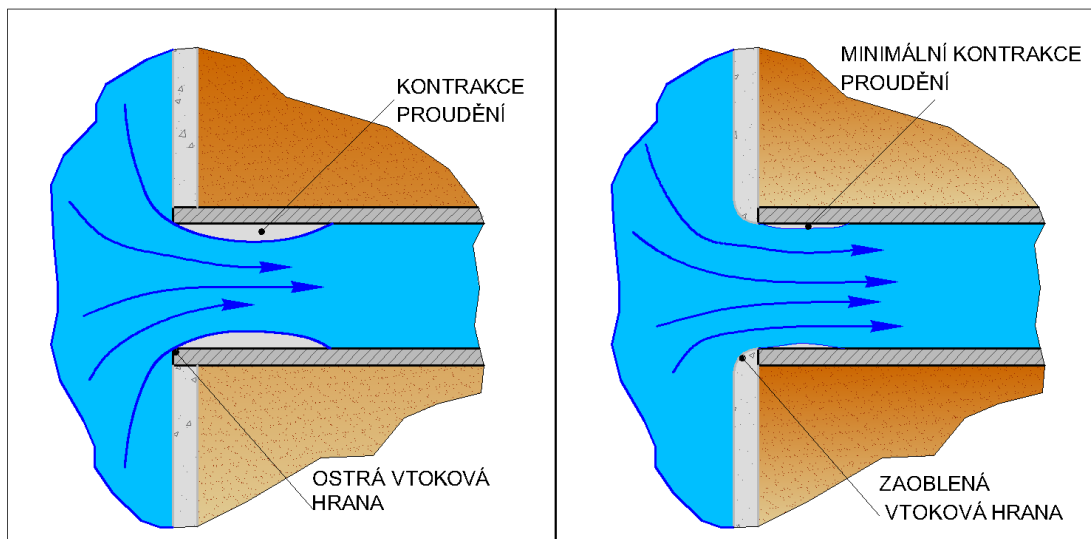
značení: Q – celkový průtok, Q_o – přepadající průtok, Q_p – průtok propustkem, y_o – výška přepadu



2.2.2 Vliv řešení vtoku

Řešení vtoku významně ovlivňuje proudění v celém propustku. Proto je důležité jeho návrhu věnovat pozornost. Existuje řada možností, jaký vtok navrhnout. Vtoky jsou buď již prefabrikované nebo se budují na místě. Při výběru vtoku dbáme především na hydraulické vlastnosti, statiku konstrukce, možnost eroze, ekonomiku výstavby a ochranu přírody [4].

Koryto toku je většinou širší než propustek, kterým je voda v daném místě převáděna. Tím dochází k náhlému zúžení proudění. Čím větší budou kontrakce proudění a tedy i vyšší energetické ztráty, tím méně bude vtok propustek kapacitní. Abychom kontrakce proudění minimalizovali, tak je ideální používat geometrie hydraulicky vhodné. Je tedy vhodné se u vstupní hrany vyhnout ostrým rohům a snažit se o zaoblení a plynulé rozšíření vtoku [4; 10].

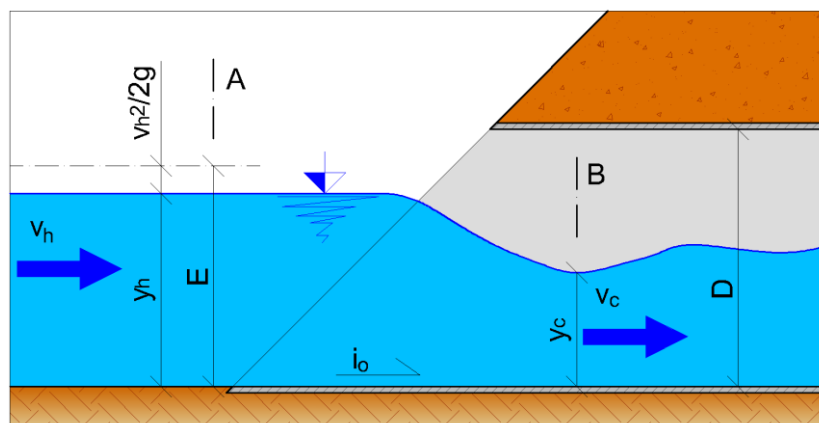


Obr. 13 Kontrakce proudění ve vtoku do propustku; při zaoblení hran je kontrakce menší

Při proudění o volné hladině vzniká kontrakcí na počátku propustku zúžená hloubka. Pokud nemá na tento průřez vliv vzduť od výtoku, tak lze tuto kontrahovanou hloubku určit podle současné metodiky ze vzorce [3; 8; 9]:

$$y_c = \kappa \cdot y_k \quad (2.1)$$

kde y_c – zúžená hloubka [m],
 κ – součinitel výškového zúžení [-],
 y_k – kritická hloubka [m].



Obr. 14 Vtok do propustku s volnou hladinou; zúžená hloubka



Hodnota součinitele výškového zúžení k se určila podle geometrie vtoku z tabulek. Obvykle se jeho hodnota pohybovala v rozmezí 0,85 – 0,95 podle naší literatury [3; 9; 11]. Pro zjištění kritické hloubky u kruhového profilu bylo možné zvolit jednu ze dvou možností. První možností bylo využití tabulek (viz Příloha 1 – tabulka: kruhový profil částečně plněný), kde po výpočtu kritické funkce (viz níže) byla určena kritická hloubka [8].

Kritická funkce:

$$\frac{\alpha Q^2}{g D^5}$$

kde α – Coriolisovo číslo [-],
 Q – průtok [m^3/s],
 g – gravitační zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$],
 D – průměr propustku [m].

Druhým způsobem bylo určení kritické hloubky z empirických rovnic, např. podle Diskina [12]:

$$y_k = D \cdot \left(\frac{\alpha \cdot Q}{\sqrt{g \cdot D^5}} \right)^{0,513} \quad \text{platnost } 0,05 \leq y_k / D \leq 0,85 \quad (2. 2)$$

nebo podle Abbota [12]:

$$y_k = \frac{\sqrt{0,32 \cdot Q}}{\sqrt[4]{D}} \quad (2. 3)$$

Pro obdélníkový profil se použila rovnice [3; 9]:

$$y_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha \cdot Q^2}{g \cdot b^2}} \quad (2. 4)$$

kde b – šířka propustku [m].

Zásadní pro řešení propustků byla Bernoulliho rovnice. Pokud bychom ji aplikovali pro příčný profil před propustkem (A) a příčný profil v propustku v místě zúžené hloubky (B), jež nebyla zatopená, při nezahlneném vtoku do propustku, tak by byla Bernoulliho rovnice ve tvaru [11]:

$$i_0 \cdot L_{AB} + y_h + \frac{\alpha \cdot v_h^2}{2 \cdot g} = y_c + \frac{\alpha \cdot v_c^2}{2 \cdot g} + \xi \cdot \frac{v_c^2}{2 \cdot g} \quad (2. 5)$$

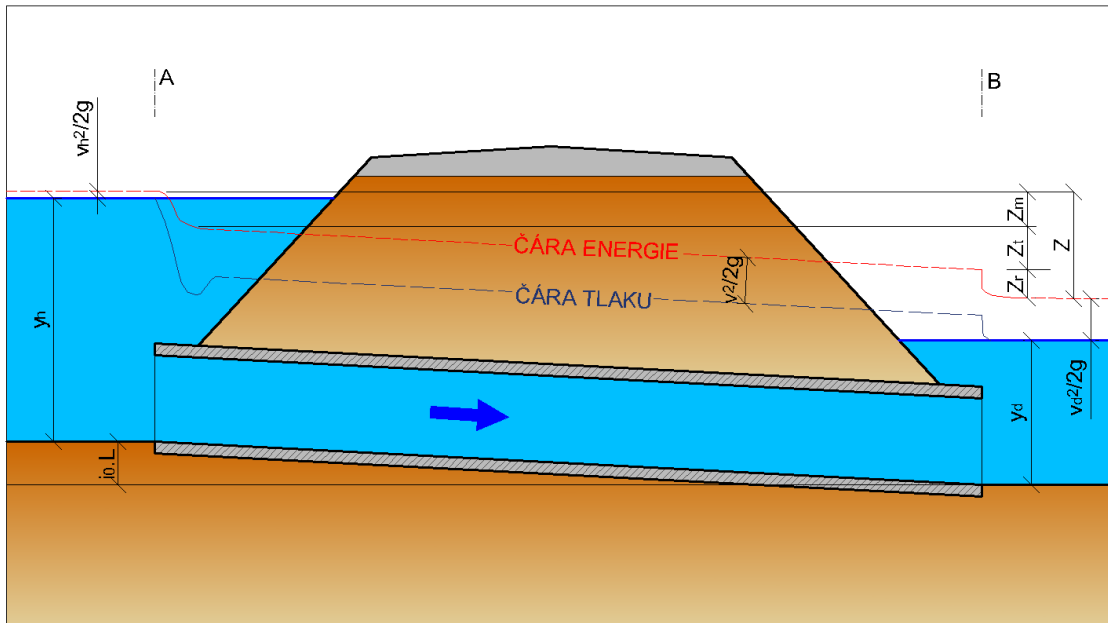
většinou $i_0 \cdot L_{AB} \cong 0$

kde i_0 – podélný sklon [-],
 y_h – úroveň hladiny před propustkem [m],
 $\alpha v_h^2 / 2g$ – rychlostní výška před propustkem,
 y_c – úroveň hladiny v propustku (v místě zúžené hloubky) [m],
 $\alpha v_c^2 / 2g$ – rychlostní výška v propustku (v místě zúžené hloubky),
 ξ – ztrátový součinitel (někdy značeno ζ) [-].

Přesnou představu o průběhu čáry energie (pozn. čára energie je čára, která reprezentuje dostupnou energii v kapalině) nám dává následující obrázek (viz Obr. 15). Na tomto obrázku můžeme vidět, jak významná je místní ztráta energie způsobená vtokem do propustku. Tato ztráta je



způsobená náhlým zúžením proudění (kontrakcí) a následným náhlým rozšířením proudění [13; 14] a závisí na geometrii vtoku [3; 4; 9; 15].



Obr. 15 Znárodnění průběhu čáry energie v propustku při tlakovém proudění ovlivněním dolní vodou
značení: Z – celková ztráta, Z_m – místní ztráta na vtoku, Z_t – ztráta třením, Z_r – ztráta náhlým rozšířením

Podle metodiky byla místní ztráta typicky charakterizována součinitelem ξ (v anglické literatuře značeno: k_e), který byl přenásoben rychlostní výškou ve vtoku propustku (typicky v místě zúžené hloubky):

$$Z_m = \xi \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (2.6)$$

kde Z_m – místní ztráta [m].

Vhodná geometrie vtoku snížila velikost místní ztráty a mohla tím umožnit zkapacitnění propustku. Velikost ztrátového součinitele ξ se lišila pro každý druh vtoku [3; 4; 9; 15]. Jeho velikost se pohybovala v závislosti na zvolené geometrii vtoku přibližně od 0,05 do 0,9 podle česky psané literatury [3; 9; 11] a od 0,1 do 0,9 podle anglicky psané literatury [4; 5; 16]. Jakou přesně zvolit hodnotu se určilo z dostupných tabulek, v nichž byla k základním geometriím vtoku přiřazena konkrétní hodnota součinitele ξ . Tyto tabulky jsou vloženy dále v této práci. Součinitelé v těchto tabulkách byly určitým zjednodušením, neboť hodnoty v nich byly jistým průměrem, který nezohledňoval změnu hodnoty součinitele místní ztráty při změně průtoku a hladiny. Reálně není součinitel místní ztráty jen jedna hodnota ale spíše křivka, která se nejlépe určí na fyzikálním modelu [17].

Je vhodné též zmínit, že Robinsovy experimenty ukazovaly, že vtoková ztráta byla nezávislá na viskozitě vody a Reynoldsově čísle [15].

Se součinitelem místní ztráty souvisel rychlostní součinitel φ [3; 9]:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\xi}} \quad (2.7)$$

kde φ – rychlostní součinitel [-].

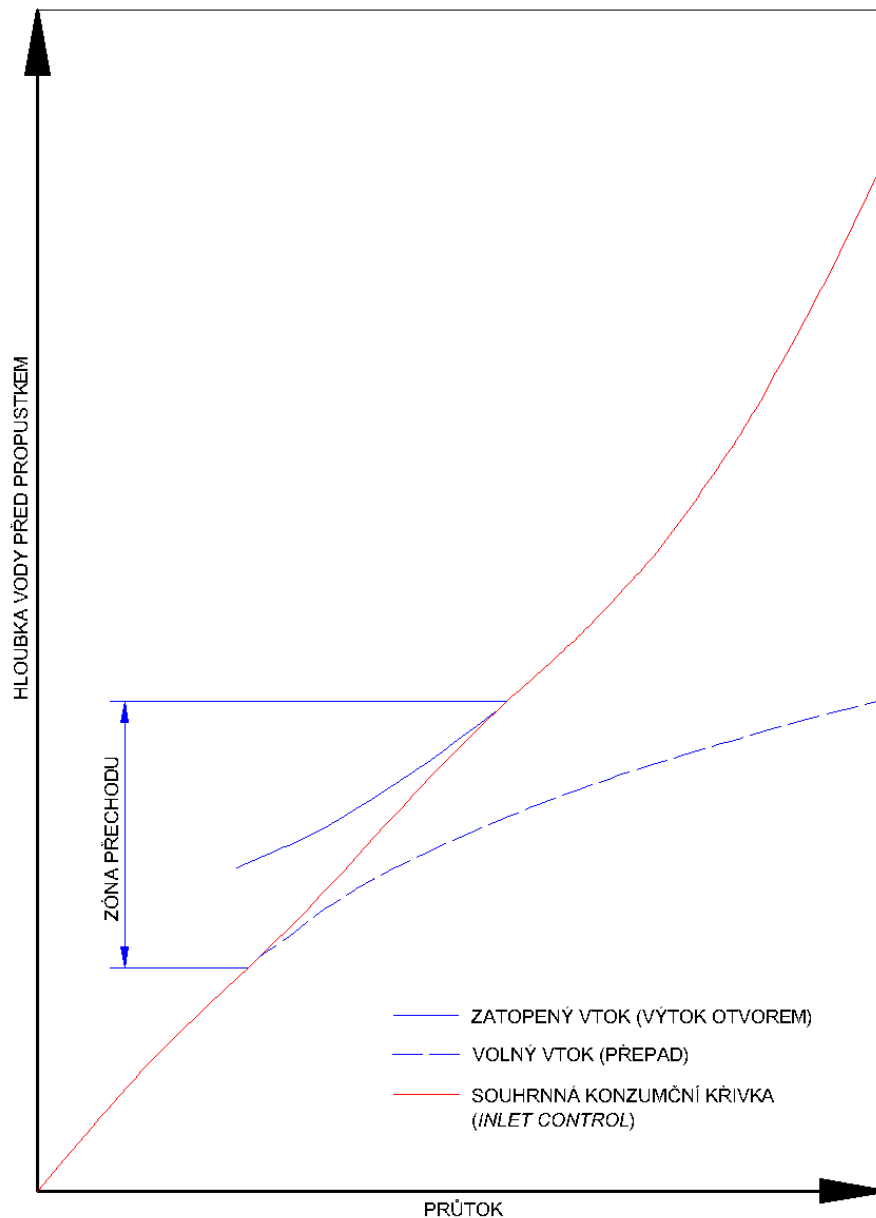


K posouzení zatopení vtoku mohl posloužit součinitel zatopení β . Obvyklé hodnoty byly k nalezení v tabulkách. Vtok do propustku byl zatopen, pokud byla splněna podmínka [3; 9]:

$$y_h > \beta \cdot D \text{ resp. } y_h > \beta \cdot H \quad (2.8)$$

kde y_h – úroveň hladiny před propustkem [m],
 β – součinitel zatopení vtoku [-],
 D – průměr kruhového propustku [m],
 H – výška obdélníkového propustku [m].

Konzumční křivka propustku, podle metodiky užívané v USA, pro případy, kdy byl rozhodující vtok, je zobrazena na Obr. 16. Je zde patrné, že průtok propustkem pro nezatopený vtok funguje podobně jako přepad přes jez. Když by byl naopak vtok zatopený, tak se zjednodušeně jedná o výtok otvorem. Přechod proudění mezi volným (rovnice přepadu) a zatopeným vtokem (výtok otvorem) byl v dosud nedostatečně fyzikálně popsán [4].



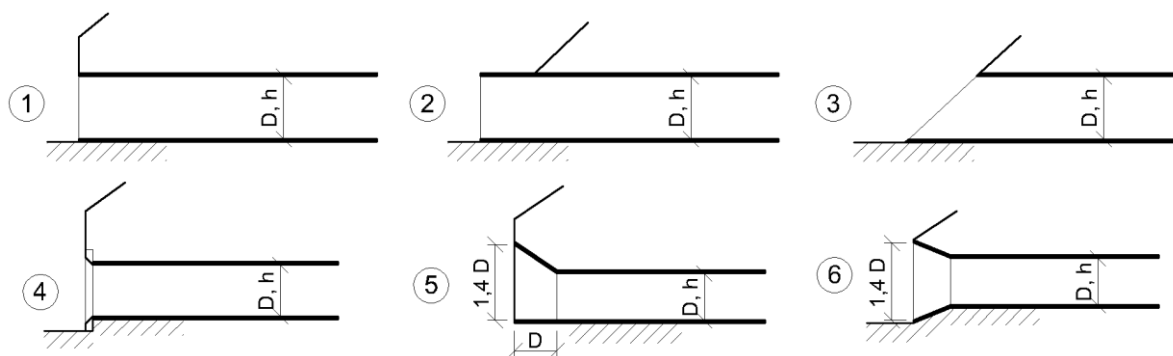
Obr. 16 Konzumční křivka propustku v případě, kdy je rozhodující vtok



V tabulce Tab. 3 jsou uvedeny hodnoty součinitelů pro výpočet proudění v propustcích podle české literatury a k nim příslušející schémata úprav geometrie vtoku (Obr. 19). V příloze na straně 113 jsou uvedeny hodnoty součinitele místní ztráty, jež byly používány v anglicky psané literatuře.

Typ vtoku	ξ	φ	κ	β
1	0,40 – 0,50	0,85 – 0,82	0,90	1,20 – 1,16
2	0,80 – 0,90	0,75 – 0,73	0,86	1,09 – 1,08
3	0,70 – 0,80	0,77 – 0,75	0,87	1,10 – 1,09
4	0,05 – 0,10	0,98 – 0,95	0,97	1,45 – 1,40
5	0,10 – 0,15	0,95 – 0,93	0,95	1,40 – 1,33
6	0,30 – 0,40	0,88 – 0,85	0,94	1,40 – 1,36

Tab. 3 Hodnoty součinitelů: místní ztráty, rychlosti, výškového zúžení a zatopení; jedná se o bezrozměrné součinitele; příslušející geometrie vtoku jsou znázorněny na Obr. 19.



Obr. 19 Schémata úprav vtoku příslušejících k Tab. 3



Obr. 17 Typický vtok do propustku: svislá čelní stěna a sklopené boční stěny



Obr. 18 Typický vtok do propustku: vtok zarovnaný se svahem (šikmé čelo propustku)



Obr. 21 Typický vtok do propustku: předsazený vtok



Obr. 20 Typický vtok do propustku: kolmá čelní stěna

2.2.2.1 Výzkumy zaměřené na vtoky do propustku

Problematika návrhu propustků a proudění propustky se řeší již desetiletí. Za tu dobu bylo publikováno mnoho článků a metodických příruček zabývajících se propustky. Naneštěstí tyto publikace nejsou vždy dohledatelné nebo dostupné. V této kapitole jsou stručně uvedeny výsledky některých u nás méně známých článků a publikací, které jsou více objasňují problematiku řešení vtoků do propustků.

2.2.2.1.1 The Flow of Water Through Culverts (1926) – „Proudění vody propustky“ [18]

15. února roku 1926 byla vydána rozsáhlá publikace: „*The Flow of Water Through Culverts*“, která prezentovala výsledky 3301 experimentů zabývajících se prouděním v krátkém potrubí. Práce se zaměřila především na propustky kruhového a obdélníkového příčného profilu. Cílem výzkumné činnosti bylo především určit vliv materiálů, rozměrů a geometrie (hrany a zaoblení) na kapacitu propustku a následně vyhodnotit, které principy by byly vhodné pro optimalizaci návrhu (největší kapacita propustku při co nejnižší ceně realizace).

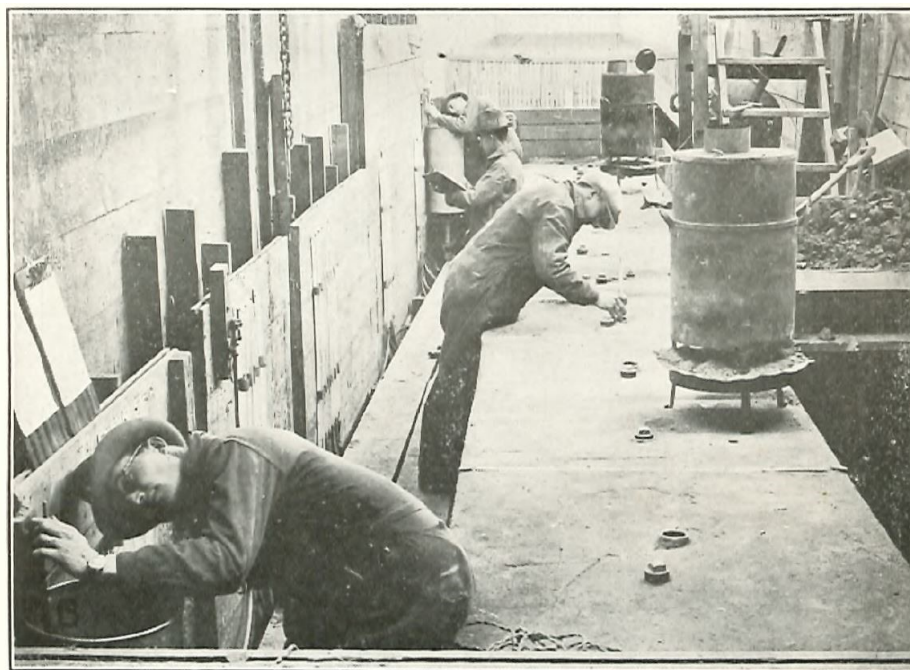
Výzkum byl prováděn v hydraulické laboratoři University of Iowa, která se nacházela na břehu řeky Iowa. Postavena byla v roce 1919 a sestávala z testovacího žlabu, nádrže a odpadního kanálu. Testovací kanál byl délky 130 stop (39,62 m) šířky 10 stop (3,048 m) a byl hluboký 10 stop (3,048 m). Průtok vody v kanálu byl regulován stavidlem. K měření průtoku byl použit přeliv s ostrou hranou (Bazinův). K měření úrovně hladiny bylo použito hrotové měřítku tvaru háku; uvnitř propustku byly k měření použity piezometry. Byly měřeny různé režimy proudění (volná hladina, tlakové proudění, ovlivnění proudění dolní vodou atd.). Byly měřeny základní geometrie vtoku – kolmá čelní stěna, předsazený propustek, různé varianty bočních zdí na vtoku, různé varianty zaoblení a zkosení hran vtoku apod. Testované materiály byly tři a to: beton, vlnitý plech a kamenina. Průměry měřených propustků se pohybovaly od 12 (0,305 m) do 30 palců (0,762 m).

Výzkum vedl k 38. hlavním poznatkům (viz dále). Dále byly vytvořeny konzumční křivky propustků, stanoveny mnohé empirické rovnice, určeny základní koeficienty a součinitelé (např. koeficient místní ztráty na vtoku, Kutterův a Manningův drsnostní součinitel...) a bylo zpracováno rozložení rychlostí v propustku. Vzhledem k rozsahu celé publikace a také tomu, že její výzkum se



týká základů, které jsou dnes obecně známé, budou nyní uvedeny pouze ty z hlavních poznatků, které se jeví jako nejzajímavější [18]:

- a) Pro plné využití profilu propustku a tedy získání maximální možné kapacity propustku musí být propustek uložen tak, aby došlo k tlakovému proudění (poznatek č. 2).
- b) Zkosení hran u betonových propustků značně snižuje vtokovou ztrátu; obzvláště u větších průměrů (poznatek č. 17).
- c) Nálevkovitý tvar vtoku u kameninových propustků značně snižuje vtokovou ztrátu; obzvláště u menších průměrů (poznatek č. 18).
- d) Hodnota koeficientu místní ztráty na vtoku pro dané zaoblení hran vtoku se mění s tvarem příčného profilu propustku. Příčný průřez, který má největší hydraulický poloměr (pro stejnou plochu), má také nejvyšší hodnotu koeficientu místní ztráty. Koeficient místní ztráty na vtoku je tedy vyšší pro kruhový příčný průřez než pro čtvercový a ten pro čtvercový je vyšší než pro obdélníkový příčný průřez (poznatek č. 37).



Obr. 22 Testování volného proudění v obdélníkovém propustku (3 x 3 stopy; délka 36 stop) v roce 1926

2.2.2.1.2 Hydraulic Data Comparison of Concrete and Corrugated Metal Culvert Pipes (1950) – „Srovnání hydraulických vlastností propustků z betonu a z vlnitého plechu“ [19]

Tato práce byla zaměřena na srovnání propustků z betonu a z vlnitého plechu. Cílem bylo určit Manningův drsnostní součinitel a koeficienty místní ztráty na vtoku přesněji než bylo uváděno v dobové literatuře.

Výzkum probíhal v laboratoři „St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory of the University of Minnesota“ v padesátých letech 20. stol. Bylo měřeno celkem 9 propustků s kruhovým průřezem o průměrech od 18 palců (0,457 m) do 36 palců (0,914 m); každý měřený propustek měl délku 193 stop (58,83 m). Měření byla prováděna, jak pro tlakové proudění, tak pro proudění o volné hladině. Pro tyto dva základní režimy bylo použito velké rozpětí testovaných průtoků. Místní ztráta na vtoku byla



určena pro všechny testované průtoky i modely. Byly použity dvě geometrie vtoku – předsazený vtok do propustku (předsazení oproti zdi bylo 2 stopy, tzn. 0,601 m) a kolmá čelní stěna propustku s vtokem v rovině stěny. Byly měřeny průtoky, průběhy tlaků (tlaková čára) a teplota.



Obr. 23 Model betonového propustku s průměrem 36 palců v hydraulické laboratoři při výzkumu v polovině 20. stol.; modelovaná geometrie vtoku – kolmá čelní stěna

Práce konstatovala, že použití vlnitého plechu bylo zřetelně hydraulicky méně efektivní v porovnání s betonem. Podle práce by propustky měly být navrhovány tak, aby při návrhovém průtoku a návrhové výšce hladiny před propustkem nastalo tlakové proudění uvnitř propustku. Důvodem bylo, že při tlakovém proudění byl propustek více kapacitní než při proudění o volné hladině. Hlavním výsledkem práce byla tabulka III, která zde uvedena jako Tab. 4.

Položka	Vlnitý plech	Beton
Manningův součinitel, tlakové proudění	0.0250	0.0100
Manningův součinitel, volná hladina	0.0240	0.0110
Předsazený vtok – koeficient, tlakové proudění	0.90	0.15
Předsazený vtok – koeficient, volná hladina	0.70	0.15
Kolmá čelní stěna – koeficient, tlakové proudění	0.50	0.10
Kolmá čelní stěna – koeficient, volná hladina	0.40	0.10

Tab. 4 Doporučené návrhové hodnoty součinitelů pro vlnitý plech a beton



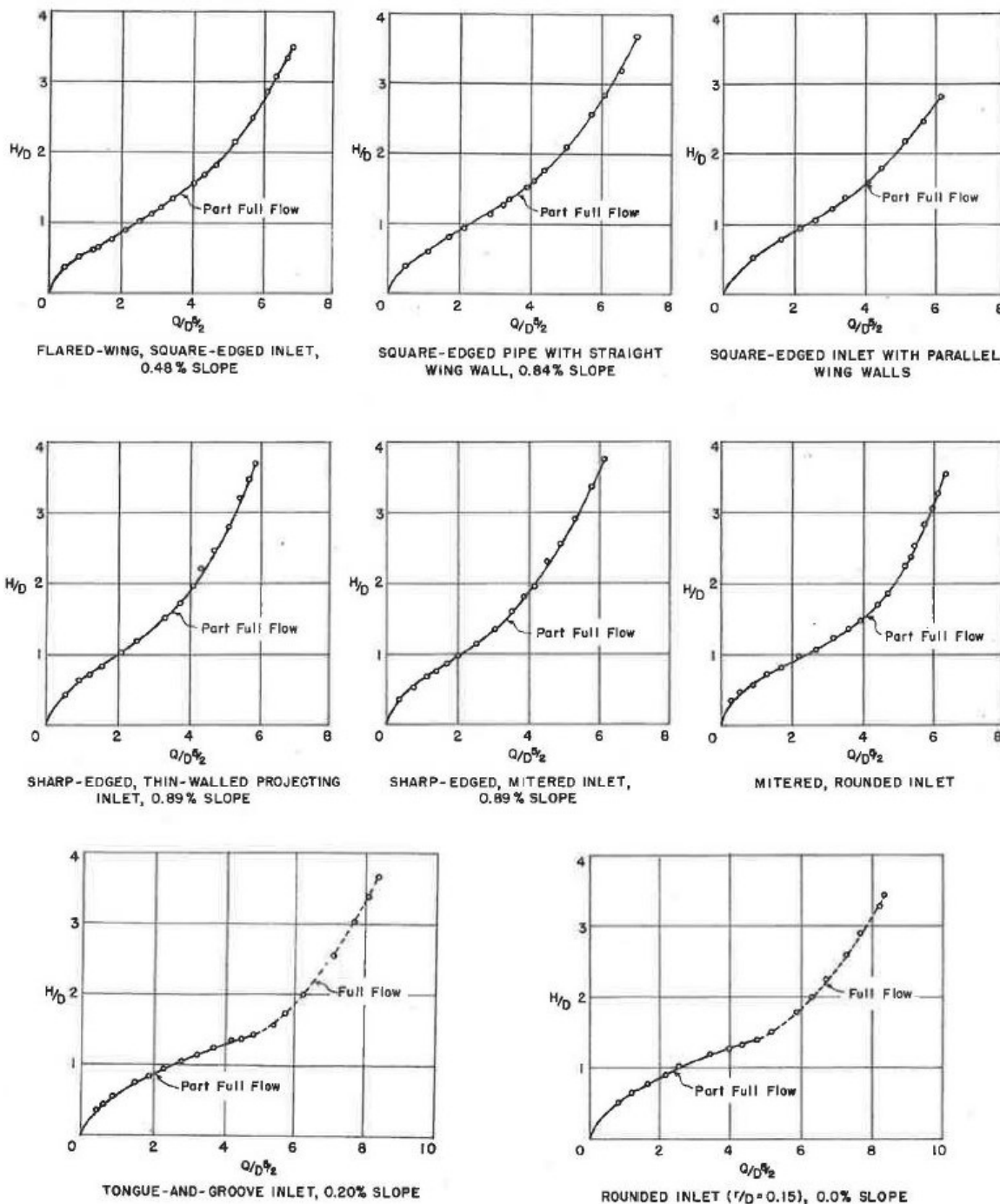
Místní ztráta na vtoku se neprojevila jen v malé oblasti u vtoku, ale projevovala se dále do propustku nejméně do vzdálenosti několika průměrů propustku. Přitom její velikost byla ovlivněna především rozšířením proudění kontrahovaného proudu za vtokem (pozn. autora: toto zjištění potvrzují závěry z bakalářské práce, která předcházela této diplomové práci [14]). Nejvíce byla vtoková ztráta ovlivněna geometrií vtoku; čím více byl proud kontrahován, k tím většímu docházelo následnému rozšíření proudu a tedy i ztrátě náhlým rozšířením (pozn. Bordova ztráta). Největší kontrakce se ukázaly pro předsazený vtok s malou tloušťkou stěny (ostrá hrana). Při použití geometrie s kolmou čelní stěnou a vtokem v úrovni této stěny byla místní ztráta nižší. Pro betonové propustky byl koeficient místní ztráty nižší. Důvodem bylo, že testované betonové propustky měly konec opatřeny hrdlem pro možnost spojování (viz Obr. 23). Tím pádem byla kontrakce způsobená vtokem menší a i ztráta na vtoku byla menší. Práce také konstatovala, že velikost součinitele místní ztráty na vtoku nějak souvisí s průměrem propustku a zaoblením vstupní hrany. Více toto konstatování práce neupřesňovala.

2.2.2.1.3 Tests on Circular-Pipe-Culvert Inlets (1955) – „Pokusy na vtocích do kruhových propustků“ [20]

Vliv různých geometrií vtoků do propustku byl řešen v hydraulické laboratoři „A & M College of Texas“. V tomto výzkumu bylo testováno celkem 6 variant vtoků do propustku. Testované geometrie byly: (1) ostrá hrana vtoku v jedné rovině s kolmou čelní stěnou propustku, (2) tenkostěnný předsazený vtok propustku osazený ve svahu se sklonem 1 : 1,5, (3) vtok do propustku zarovnaný se svahem (šikmé čelo) ve sklonu 1 : 1,5 s ostrou hranou, (4) vtok do propustku zarovnaný se svahem ve sklonu 1 : 1,5 se zaoblenou hranou (zaoblení $r/D = 0,125$), (5) předsazený vtok propustku s širší stěnou a hrdlovým spojem osazený ve svahu se sklonem 1 : 1,5 a (6) předsazený vtok propustku s širší stěnou, která je zaoblena (zaoblení $r/D = 0,15$), osazený ve svahu se sklonem 1 : 1,5. Pro vtok (1) byly řešeny tři varianty bočních zdí a to: varianta s rovnoběžnými bočními zdmi, varianta se šikmými bočními zdmi (úhel naklopení zdi 30° od osy propustku) a varianta s lichoběžníkovým příčným profilem (sklon svahů 1 : 1,5). Všechny varianty byly umístěny v simulovaném náspu se svahy ve sklonu 1 : 1,5 a tedy směrem proti proudění se zdi snižovaly, až se srovnaly s terénem dna. Modely byly testovány v dřevěném hydraulickém žlabu dlouhém 17 stop a 10 palců (5,436 m), širokého 2 stopy a 8 palců (0,813 m) a hlubokého 1 stopa a 9 palců (0,533 m). Všechny modely byly vyrobeny z plexiskla a měly délku 69 palců (1,753 m), kromě vtoku (1), který měl délku 52 palců (1,321 m). Průměr modelů propustků byl 5 palců (0,127 m). Sklon modelů se nastavoval různý.

Měření probíhala od nejmenších průtoků po možnou kapacitu žlabu. K měření bylo použito hrotové měřidlo. Pro všechna měření byl volný nezatopený výtok z propustku. Nebyly provedeny žádné pokusy s vlivem dolní vody.

Autor článku *Tests on Circular-Pipe-Culvert Inlets (1955)* postupoval následovně: do grafu byl vynesena vztah H/D (H – výška vody před propustkem; D – průměr propustku) jako závislé proměnné a vztah $Q/(g^{1/2} \cdot D^{5/2})$, kde Q značí průtok a g gravitační zrychlení, jako nezávislé proměnné, výsledná bezrozměrná konzumní křivka umožnila definovat proudění na vtoku pro velké rozpětí rozměrů. Gravitační zrychlení bylo uvažováno jako konstanta a tím pádem jej šlo ze vztahu vynechat. Výsledné bezrozměrné křivky jsou k zobrazeny na následujícím Obr. 24.



Obr. 24 Srovnání bezrozměrných konzumčních křivek pro jednotlivé geometrie vtoku a různé sklony dna propustku; u křivek z modelů s malými sklony dna je patrný přechod z proudění o volné hladině k tlakovému proudění uvnitř propustku; schémata vtoků jsou k nalezení v přílohách na straně 115

Zhodnocením výsledků měření se dospěl R. E. Schiller k následujícím závěrům:

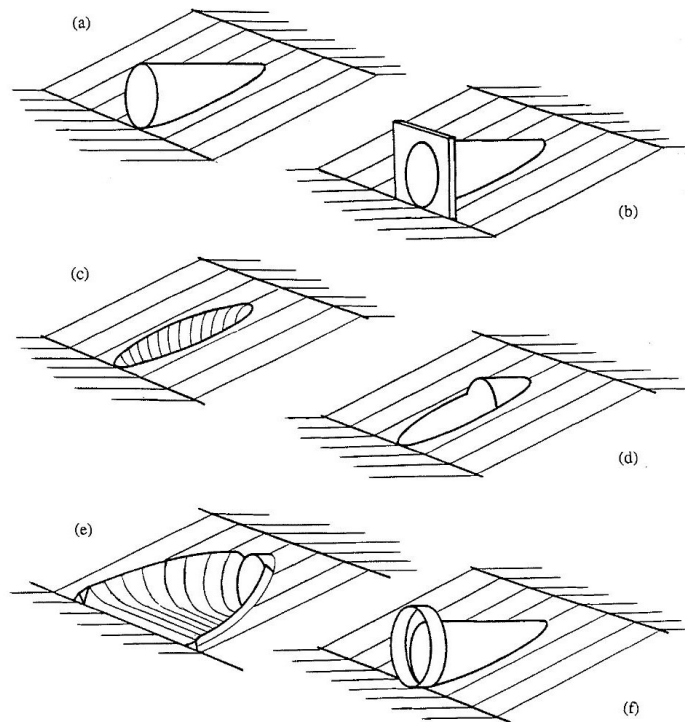
1. Betonové kruhové propustky byly méně efektivní; pokud se na vtoku použila geometrie, která kopírovala sklon svahu, v porovnání s geometrií, kdy byl vtok předsazený (tedy „neseříznutý“ podle svahu).
2. Pouze u dvou geometrií, konkrétně geometrií (5) a (6), vzniklo tlakové proudění, pokud byl poměr H/D pod 3,7. Tlakové proudění u nich vzniklo při poměru H/D vyšším než 1,5. Při poměru H/D mezi 1,2 a 1,5 nebylo proudění stabilní, dokud nebylo dosaženo poměru 1,5.



3. Předsazený vtok s ostrou hranou nebyl tak efektivní jako vtok s kolmou čelní deskou. Dalším výsledkem tohoto výzkumu byly nomogramy.

2.2.2.1.4 Culvert inlet efficiency (1995) – „Efektivnost vtoku do propustku“ [17]

Cílem výzkumu C. D. Smithe a A. G. Oaka bylo doplnit chybějící informace o užívaných nových typech vtoků do propustků. Proto bylo modelovým výzkumem přezkoumáno celkem 6 geometrií vtoků, které jsou znázorněny na Obr. 25. Výzkum probíhal v Kanadě na univerzitě: „Saskatchewan“.



Obr. 25 Geometrie vtoků do propustku testované v rámci výzkumu v Kanadě

Legenda: (a) předsazený propustek, (b) předsazený propustek s čelní deskou, (c) zkosený propustek podle svahu, (d) částečně zkosený propustek, (e) Armtec (prefabrikovaný), (f) předsazený propustek s kruhovým nástavcem

Pro model byla použita hladká akrylová trubka o průměru 121 mm. Tato trubka představovala model propustku o průměru 1 000 mm; model byl tedy v měřítku 1 : 8,26. Model byl umístěn na střed 800 mm širokého hydraulického žlabu. Byl vytvořen svah z písku o sklonu 1 : 2, v němž byl model lokalizován. Sklon propustku byl 1 %. Poměr H/D byl v rozsahu 1,5 až 3,5. Byla měřena úroveň hladiny (pomocí hrotového měřítka) a průtok (měrným přelivem). Pro řízení vtokem („inlet control“) byl výtok volný. Pro řízení výtokem („outlet control“) byl výtok zatopený a měřeny byly různé průtoky. Byla snaha určit ztrátu třením. Ta byla určena ze dvou odlišně dlouhých potrubí (1,85 a 3,70 m); vtoková ztráta v rozdílu systémů s délkou 3,70 a 1,85 m tvořila ztrátu třením v potrubí dlouhém 1,85 m. Bylo zjištěno, že se takto zjištěný výsledek shodoval s velikostí ztráty třením spočítané podle Darcy-Weisbachovy rovnice s použitím Blasiusovy rovnice pro určení součinitele ztrát třením, tedy rovnici:

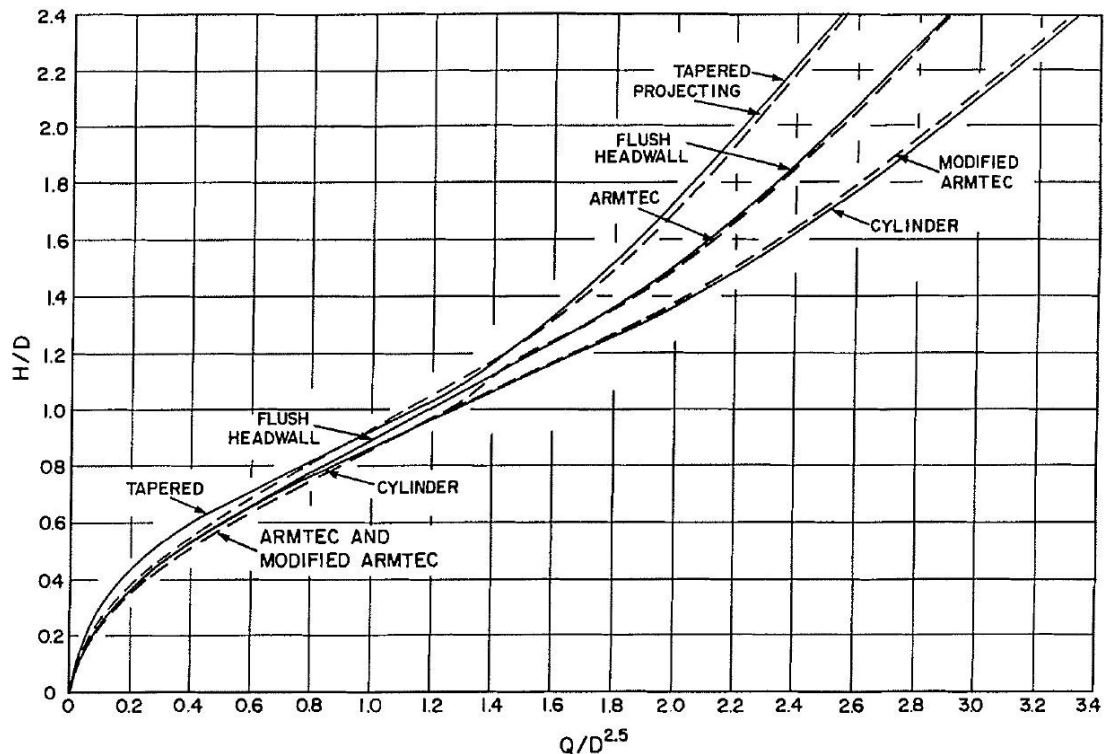
$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (2.9)$$

kde Re – Reynoldsovo číslo [-]



Následně byl vytvořen za účelem zpřesnění v oblasti malých průtoků i druhý model, který byl větší (průměr 201 mm). Na tomto modelu probíhala měření v rozsahu poměru H/D od 0,4 do 2,4. Potrubí tvořící tento model mělo délku pouze 1,35 m z důvodu snahy o minimalizování ztráty třením. Sklon tohoto modelu byl 0,222 %. Čtení úrovně hladiny dolní vody bylo prováděno těsně za výtokem z propustku.

Výsledkem výzkumu pro proudění s volným výtokem z propustku při řízení vtokem („inlet control“) byly bezrozměrné konzumční křivky pro řešené vtoky. Jsou zobrazeny na Obr. 26.

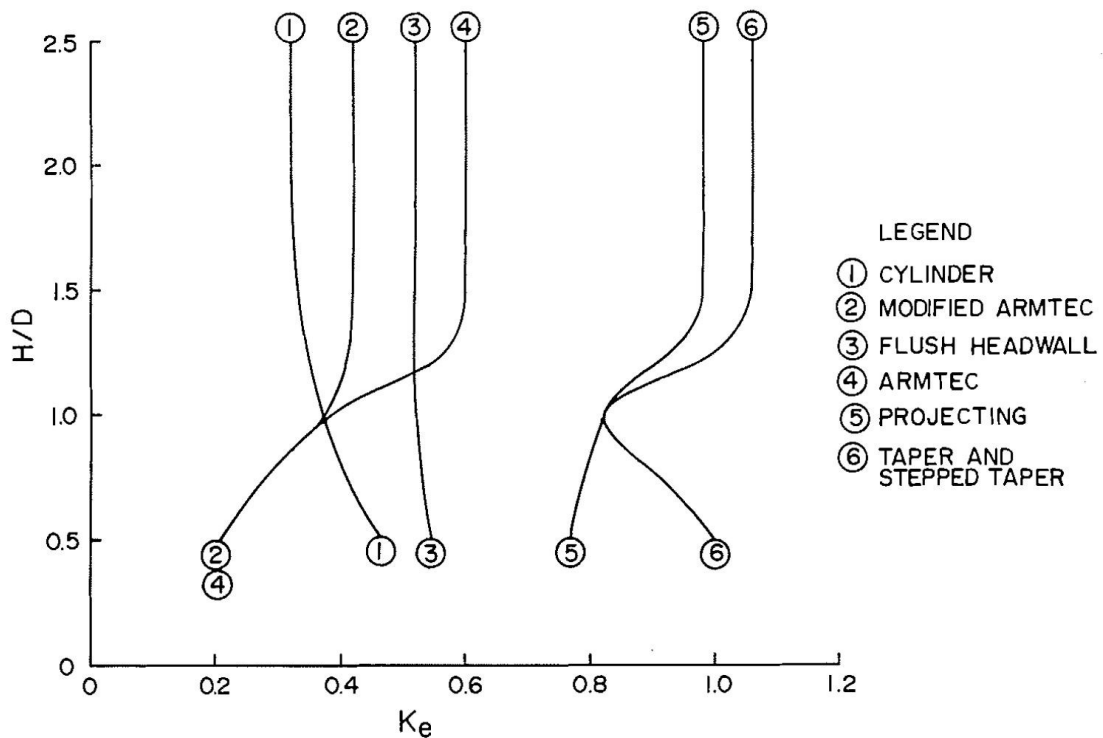


Obr. 26 Výsledné bezrozměrné konzumční křivky pro vtoky řešené kanadským výzkumem

Křivky ukázaly, že pro poměr $H/D \leq 0,8$ byl nejkapacitnější vtok typu Armtec. Při $H/D = 1$ byl vtok Armtec stejně kapacitní jako předsazený propustek s kruhovým nástavcem. Současně i předsazený propustek měl takřka stejnou kapacitu jako vtok zkosený podle svahu (šikmé čelo propustku). V bodě $H/D = 1,5$ se všechny křivky staly parabolickými.

Pro případy s vlivem dolní vody – řízení výtokem („outlet control“) – byly výsledkem křivky udávající průběh koeficientu místní ztráty viz Obr. 27. Lze si povšimnout, že pro poměr $H/D \geq 1,5$ byl průběh velikosti koeficientů místní ztráty na vtoku v podstatě konstantní. Pro hodnoty poměru $H/D \leq 1,5$ vykazovaly průběhy velikosti koeficientů naopak značnou rozdílnost. Pro malé průtoky byl nejvýhodnější vtoky typu Armtec. Ovšem s navyšující se hladinou před propustkem se ztrátový koeficient u toho vtoku rychle zvětšoval. Naopak předsazený propustek s kruhovým nástavcem začal být plně využit, až když byl vtok zcela zatopen. Překvapující mohl být průběh koeficientu místní ztráty pro vtok zkosený podle svahu (šikmé čelo) a vtok částečně zkosený. Zde se totiž při stavu $H/D = 1$ zvrátil dosavadní průběh do opačné tendence.

Výzkum dále určil velikosti koeficientů pro výpočet kapacity propustku, ovšem tyto koeficienty byly jiné, než jsou u nás pro tento výpočet používané a proto zde nebudou uvedeny.

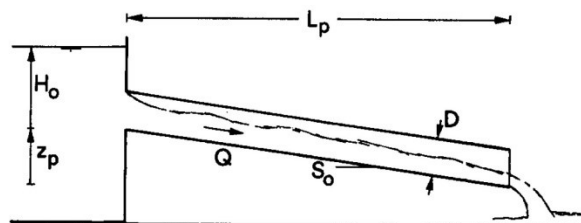


Obr. 27 Výsledné průběhy koeficientu místní ztráty na vtoku pro vtoky řešené kanadským výzkumem

2.2.2.1.5 Generalized Culvert Design Diagram (1998) – „Zobecněný graf pro návrh propustku“ [21]

Ve spolupráci švýcarského (Hager) a italského vědce (Giudice) byl prováděn výzkum s cílem zobecnit konzumní křivky propustku a současně pozorovat hlavní vlastnosti dvoufázové proudění (proudění vody a vzduchu) v propustku.

Výzkum byl prováděn v hydraulickém žlabu obdélníkového průřezu. V něm byl umístěn model kruhového propustku o průměru $D = 100 \text{ m}$ z plexiskla s tokem tvořeným kolmou čelní deskou a ostrou hranou. Průtok byl měřen průtokoměrem a měrným přelivem tvaru V. Délka propustku se pohyboval v délkách $\lambda_p = L_p/D = 20, 40 \text{ a } 60$. Jednalo se tedy o „dlouhé“ potrubí (tj. vliv ztrát třením). Sklon dna propustku byl nastaven od 0,3 % do 3,2 %. Pro všechny prováděné experimenty byl výtok z propustku volný.



Obr. 28 Schéma modelu propustku; značení základních veličin

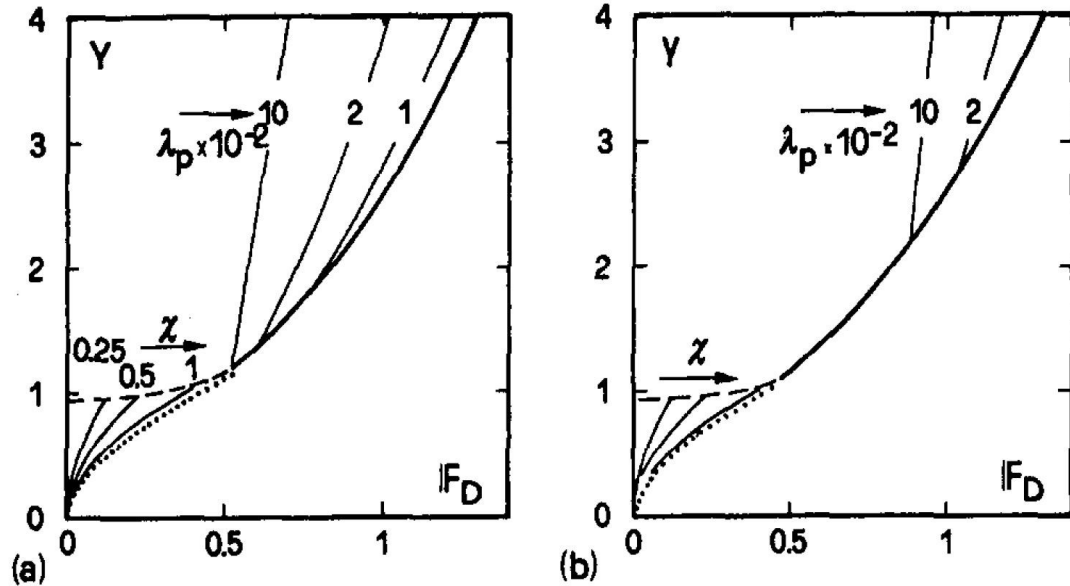
Práce rozlišovala čtyři druhy proudění, které se mohly objevit v propustku:

- kritické proudění („Critical flow“) pro $H_0/D < 1,2$ až $1,4$ a $S_0 > S_c$;
- rovnoměrné proudění („Uniform flow“) pro $H_0/D < 1,2$ a $S_0 < S_c$;



- výtok pod stavidlem – zatopený vtok, volná hladina před propustkem („Gated flow“) pro $H_0/D > 1,2$ až $1,4$ a $S_0 > S_c$;
- tlakové proudění („Pressurized flow“) pro $H_0/D > 1,2$ a $S_0 < S_c$.

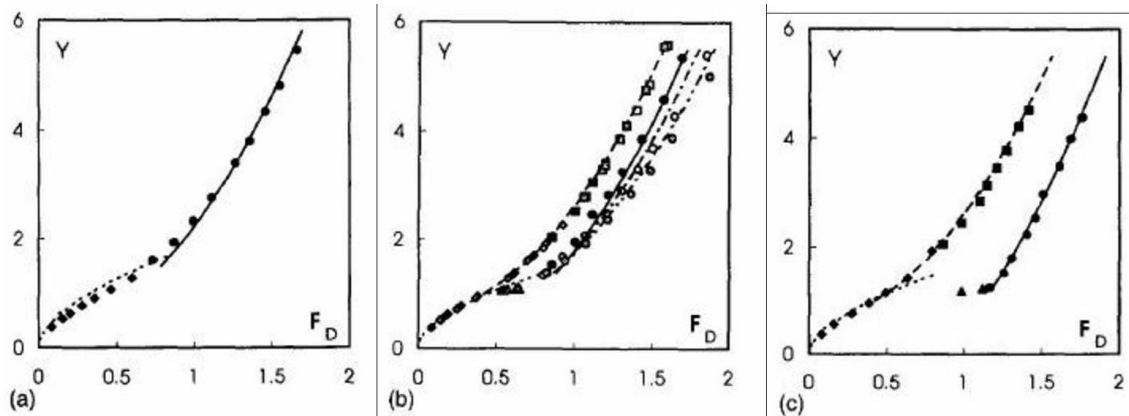
Přičemž S_c = kritický sklon, který závisel především na hydraulické drsnosti. Pro sklony $S_0 < S_c$ byl dominantní vliv ztrát třením; pro případy $S_0 > S_c$ byla dominantní místní ztráta na vtoku (případ tzv. „inlet control“).



Obr. 29 Zobecněný diagram proudění pro propustky
 Legenda: (· · ·) kritické proudění, rovnoměrné proudění (—), proudění jako výtok pod stavidlem (—), tlakové proudění (—) [(---) hranice zahlcení propustku; $S_0 =$ (a) 0,003; $S_0 =$ (b) 0,010].

Zobecněné diagramy proudění pro propustky byly sestaveny pro $Y (F_D)$, kde $Y = H/D$ představovalo relativní energii a F_D bylo Froudovo číslo. Přejechod od proudění o volné hladině byl v bodě $(Y; F_D) = (1,2; 0,53)$. V závislosti na sklonu dna S_0 bylo proudění tlakové nebo typu výtok pod stavidlem.

Konzumční křivky pro různé sklony dna (popř. délky propustku) jsou na Obr. 29.



Obr. 30 Konzumční křivky propustku pro:
 $S_0 =$ (a) 0,3 %, $\lambda_p = 60$, (◆) proudění o volné hladině, (●) tlakové proudění; $S_0 =$ (b) 1,0 %, $\lambda_p = 60$, (◆) proudění o volné hladině, (▲) vodní skok, (●) tlakové proudění, (■) proudění typu výtok pod stavidlem, $\lambda_p = 20$, (◇) proudění o volné hladině, (Δ) vodní skok (○) tlakové proudění, (□) proudění typu výtok pod stavidlem, $\lambda_p = 60$, (⊞) proudění o volné hladině, (×) vodní skok, (+) tlakové proudění, (*) proudění typu výtok pod stavidlem; $S_0 =$ (c) 3,2 %, $\lambda_p = 60$, (◆) proudění o volné hladině, (▲) vodní skok, (●) tlakové proudění, (■) proudění typu výtok pod stavidlem



2.2.3 Řešení výtoku

Pro výtok z propustku byly podle odborné literatury rozlišovány charakteristické dva základní režimy – proudění o volné hladině a tlakové proudění u konce propustku. Proudění o volné hladině se řešilo metodami pro zjištění průběhu hladiny s náhlým rozšířením proudu. Při řešení průběhu hladiny bylo potřeba postupovat tak, aby v případě bystřinného proudění byl směr výpočtu „po proudu“ a v případě říčního proudění byl směr výpočtu naopak „proti proudu“; v případě že v propustku bylo říční proudění a v korytě za propustkem bylo naopak proudění bystřinné, tak docházelo k přechodu hladiny přes kritickou hloubku, která byla lokalizována na konci výtoku z propustku [11].

Podle užívané metodiky bylo zásadní pro tlakové proudění u konce propustku rozlišit, zda výtok byl, či nebyl zatopený [3; 9; 11]. Rozhraní mezi těmito dvěma případy bylo dáno nerovností $\Delta < \Delta_{min}$. Pokud nerovnost platila, pak byl výtok nezatopen dolní vodou. Aby byl totiž výtok zatopen dolní vodou, tak musela být výška hladiny dolní vody o Δ vyšší z důvodu možnosti vzniku podtlaků a následného vniknutí vzduchu do profilu propustku [9]. Δ se určila podle rovnice [3; 9]:

$$\Delta = y_d - D \quad (2.10)$$

kde Δ – převýšení dolní hladiny nad horní hranou propustku [m],

y_d – hloubka vody za výtokem z propustku [m],

D – průměr propustku (popř. výška h obdélníka v případě obdélníkového propustku) [m].

Pokud se aplikovala Bernoulliho rovnice pro profil v propustku (I) a těsně za ním (II) dostala se Bernoulliho rovnici ve tvaru (pozn. v profilu (I) byl přetlak $p_{pl} = 0$) [8; 11]:

$$D + \frac{\alpha \cdot v^2}{2 \cdot g} = y_d + \frac{\alpha \cdot v_d^2}{2 \cdot g} + Z_r \quad (2.11)$$

kde v – rychlost proudění v propustku [$m \cdot s^{-1}$],

v_d – rychlost proudění dolní vody [$m \cdot s^{-1}$],

g – gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$],

D – průměr propustku (popř. výška h obdélníka v případě obdélníkového propustku) [m],

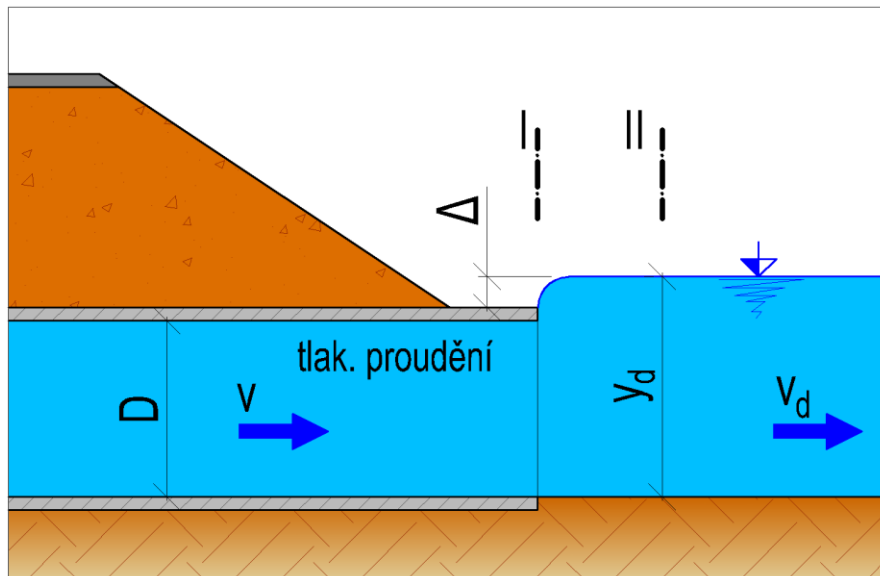
Z_r – Bordova ztráta náhlým rozšířením proudu [m], která se spočítá podle rovnice [8; 11]:

$$Z_r = \frac{(v - v_d)^2}{2 \cdot g} \quad (2.12)$$

Dosazením a úpravou se došlo ke vztahu [8; 11]:

$$\Delta_{min} = \frac{v_d \cdot (v - v_d)}{g} \quad (2.13)$$

kde Δ_{min} – mezní hodnota rozdílu hladin v propustku a za ním, při níž bude výtok zatopen [m].



Obr. 31 Podmínka zahlcení výtoku z propustku

Za výtokem z propustku (jak pro režim volné hladiny na konci propustku, tak pro tlakový režim proudění na konci propustku, kdy byl výtok zatopený nebo pro nezatopený dolní vodou) bylo nezbytné posoudit rychlostní poměry, zvážit případné opevnění koryta toku nebo vybudování vývaru za účelem minimalizace erozních účinků proudu. U nás se z konstrukčního hlediska používaly dvě varianty [3]:

- a) na výtoku z propustku bylo říční proudění: opevnění koryta nebo inundačního území bezprostředně za ním buď betonovou deskou, nebo kamennou dlažbou;
- b) na výtoku z propustku bylo bystřinné proudění: vývar (většinou divergentní – po proudu se rozšiřuje).



2.2.4 Výpočty proudění

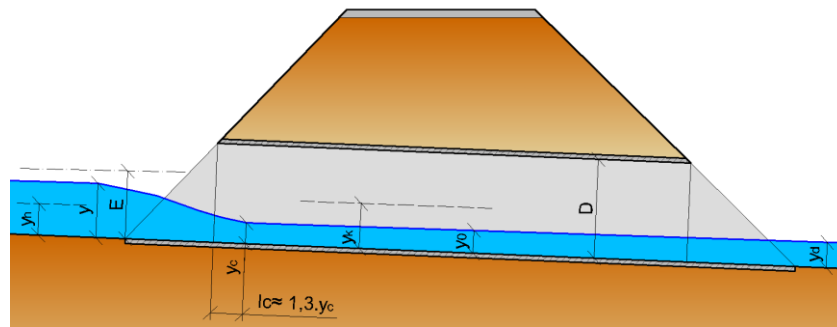
Výpočty dále uváděné budou rozděleny podle dělení česky psané literatury, tedy podle dělení nastíněném v kapitole 2.2.1.1. Vzhledem k tomu, že výzkum, kterým se zabývá tato práce, je zaměřen na propustky s kruhovým průřezem, tak budou primárně uváděné současně používané postupy výpočtu u kruhových propustků a výpočty u propustků s obdélníkovým průřezem budou uváděny informativně.

2.2.4.1 Propustky s volnou hladinou

2.2.4.1.1 Propustky s volnou hladinou, volným vtokem a výtokem

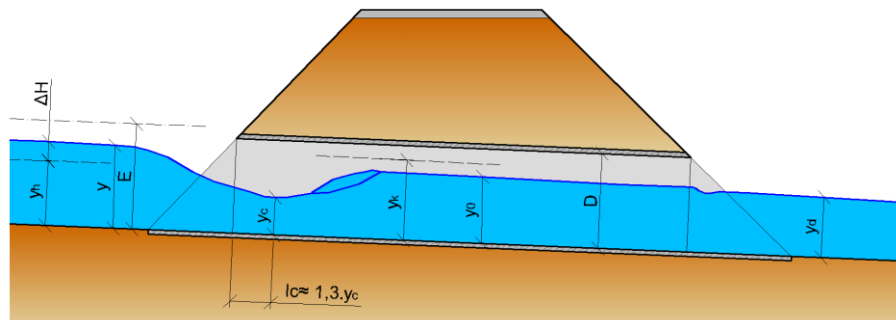
Pro proudění s volnou hladinou, kdy by byl vtok i výtok volný, mohly podle metodiky v propustku nastat dva základní případy rozložení hladiny vody, přičemž zásadně záleží na sklonu dna propustku [9]:

- a) sklon dna propustku byl větší než sklon kritický, tedy $i_0 > i_k$;



Obr. 32 Propustek s volnou hladinou, volným vtokem a výtokem, když $i_0 > i_k$

- b) sklon dna propustku přibližně odpovídal kritickému sklonu, tedy $i_0 \approx i_k$;



Obr. 33 Propustek s volnou hladinou, volným vtokem a výtokem, když $i_0 \approx i_k$

Patočka (1975) určil zjednodušené výpočtové vztahy, které bylo možné použít pro orientační výpočet u kruhových propustků s volnou hladinou, volným vtokem a výtokem; předpokládaná Manningova drsnost byla $n = 0,013$. Vztahy jsou uvedeny v následující tabulce [3; 9]:

Úprava vtoku	Max. hloubka před propustkem	Hloubka zúženého profilu		Max. průtok	Min. průměr
1, 3	$y = 1,2 \cdot D$	$y_c = \kappa \cdot y_k$	$\kappa = 0,9$	$Q = 1,52 \cdot D^{5/2}$	$D_{min} = 0,846 \cdot Q^{0,4}$
5, 6	$y_{max} = 1,4 \cdot D$	$y_c = \kappa \cdot y_k$	$\kappa = 0,95$	$Q = 2,17 \cdot D^{5/2}$	$D_{min} = 0,734 \cdot Q^{0,4}$

Tab. 5 Zjednodušené výpočtové vztahy pro kruhový propustek s drsností $n = 0,013$; úpravy toku lze nalézt na Obr. 19



Pro výpočet vzduť hladiny před propustkem ΔH se vycházelo ze známých hodnot průtoku Q , podélného sklonu i_0 , hloubky vody před vtokem do propustku y_h a hloubky vody za propustkem y_d . K určení dalších potřebných parametrů bylo možné použít vztahy uvedené v Tab. 5; navrhl se průměr propustku D a následně se vypočítala kritická hloubka y_k , zúžená hloubka y_c , průtočná plocha v místě zúžené hloubky S_c a průřezová rychlost v profilu příčné hloubky v_c [3; 9].

Následně byla použita Bernoulliho rovnice (viz rovnice 2. 5), která byla upravena na následující tvar, kde pro energetickou výšku před propustkem platila rovnice [3; 9]:

$$E = y_c + \frac{v_c^2}{2g \cdot \varphi^2} \quad (2. 14)$$

kde E – energetická výška průřezu [m],

y_c – zúžená hloubka za vtokem do propustku [m],

φ – rychlostní součinitel [-]; určil se z tabulek (např. Tab. 3) nebo podle rovnice 2.3,

v_c – rychlost proudění v místě zúžené hloubky [m/s].

Posléze se určila energetická výška průřezu v závislosti na hloubce vody před propustkem [3; 9]:

$$E = y + \frac{v_h^2}{2g} \quad (2. 15)$$

kde y – hloubka před vtokem do propustku [m],

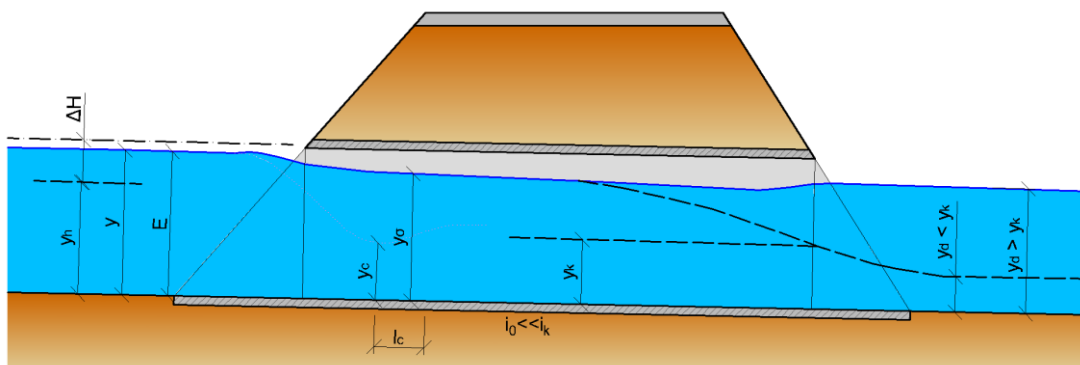
v_h – rychlost proudění před vtokem do propustku [m/s].

Když následně z rovnice 2.14 a rovnice 2.15 byla vyjádřena hloubka y_c respektive y tak bylo možné určit vzduť hladiny před propustkem ΔH [3; 9]:

$$\Delta H = y - y_c \quad (2. 16)$$

Ještě je vhodné zmínit, že v případě, kdy $i_0 \approx i_k$, mohlo dojít k vodnímu skoku, který mohl způsobit zahlcení propustku.

2.2.4.1.2 Propustky s volnou hladinou ovlivněnou dolní vodou



Obr. 34 Propustek s volnou hladinou a vtokem zatopeným dolní vodou

Podle literatury nastávaly dva případy [3; 9]:

- a) pokud $y_d \leq y_k$, tak se na výtoku vytvořila hloubka $y_v = y_k$ a výpočet se prováděl stejně jako u propustku s volným výtokem; tento předpoklad platil, pokud nebylo v propustku bystřinné proudění



- b) pokud $y_d \geq y_k$, tak platilo $y_v = y_d$ a řešil se průběh hladin při nerovnoměrném proudění. Pokud nám vyšla ve vtoku hloubka $y_\sigma \geq 1,25 \cdot y_k$ (v případě obdélníkových propustků $1,1 \cdot y_k$), tak byl vtok ovlivněn dolní vodou a podle toho bylo potřeba změnit výpočet energetické výšky před propustkem, kde se zúžená hloubka y_c nahradila zatopenou hloubkou y_σ [3; 9]:

$$E = y_\sigma + \frac{v_\sigma^2}{2 \cdot g \cdot \varphi^2} \quad (2. 17)$$

kde y_σ – zatopená zúžená hloubka [m],

v_σ – rychlost v místě zatopené zúžené hloubky [m/s].

Pokud se vyjádřil průtok, došlo se k rovnici [3; 9]:

$$Q = \varphi \cdot S_\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (E - y_\sigma)} \quad (2. 18)$$

kde S_σ – plocha průřezu proudění v místě zatopené zúžené hloubky [m²].

2.2.4.2 Propustky se zatopeným vtokem

Při navyšování průtoku dochází k zatápnění vtoku do propustku. Z výsledku pokusů vyplývalo, že u ostrohranných vtoků docházelo k zahlcení přibližně při hloubce y před propustkem o velikosti $1,2 D$, kde D byl průměr propustku (popř. světlá výška u obdélníkových propustků). U rozšířených vtoků byla hranice zatopení $1,4 D$ [8]. Pokud byla výška hladiny před propustkem v rozmezí cca D až $1,2 D$ (popř. $1,4 D$ u rozšířených vtoků), tak se působením nálevkovitého snížení hladiny před vtokem hladina nedotkla horní hrany vstupního otvoru a ve vtoku se udržela volná hladina, byly-li pro to dány i ostatní podmínky (spád, délka propustku atd.) [8].

Nejlépe však k určení rozhraní mezi zatopeným a nezatopeným vtokem sloužil součinitel zatopení β [3; 9]:

$$\beta = \frac{y}{D} \quad (2. 19)$$

kde β – součinitel zatopení [-],

y – hloubka vody před propustkem [m],

D – průměr kruhového propustku (u obdélníkového propustku nahrazeno výškou propustku) [m].

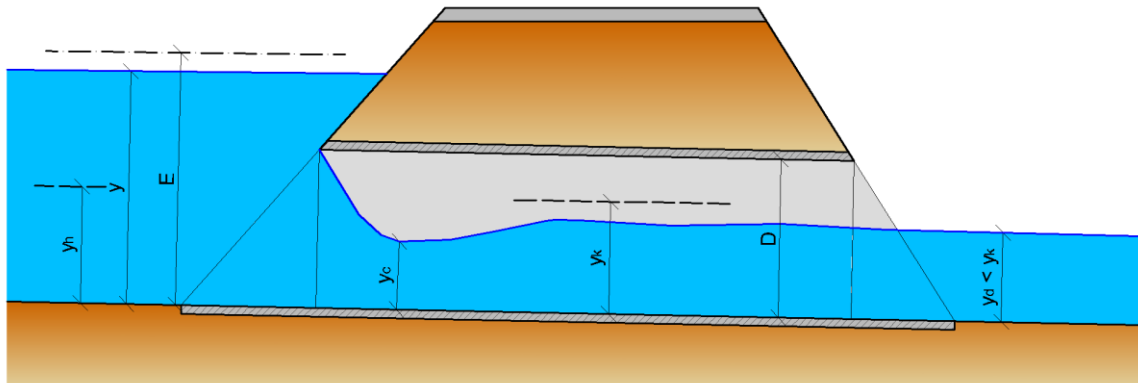
Vtok byl zatopen, pokud platila nerovnost:

$$y > \beta \cdot D$$

Hodnoty součinitele zatopení podle naší aktuální metodiky jsou uvedeny v Tab. 3.



2.2.4.2.1 Propustky s volnou hladinou a se zatopeným vtokem a volným výtokem



Obr. 35 Propustek se zatopeným vtokem a volným výtokem; proudění o volné hladině

Pro kruhový propustek s volnou hladinou, zatopeným vtokem a volným výtokem se mohly opět za předpokladu $n = 0,013$ (beton) pro prvotní návrh použít zjednodušené výpočtové vztahy, které jsou uvedeny v následující tabulce [3; 9]:

Úprava vtoku	Max. hloubka před propustkem	Poměry v zúženém profilu		Podmínka pro průtok $Q < Q_D$	Min. průměr
1, 3	$y = 1,2 \cdot D$	$y_c = 0,6 \cdot D$	$S_c = 0,62 \cdot S_D$	$Q < 24 \cdot D^{8/3} \cdot \sqrt{i_0}$	$D_{min} = \left(\frac{Q}{24 \cdot \sqrt{i_0}} \right)^{3/8}$
5, 6	$y_{max} = 1,4 \cdot D$				

Tab. 6 Zjednodušené výpočtové vztahy pro kruhový propustek s drsností $n = 0,013$; úpravy toku lze nalézt na Obr. 19

Pokud bylo cílem určit potřebný průměr propustku, pak se podle metodiky postupovalo následovně [3; 9] – nejdříve se odhadl poměr

$$a = E/D = y/D \quad (2.20)$$

a poté díky platnosti rovnice

$$Q = S_c \cdot v_c = \varphi \cdot S_c \cdot \sqrt{2g \cdot (E - y_c)} \quad (2.21)$$

kde S_c – zúžená průtočná plocha; určena vzorcem $S_c = 0,62 \cdot S_D$, (2.22)

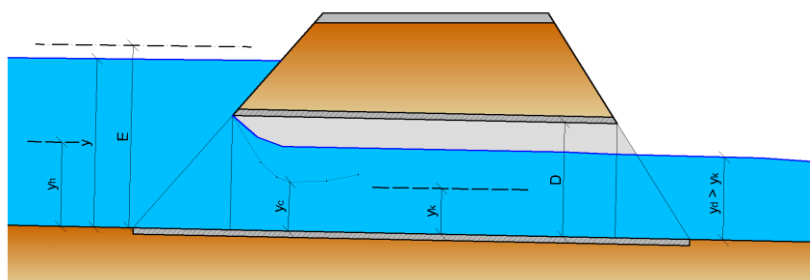
pak bylo možné vypočítat potřebný průměr propustku

$$D = 0,785 \cdot \left(\frac{Q^2}{a-0,6} \right)^{1/5} \quad (2.23)$$

Následně bylo možné za použití rovnice 2. 14 zjistit energetickou výšku před propustkem a tím pádem i vzduť způsobené propustkem, neboť se zjednodušeně uvažovalo $y \cong E$. Následně se posoudilo, zda hodnota $a = y/D$ vykazovala dostatečnou shodu s původním odhadem. Případně se výpočet opravil. Posléze se ověřilo splnění předpokladů zatopeného vtoku horní vodou. Bylo-li ověření splněno, mohlo se přistoupit k podrobnému řešení průběhu hladiny [3; 9].



2.2.4.2 Propustky s volnou hladinou a se zatopeným vtokem ovlivněným dolní vodou



Obr. 36 Ovlivnění zatopeného vtoku propustku dolní vodou

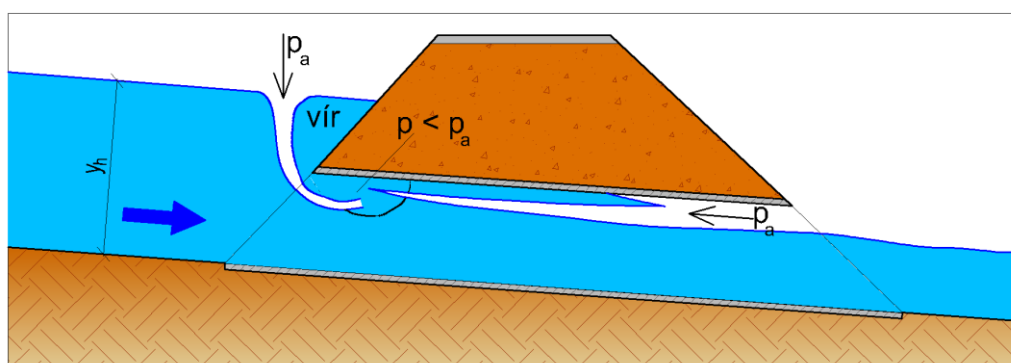
Zatopení vtoku propustku nastává většinou v případech, kdy je veliká dolní hloubka y_d , při malém sklonu dna propustku nebo v případě velké délky propustku. Zúžený profil za vtokem je ovlivněn dolní vodou za podmínky $y_d > y_k$. Zatopení může taktéž nastat vodním skokem v propustku [3; 8; 9].

Výpočet se podle literatury prováděl řešením křivky nerovnoměrného proudění, čímž byla získána zatopení hloubka y_c . Pokud nastaly podmínky zatopení zúženého profilu (viz začátek kapitoly 2.2.4.1.2), tak platila rovnice 2. 18 [3; 9].

2.2.4.3 Propustky tlakové

Důvodů zahlcení celého profilu a přechodu k tlakovému režimu mohlo být podle literatury několik. Nejčastěji to byla vysoká hladina dolní vody. Aby byl zahlcený celý průtokový profil, tak bylo nutné, aby byla úroveň spodní vody výše, než byl průměr propustku. Tlak vody totiž musel být vyšší než atmosférický tlak [8]. Výpočty určující zda byl výtok z propustku zatopený, či nebyl, jsou uvedeny v předcházející kapitole 2.2.3.

Literatura uvádí, že byla-li výška hladiny na výtoku z propustku (případně i na jeho vtoku) nízká natolik, že nepřekonala atmosférický tlak, tak vznikl podtlak, který vnikl do propustku přes vrstvu vody [8]. Tato situace je zobrazena na Obr. 37. Vniknutím vzduchu se v propustku vytvořila volná hladina a zvýšila se hloubka vody před propustkem. Díky vyšší hladině před propustkem mohlo dojít k opětovnému zatopení a následnému přechodu k tlakovému režimu proudění. Poté se mohla celá situace znovu opakovat. Tyto pulsace jsou nepříznivé pro samotný objekt, tak i pro koryto nad i pod objektem [8].

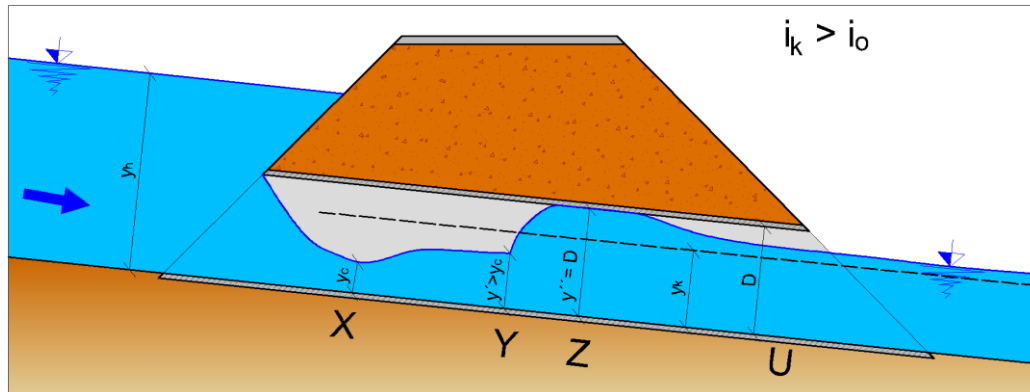


Obr. 37 Vznik víru vniknutím vzduchu do vtoku při tlakovém proudění



Pokud byl výtok z propustku volný, tak bylo možné, že by nastalo tlakové proudění pouze v určité délce propustku. Záleželo na splnění podmínky [8]:

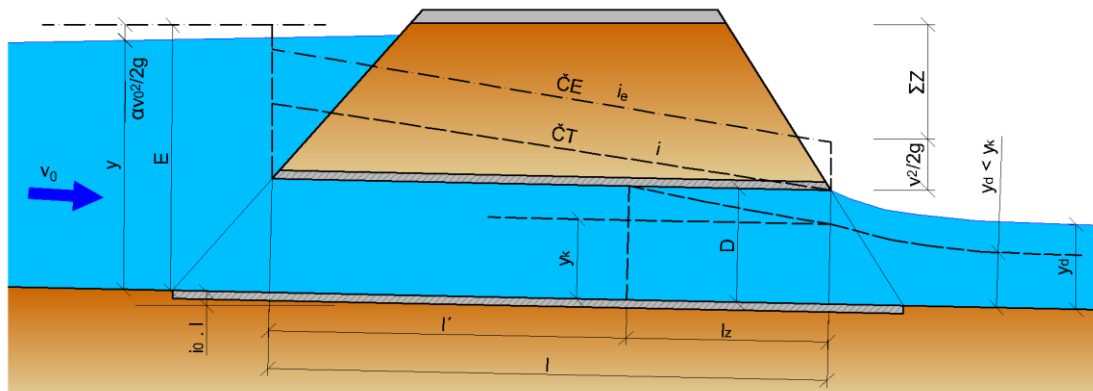
- při $y_k \geq y_t$ musela být délka propustku větší, než byla délka křivky vzduť mezi průřezem s hloubkou y_z a průřezem s hloubkou y_i ;
- při $y_k \leq y_t$ musela být délka propustku větší, než byl součet délky křivky vzduť od y_z do menší hloubky vodního skoku $y' < y_z$ (úsek X – Y na Obr. 38) a délky křivky snížení od y_t do y_k ve výtakovém profilu (úsek Z – U na Obr. 38).



Obr. 38 Jedna z forem přechodu k tlakovému režimu celého propustku

Výpočet tlakového proudění v propustcích je v následujících dvou podkapitolách popsán jen pro kruhové propustky. U obdélníkových propustků není tlakové proudění doporučeno z důvodu vzniku komplikovaného proudění doprovázeného příčným prouděním v rovině příčného profilu [9].

2.2.4.3.1 Propustky s tlakovým prouděním a výtokem nezatopeným dolní vodou



Obr. 39 Tlakové proudění v propustku; volný výtok

Pro výtokovou hloubku z propustku podle metodiky platilo [3; 9]:

- $$y_v = D \text{ pokud } y_k > D,$$
- $$y_v = y_k \text{ pokud } y_d < y_k < D,$$
- $$y_v = y_d \text{ pokud } y_k < y_d < D.$$

Stav $y_v = D$ nastával nejčastěji a řešil se za použitím Bernoulliho rovnice pro krátké potrubí [3; 9]:

$$E = (i_e - i_0) \cdot L + (1 + \xi) \cdot \frac{v^2}{2g} + D \quad (2.24)$$

kde E – energetická výška [m],
 i_e – sklon čáry energie,



- i_0 – sklon dna propustku,
- L – délka propustku [m],
- ξ – ztrátový součinitel – vtoku [-],
- v – rychlost proudění [m/s],
- D – průměr propustku [m].

Sklon čáry energie se zjistil z Darcy – Weisbachovy rovnice [3; 9]:

$$i_e = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2.25)$$

kde λ – součinitel ztráty třením [-]

Rovnici 2. 24 šlo poté upravit na tvar [3; 9]:

$$E = \left(1 + \xi + \lambda \cdot \frac{L}{D}\right) \cdot \frac{v^2}{2g} + D - i_0 \cdot L \quad (2.26)$$

a pokud byl zanedbán vliv přítokové rychlosti před propustkem a byl tedy uvažován předpoklad $y \approx E$, tak pro průtok platilo:

$$Q = S \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{\frac{y-D+i_0 \cdot L}{1+\xi+\lambda \cdot \frac{L}{D}}} \quad (2.27)$$

Řešení případů proudění, kdy $y_v < D$, probíhal výpočtem nerovnoměrného proudění od výtoku směrem proti proudu. Cílem bylo najít vzdálenost $L_z < L$ (od ní nastává tlakové proudění). Ve vzdálenosti $L' = L - L_z$ se poté proudění řešilo podle rovnice 2. 24. [3; 9].

Vzdálenost L_z bylo možné přibližně stanovit z rovnice nerovnoměrného proudění [3]:

$$L_z = \frac{E_v - E_D}{i_0 - (i_e)_p} \quad (2.28)$$

kde $(i_e)_p$ byl zjištěn z rovnice rovnoměrného proudění [12]:

$$(i_e)_p = \frac{Q^2}{C_p^2 \cdot S_p^2 \cdot R_p} \quad (2.29)$$

kde byly hodnoty C_p (rychlostní součinitel [-]), S_p (plocha [m²]) a R_p (hydraulický poloměr [m]), a kde index „p“ znamenal průměrný a byl určen pro hloubku:

$$y_p = 0,5 \cdot (D + y_v) \quad (2.30)$$



3 Výzkum na hydraulických modelech

Popis většiny jevů v hydrodynamice vychází ze základních teoretických principů odvozených zakladateli teoretické hydromechaniky, jako byli například Bernoulli, Euler a později Saint-Venant, Žukovskij, Boussinesq a další. Rozličné případy proudění vody jsou v obecném tvaru popisovány především diferenciálními rovnicemi (nejčastěji parciálními nelineárními) nebo jejich soustavami. Přitom obecné analytické řešení těchto soustav diferenciálních rovnic není doposud známé. Mnohé hydraulické problémy jsou totiž natolik složité, že jejich matematická formulace vyžaduje menší nebo větší míru schematizace a zavedení zjednodušujících předpokladů. Tím dochází ke zjednodušení skutečnosti. Ale ani tak nemusí být analytické řešení realizovatelné. Proto se v úlohách, kde jsou teoretické formulace nedostačující k objasnění řešeného problému, používají metody matematického a experimentálního fyzikálního modelování. Tyto metody využívají modelu, jakožto předmětu napodobujícího zkoumaný předmět (prototyp), ke zjištění potřebných informací, které je pak možné interpretovat na reálném objektu. Díky tomu je možné analyzovat i složité hydrodynamické jevy, které se vyskytují ve skutečnosti [22; 23].

3.1 Matematické modelování

Matematické modely se řadí do skupiny abstraktních modelů. K jejich tvorbě využíváme vhodné matematické prostředky. Matematické modelování je vhodné pro zkoumání i velmi složitých fyzikálních jevů v rozsáhlých systémech, za předpokladu, že lze daný problém dostatečně výstižně matematicky popsat. Dnes se využívají především numerické metody, proto se používá termínu numerické modelování (pozn. druhým směrem matematického modelování jsou analytické metody, které se snaží o přesné matematické vyjádření sledovaného jevu). Numerické metody řešení úloh využívají časoprostorové diskretizace a umožňují tím značně omezit zjednodušující předpoklady řešení. Numerické modelování je díky velkému výpočetnímu výkonu dnešních počítačů velmi využívané [22; 24].

Matematický numerický model je tedy soubor rovnic, které popisují zkoumaný jev nebo stav určité skutečnosti. Po popisu jevu se přistoupí k provedení diskretizace, což je proces převedení diferenciálních rovnic na systém uspořádaných algebraických výrazů. Systém uspořádaných algebraických výrazů se posléze řeší jednou z numerických metod. Jedná se hlavně o metodu konečných rozdílů (FDM – finite difference method), metodu konečných objemů (FVM - finite volume method) a metodu konečných prvků (FEM – finite element method) [25].

Podobor matematického modelování – matematické modelování dynamiky tekutin (Computational Fluid Dynamics – CFD) se v dnešní formě rozvíjí od 70. let 20. století [25; 24]. Zabývá se simulacemi proudění, v nichž Navier-Stokesovi rovnice, Bernoulliho rovnice a turbulentní model jsou diskretizovány a řešeny pro každou výpočetní buňku [24]. Podle numerického řešení turbulence rozlišujeme metody [26]:

- RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes equations; statický model turbulence který musí být doplněn modelem turbulence simulující vliv flukтуаčních složek veličin);
- DNS (Direct Numerical Simulation; přímá numerická simulace; výpočetně náročné);



- LES (Large Eddy Simulation; řešení proudění za přítomnosti pouze velkých turbulentních vírů; kompromis mezi DNS a RANS).

Nejvíce využívaným softwarem pro řešení CFD jsou programy Fluent a CFX od společnosti ANSYS [27].

Výhodou matematického modelu je jeho obecnost., jež umožňuje zkoumat na vytvořeném modelu širokou škálu různých případů, které se mohou v přírodě a technické praxi vyskytnout, a na jejich základě hledat optimální řešení. Je ovšem potřeba věnovat pozornost verifikaci (ověření věrnosti zobrazení skutečnosti) modelu, neboť matematický model je vždy určitým stupněm schematizován. Pro verifikaci vhodně poslouží například fyzikální modely [22].

3.2 Fyzikální modelování

Fyzikální modely zahrnujeme pod materiální modely. Základním principem fyzikálního modelování je existence dvou fyzikálně stejnorodých jevů na prototypu a jeho zpravidla zmenšeném modelu. V hydraulických modelech se využívá stejného média jako ve skutečnosti a je podloženo teorií podobnosti hydrodynamických jevů, která vychází buď z jejich matematického popisu, nebo z rozměrové analýzy fyzikálních veličin ovlivňujících daný jev. Odvozené zákony podobnosti umožňují následnou extrapolaci výsledků, získaných výzkumem na modelu, do skutečnosti [22].

Metoda fyzikálního modelování je na rozdíl od matematického modelování náročná na materiální a prostorové zázemí laboratoří. Metody fyzikálního modelování obvykle umožňují zkoumání a řešení omezeného okruhu problémů. Výzkum ovšem může být systematický a rychlý. Především je možné zobrazovat a zkoumat jevy ve skutečnosti prakticky nerealizovatelné (např. k rizikům, nákladům nebo neexistenci reálného objektu) [22].

3.2.1 Druhy hydraulických modelů

Dočasný hydraulický model představuje obraz skutečného vodohospodářského objektu, popř. jeho části, nebo skutečného úseku vodního toku vybudovaného ve zmenšeném měřítku podle použitého zákona mechanické podobnosti proudění. Základní typy hydraulických modelů jsou modely říční a objektové [22].

Říční modely jsou modely prostorové (většinou liniové), znázorňující úseky otevřených koryt s vestavěnými vodními díly nebo bez nich. Často se budují ve zkreslených měřítkách (např. převyšené). Realizují se buď s pevným nebo pohyblivým dnem [22].

Objektové modely znázorňují zpravidla zmenšená vodohospodářská díla. Navrhují se zpravidla geometricky podobné skutečnosti. Obvykle se užívají objektové modely trojrozměrné (3D), dvourozměrné (2D), popř. kombinované [22].

3D objektové modely [22; 23]:

- znázorňují celé prostorově složité objekty;
- řešení složitých problémů prostorového proudění.

2D objektové modely (výsekové) [22; 23]:

- řešení základních hydraulických problémů (např. objekty vtoků, přelivů...);
- tzv. rovinný problém proudění;



- umisťovány do laboratorních žlabů.

Kombinované objektové modely [22]:

- 3D modely kombinované s 2D průřezem hlavní části modelovaného díla, opatřeným průřezem;
- pro řešení prostorového proudění současně s rovinným v některém důležitém průřezu.

3.3 Cíle výzkumu hydraulického modelování

Hlavním cílem výzkumu na hydraulických modelech je vyšetřování zákonitostí proudění vody, působení na prostředí a interakce s obtékanými stavbami a jinými tuhými tělesy. Tím je možné dospět k technicky optimálně funkčnímu a ekonomicky efektivnímu optimálnímu návrhu vodního díla nebo jeho jednotlivých funkčních částí [22; 23].

Účely hydraulického modelování [22]:

- a) Ověření a zpřesnění teoretických a technických předpokladů použitých při projektovém řešení.
- b) Experimentální řešení hydrodynamických problémů projekce, výstavby i provozu vodohospodářských děl.
- c) Objasňování složitých jevů prostorového proudění
- d) Ověřování výsledků teoretických řešení hydrodynamických jevů, ověřování výsledků matematického modelování.
- e) Doplnění a upřesňování teoreticky odvozených vzorců klasické hydromechaniky vyšetřováním hodnot korekčních součinitelů.
- f) Přispívání k definování zákonitostí hydrodynamických jevů, které prozatím nebyly teoreticky dostatečně objasněny.

Výhody výzkumu na zmenšených hydraulických modelech [22]:

- Poměrně malé rozměry a nákladnost; možnost rychlých a snadných úprav či změn modelu při výzkumu.
- Pohotové, rychlé a přesné měření hydraulických a dalších fyzikálních veličin.
- Systematičnost měření, možnost jeho opakování a zkoumání různých provozních stavů (včetně extrémních).
- Možnost relativně pohodlného přímého pozorování a studování nejen znázorněného hydrodynamického jevu jako celku, ale i jeho vnitřní struktury a účinků.

3.4 Teorie podobnosti hydrodynamických jevů

Teorie podobnosti má obecně dva směry. První z nich je založen na určení kritérií podobnosti rozborem systému základních diferenciálních rovnic pohybu skutečné kapaliny (matematicky popisují vyšetřovaný fyzikální jev). Druhý směr je založen na rozměrové analýze. První metodu použijeme pro hydraulický výzkum tehdy, když máme k dispozici příslušné matematické formulace zkoumaného jevu. Není-li tomu tak, tak je možné vzít za základ rozměrovou analýzu. Její použití vyžaduje předběžný rozbor fyzikální podstaty jevu [22].



Základem teorie fyzikálního modelování hydrodynamických jevů na hydraulických modelech jsou zákony mechanické podobnosti. Jedná se o zákony, jimiž se řídí vztahy mezi vlastnostmi určitého systému a vlastnostmi zmenšeného modelu tohoto systému. Při experimentálním řešení se hledají vzájemné vztahy dvou systémů, které se je nutno matematicky vyjádřit. V hydrodynamice se při popisu zkoumaného jevu vystačí se třemi základními fyzikálními veličinami, kterými jsou délka, čas a hmotnost s rozměry L , T , M . Těmito symboly se mohou vyjádřit fyzikální rozměry všech proměnných veličin charakterizujících zkoumaný hydrodynamický jev [22].

3.4.1 Rozměrová analýza

Metoda je založena na Fourierově práci o principech rozměrové homogenity. Zjednodušená podstata principu tvrdí, že libovolná rovnice může být správná, pouze když všechny výrazy v rovnici mají stejné jednotky. Jelikož je každý výraz v rovnici reprezentován určitými násobky jednotek pro hmotnost (M), délku (L) a čas (T), tak musí být exponenty jednotek M , L a T stejné v každém výrazu rovnice [28].

Na základě poznatků Fourierovy práce formuloval Buckingham obecnou podmínku, že pokud je k popisu jevu použito m proměnných o n základních jednotkách, tak správná rozměrová analýza dojde k nalezení $(m-n)$ bezrozměrných parametrů (tj. bezrozměrných čísel). Mezi těmito čísly by měl existovat funkční vztah a tento vztah by měl popsat zkoumaný jev. Tento princip se nazývá π – teorém (podle názvu bezrozměrných parametrů: π – výrazy) [28].

Alternativou k Buckinghamově metodě π – teorému je metoda Rayleighova, která se ovšem užívá méně často [22].

3.4.2 Modelová podobnost

Úplná mechanická podobnost vyžaduje, aby proudění na zmenšeném modelu bylo věrným obrazem proudění na prototypu. Aby tedy byla zachována úplná mechanická podobnost, tak je nutné, aby si hydraulické jevy byly podobné geometricky, kinematicky a dynamicky [22]. Prototyp a model jsou si *geometricky podobné*, jestliže všechny rozměry a úhly jsou vzájemně vztaheny podle jednoho měřítko. Pokud jsou si podobné dráhy, které opisují sobě odpovídající částice proudu v úměrných odpovídajících dobách, a tedy si jsou podobné sobě příslušné složky rychlosti a zrychlení, pak hovoříme od *podobnosti kinematické*. Jestliže jsou homologické části skutečného objektu a jeho modelu vystaveny úměrným celkovým silám, mluvíme o *podobnosti dynamické*. Dále je nutné zdůraznit, že podobnost mechanická zahrnuje vždy podobnost dynamickou a geometrickou, podobnost dynamická vždy podobnost kinematickou ale ne vždy nutně podobnost geometrickou [22; 28].

Fyzikální veličiny, které obecně mohou ovlivňovat zkoumaný pohyb tělesa a tekutiny jsou tyto [22; 28]:

- těleso:
 - síla na těleso P ,
 - základní rozměr tělesa d ,
 - hustota tělesa ρ_s ,
 - gravitační zrychlení g ,



- kanál:
 - délka L ,
 - šířka b ,
 - hloubka h ;
- kapalina:
 - hustota kapaliny ρ ,
 - dynamická viskozita μ ,
 - povrchové napětí σ ,
 - model objemové pružnosti K ,
 - střední rychlost proudění v .

Aplikací metody rozměrové analýzy se dostane [28]: celkový počet proměnných je tedy $m = 12$, počet jednotek M, L, T $n = 3 \Rightarrow$ počet bezrozměrných čísel $m - n = 9$. Získá se tedy rovnice:

$$F = \left(\frac{P}{\rho \cdot v^2 \cdot L^2}; \frac{v^2}{g \cdot L}; \frac{\rho \cdot L \cdot v}{\mu}; \frac{\rho \cdot v^2 \cdot L}{\sigma}; \frac{\rho \cdot v^2}{K}; \frac{h}{L}; \frac{b}{L}; \frac{d}{L}; \frac{\rho_s}{\rho} \right) = 0 \quad (3.1)$$

a úpravou k rovnici:

$$F = \left(Ne; Fr; Re; We; Ca; \frac{h}{L}; \frac{b}{L}; \frac{d}{L}; \frac{\rho_s}{\rho} \right) = 0 \quad (3.2)$$

Z této rovnice lze podmínku mechanické podobnosti vyjádřit systémem devíti rovnic:

$$M_{Ne} = M_{Fr} = M_{Re} = M_{We} = M_{Ca} = \frac{M_h}{M_t} = \frac{M_b}{M_l} = \frac{M_d}{M_l} = \frac{M_{\rho_s}}{M_\rho} = 1 \quad (3.3)$$

Pro modelový výzkum vtoků do propustků jsou nejzásadnější vztahy [22; 28]:

- $M_{Fr} = 1$ neboli $Fr = idem$, čímž je vyjádřen Froudův zákon mechanické podobnosti při působení tíže na proudící tekutinu;
- $M_{Re} = 1$ neboli $Re = idem$, čímž je vyjádřen Reynoldsův zákon mechanické podobnosti při působení vnitřního tření v proudící tekutině.

Tyto dva zákony jsou detailněji popsány v následujících podkapitolách. Pro model se vybírá jen to bezrozměrné číslo, které reprezentuje dominantní působící síly. Vliv ostatních se zanedbává. Tím pádem ovšem úplná mechanická podobnost neplatí a platí přibližná mechanická podobnost. Opětovnou interpretací výsledků zpět na prototyp se zavádí chyba tzv. měřítkový efekt [23].

3.4.2.1 Reechův – Froudův zákon mechanické podobnosti

Pro modelový výzkum vtoku do propustku a stav proudění o volné hladině uvnitř propustku byl zvolen Reechův – Froudův zákon mechanické podobnosti. Tento zákon vyjadřuje podmínku dynamické podobnosti hydrodynamických jevů za výhradního působení gravitačních sil (ostatní kritéria se zanedbávají). Reechův – Froudův zákon je tedy možné použít především při modelování proudění o volné hladině, např. modelování proudění na přelivech, vtoků nebo výtoků, povrchových vln a krátkých úseků otevřených koryt [22; 28].

Při proudění skutečné vazké kapaliny působí spolu s gravitačními silami současně i vždy odpory vnitřního tření. Je-li zachována geometrická podobnost modelu a reálného objektu a jsou-li podobné i okrajové podmínky, pak je zajištěna podobnost nejen mezi silami vyvolanými gravitační



silou, ale i v širokém rozsahu mezi odpory způsobenými třením. Tato podobnost je ovšem podmíněna prouděním v kvadratické oblasti odporu [22].

Řešení podobnosti proudění při výlučném nebo převládajícím působení gravitační síly vychází z geometrické podobnosti jakožto základu podobnosti mechanické. Základní rovnicí je rovnice [22; 28]:

$$M_{Fr} = \frac{M_v^2}{M_g M_l} \quad (3.4)$$

Pokud měřítka nahradíme příslušnými poměry [22]:

$$\frac{v_s^2}{g l_s} = \frac{v_m^2}{g l_m} \quad (3.5)$$

což vyjadřuje rovnost čísel pro skutečné dílo a jeho model. Měřítka zrychlení $M_g = 1$, lze při zvoleném měřítka délek M_l určit měřítka pro ostatní veličiny [22]:

pro rychlost

$$M_v = \frac{v_s}{v_m} = \sqrt{M_l} \quad (3.6)$$

pro průtok

$$M_Q = \frac{Q_s}{Q_m} = \frac{A_s v_s}{A_m v_m} = M_l^2 \sqrt{M_l} = M_l^{5/2} \quad (3.7)$$

pro časové intervaly

$$M_t = \frac{M_l}{M_v} = \frac{M_l}{\sqrt{M_l}} = \sqrt{M_l} \quad (3.8)$$

Dále lze odvodit vztahy pro úhlové rychlosti, síly a bude-li měřítka měrné tíhy $M_v = 1$, tak i lze určit i měřítka měrných tlaků, měřítka výkonů a měřítka práce. Měřítka délek tedy stačí k určení měřítek všech veličin, charakterizujících zkoumaný jev.

3.4.2.2 Reynoldsův zákon mechanické podobnosti

Pro modelový výzkum vtoku do propustku a při tlakovém proudění uvnitř propustku byl zvolen Reynoldsův zákon mechanické podobnosti. Reynoldsův zákon vyjadřuje kritérium dynamické podobnosti pohybu dvou nestlačitelných vazkých kapalin při výhradním působení sil vnitřního tření. Uplatňuje se např. při modelování proudění v tlakových potrubích. Obdobně jako u předchozího zákona podobnosti musí být na modelu zachován stejný režim proudění jako ve skutečnosti [22].

Základní rovnicí je rovnice [22]:

$$M_{Re} = \frac{M_Q M_l M_v}{M_\mu} = 1 \quad (3.9)$$

Pokud měřítka nahradíme příslušnými poměry veličin a vyjádříme poměr mezi součinitelem vazkosti μ a měrnou hmotností kapaliny ρ kinematickým součinitelem tření $\nu = \mu/\rho$, získáme vztah [22]:

$$\frac{v_s l_s}{\nu_s} = \frac{v_m l_m}{\nu_m} \quad (3.10)$$



jež vyjadřuje rovnost Reynoldsových čísel pro proudění ve skutečnosti a na modelu.

V případě, že na modelu použijeme stejně viskózní kapalinu jako na prototypu (např. stejně teplou čistou vodu), je vztah mezi měřítkem rychlosti a měřítkem geometrického zmenšení modelu [22]:

$$M_v = \frac{1}{M_l} \quad (3.11)$$

neboť $M_\gamma = 1$, $M_\rho = 1$, $M_\mu = 1$.

Pro průtok je měřítko [22; 28]:

$$M_Q = \frac{Q_s}{Q_m} = \frac{A_s \cdot v_s}{A_m \cdot v_m} = M_l^2 \cdot M_v = M_l^2 \cdot \frac{1}{M_l} = M_l \quad (3.12)$$

a pro čas [22]:

$$M_t = \frac{M_l}{M_v} = \frac{M_l}{M_l^{-1}} = M_l^2 \quad (3.13)$$

Dále můžeme určit měřítka pro síly, měrné tlaky, práci, výkon atd.

3.4.3 Modelování místních ztrát na vtoku do tlakového potrubí

Protože úloha modelování místních ztrát na vtoku do tlakového proudění je obdobná jako vtok do propustky v tlakovém režimu, je vhodné tuto problematiku popsat.

Nejdůležitější podmínkou pro modelování místních ztrát je naprostá geometrická podobnost modelu a prototypu. Proudění na modelu i ve skutečnosti je téměř vždy turbulentní. V převážné většině případů je možné zanedbat vliv viskozity. V případech, kdy jde o výzkum ztrát v krátkém potrubí, lze zanedbat i vliv relativní drsnosti skutečného potrubí. Součinitel místní ztráty ξ je nezávislý na Reynoldsově čísle teprve po dosažení určité mezní hodnoty Re_{kv} . Pro místní ztráty na vtoku bylo zjištěno, že Re_{kv} je větší než pro vlastní potrubí podle rovnice [22]:

$$Re_{kv} = \frac{6 \cdot 6,65 \cdot R}{k \sqrt{\lambda}} = \frac{394 R}{k \sqrt{\lambda}} \cong 400 \frac{R}{k \sqrt{\lambda}} \quad (3.14)$$

kde: Re_{kv} – Reynoldsovo číslo; kvadratická oblast [-],

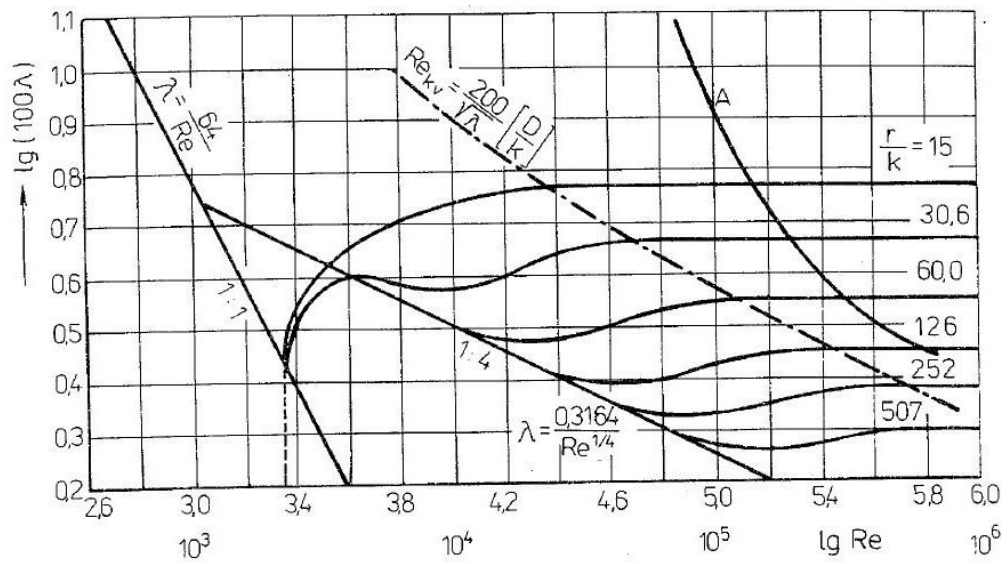
R/k – relativní drsnost,

R – hydraulický poloměr [m],

k – drsnostní výška [m],

λ – součinitel ztráty třením [-].

Hranici automodelové oblasti pro proudění ve vtocích udává křivka A v grafu na následujícím obrázku (viz Obr. 41). Měřítka zmenšení modelu proti prototypu volíme tudíž tak, aby $Re_m > Re'_{kv}$ (Re'_{kv} dáno křivkou A). Je velmi žádoucí dosáhnout na modelu správného znázornění relativní drsnosti, ale při vyšších hodnotách Reynoldsova čísla ($Re > 10^6$) nemohou mít vyšší odchylky ve ztrátě třením podstatný vliv na platnost výsledků modelových výzkumů [22].



Obr. 41 Nikuradseho graf charakterizující různé oblasti ztrát třením při proudění vody v kruhovém potrubí



4 Fyzikální modelování

Hlavním cílem výzkumu této práce bylo zjištění velikosti součinitele místní ztráty na vtoku pro různé geometrie vtoků do propustku pro proudění o volné hladině uvnitř propustku i pro tlakový režim proudění uvnitř propustku. Dalšími cíli bylo určení dalších součinitelů souvisejících s prouděním v propustku, hledání zúžené hloubky za vtokem do propustku a další pozorování. Tato práce navazuje na autorovu bakalářskou práci, jejíž cíle byly podobné, ale neřešila tlakové proudění a měla menší rozsah získaných dat.

Pro nalezení řešení cílů tohoto výzkumu bylo rozhodnuto použít metod fyzikálního modelování. Modely použité pro výzkum byly navrženy a zkonstruovány Ing. Tomášem Pickem, Ph.D. v dílně katedry hydrauliky. Práce na modelech probíhala kontinuálně s měřením. Vždy, když se na aktuálně měřeném modelu blížila měření a související práce ke konci, byly zahájeny konstrukční práce na dalším modelu nebo se případně po doměření dat přistoupilo k úpravám modelu stávajícího. Měření zkonstruovaných modelů probíhala ve vodohospodářské laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze. Data získaná fyzikálním modelováním byla také použita jako vstup pro kalibraci matematického modelu (v programu CFX od společnosti ANSYS), který řešil geometricky komplikovanější případy a byl součástí řešení výzkumu jako celku.

Autor této práce v rámci celého výzkumu pracoval na fyzikálním modelování. Osobně provedl v průběhu 9 měsíců přes 200 experimentů na šesti variantách fyzikálních modelů (nepočítaje práce na modelu, jež byl vyhodnocován v bakalářské práci autora). Některé další měření provedl Ing. Tomáš Pícek, Ph.D.

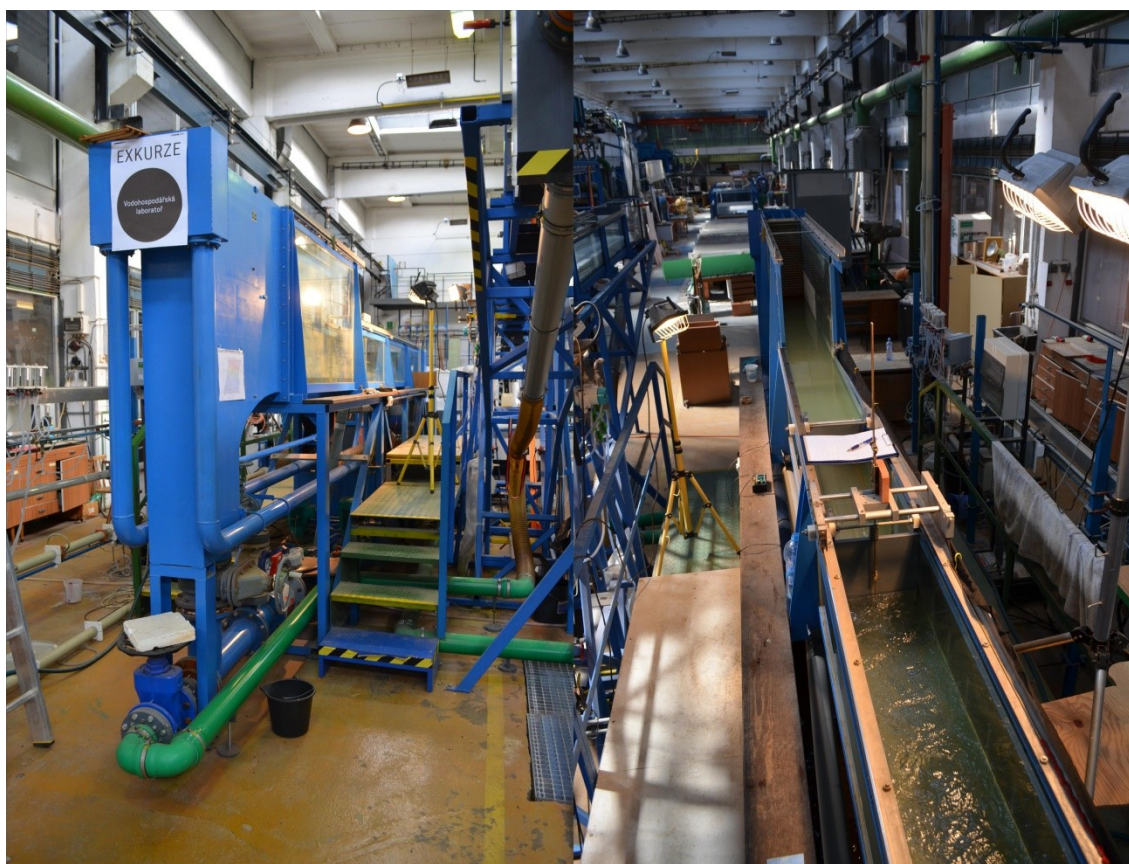
4.1 Popis hydraulického žlabu

Pro modelový výzkum byl použit hydraulický žlab B25 šířky 0,25 m, který je umístěn ve vodohospodářské laboratoři. Tento žlab byl použit z důvodů: lepší přístupnost modelu a možnosti měření na modelu, jednodušší výstavby modelů a tedy i flexibilnější možnosti jejich úprav, dále jsou v tomto žlabu lepší možnosti regulace hladiny dolní vody pro tlakový režim proudění. Dalším důvodem byla probíhající realizace rekonstrukce žlabu B50 šířky 0,50 m. Po realizaci rekonstrukce žlabu B50, byla zjištěna závada na šoupěti odpadního potrubí, které netěsnilo a velikost průsaku tímto šoupětem kolísala až do průtoku 0,5 l/s. Z toho důvodu nebylo možné v daném čase provádět jakákoliv měření na tomto žlabu, ačkoliv byl zrekonstruován.

Tento žlab je prosklený s vodorovným plechovým dnem. Má vlastní zásobní nádrž, která je umístěna dole, a je tudíž zcela nezávislý na velkém hydraulickém okruhu laboratoře. Čerpání vody ze zásobní nádrže obstarávají dvě stejná čerpadla (M1 a M2). Každé z dvojice čerpadel lze pustit samostatně. Potrubí, které ústí z čerpadel se záhy spojuje do jednoho. Na něm je umístěný indukční průtokoměr. Za ním se potrubí rozpojuje na menší (obtok) a větší průměr. Na menším potrubí, které odbočuje z původního směru kolmo, je umístěn vodoměr a za ním je regulační šoupátko. Spolu s malým šoupátkem umožňuje menší jemnou regulaci průtoku a je vhodné jej používat pro nejmenší průtoky na žlabu (cca do průtoku 3 l/s). Díky vodoměru je možné měřit přímo objem proteklé vody a



tím stanovit průtok, pokud je systém nastaven tak, aby voda tekla jen menším potrubím. Větší potrubí z dvou rozbočujících se potrubí je také opatřeno šoupětem. Obě potrubí (větší i menší) jsou zaústěny do vtokové části žlabu, jež je vybavena bezpečnostním přelivem. Pro uklidnění hladiny a správné rozdělení rychlostí ve žlabu jsou ve vtokové části žlabu umístěny uklidňovače (děrovaný plech) a za nimi následuje voštinový usměrňovač, který plní stejný účel. Následuje vyšší část hydraulického žlabu – výška žlabu je 1,0 m. Po 1,8 m se skokově výška žlabu sníží na 0,5 m. Celkem prostor pro měření ve žlabu je přibližně 6,3 m dlouhý. Měřené modely byly umístěny v nižší (tzn. 0,5 m vysoké) části žlabu. Těsně před koncem žlabu je umístěn žaluziový uzávěr. Žaluziový uzávěr se ovšem pro regulaci hladiny dolní vody neosvědčil a tak místo něj byl primárně využíván uzávěr ze dvou dílů plastových desek s otvory, které se vůči sobě pohybovaly a podle toho byly otvory v deskách více či méně otevřeny. Na konci žlabu voda přepadá dolů potrubím obdélníkového profilu, v němž je umístěno síto. Voda se spodem dostává do přepážkou oddělené části zásobní nádrže. V oddělovací přepážce je umístěn Thompsonův měrný přeliv. Tím voda přepadá do hlavní části zásobní nádrže, z níž je opět čerpána zpět do žlabu. Názorně je vše vidět na schématu žlabu, jež je k nalezení v příloze na straně 116, a na následujícím obrázku.



Obr. 42 Dva pohledy na hydraulický žlab B25; obrázek vlevo: pohled na vtokovou část žlabu a vedení potrubí, na pravé části obrázku je vidět sousední sklopný žlab B20; obrázek vpravo: pohled na žlab shora při probíhající experimentu s vlivem dolní vody, viditelné kolejnice pro hrotové měřítko na podjezdu

Zásobní nádrž tohoto žlabu využívá i vedlejší sklopný žlab. Proto není možné, aby probíhala měření na obou žlabech současně, neboť by se vzájemně ovlivňovala. Měření probíhala až po dostatečném zahřátí čerpadel/a, neboť bylo zjištěno, že po určité době běhu a zahřátí se trochu změnila otáčky čerpadel a tím by se mohlo ovlivnit měření. Rozsah průtoků žlabu je 0 – 44,0 l/s. Vzhledem k tomu, že pro výzkum propustků byl většinou dostatečný průtok poskytován jedním



čerpádem, tak byla čerpadla používána střídavě (vždy cela jedna sada s čerpádem M1 a v dalším dni opět s čerpádem M2 atd.). Nejspíše během čerpadel občas docházelo k rozvlnění hladiny (především u vyšších průtoků), které nebylo způsobeno probíhajícím experimentem. Z tohoto důvodu byl přibližně od druhé poloviny probíhajícího výzkumu instalován plovoucí polystyrénový uklidňovač hladiny. Jeho vliv byl pozitivní, nicméně ne rozhodující, tudíž částečně tato komplikace přetrvávala.

Před umístěním prvního modelu do hydraulického žlabu B25 byla přeměřena jeho geometrie. Bylo zjištěno, že průměrná šířka žlabu je 251,75 mm.



Obr. 43 Uzávěr pro regulaci úrovně hladiny dolní vody, který byl používán místo žaluziového uzávěru

Při modelování podle Froudova zákona musí mít hydraulický žlab, do nějž se modely umísťují, minimální šířku 200 mm; důvodem je eliminace nepříznivého vlivu drsnosti bočních stěn [22]. Tato podmínka je vzhledem k šířce žlabu splněna.

4.2 Modely

Postupně bylo zhotoveno několik modelů a jejich variant. Konkrétně se jednalo o 5 typů geometrií vtoku do propustku. U některých typů geometrií vtoků se zkoumalo více různě modifikovaných variant. Pro účel této práce bylo zvoleno pojmenování typů geometrií římskými číslicemi a jejich varianty (pokud byly realizovány) byly popsány malými písmeny abecedy.

Všechny řešené modely propustků jsou kruhového příčného profilu (propustky s obdélníkovým profilem byly v rámci celého grantového úkolu řešeny na Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka, v.v.i.). Všechny typy vtoků byly řešeny pro 1 propustek. 1 typ vtoku byl řešen i pro 2 propustky vedle sebe v několika variantách uspořádání vtoku.

Všechny vtoky, vyjma vtoku IV (předsunutý propustek), měly před sebou nátokovou desku, což je zahnutý podepřený plech nad dnem žlabu, který na začátku má pozvolný náběh, až je posléze skoro vodorovný a přesně lícuje se dnem vtoku do modelu propustku. Tento plech simuluje dno



koryta toku a na něj navazující propustek. I kdyby byl propustek během výstavby ve skutečnosti postaven nade dnem koryta, tak usazené sedimenty by tento „schod“ brzy zarovnal a opět by dno propustku na vtoku navazovalo na koryto toku. Tento plech omezuje kontrakce proudu ze spodu.

Vtoky modelů byly vyrobeny z plastu. Výška čelních zdí byla vždy o několik cm nižší, než je výška žlabu, aby v případě vyšších průtoků nedošlo k přelití žlabu. Vzhledem k malé hydrostatické síle, která působila na čelní desky vtoků, postačovalo k jejímu upevnění umístit v horní části závitovou tyč, která se rozpírala do ocelové konstrukce žlabu, a celý obvod styku čelní desky se žlabem stmelit voděodolným silikonem. Plocha styku žlab – čelní deska byla zvětšena plastovými profily obdélníkového profilu, které byly k čelní desce po stranách přišroubovány a zvyšovaly její tuhost. Obdobně byla řešena i deska na výtoku, která byla vždy a stejně upevněná ve žlabu jako čelní deska modelu. Výtok z modelu byl výše, než je dno hydraulického žlabu. Důvodem bylo, aby bylo vždy v případech bez vlivu dolní vody zabezpečeno, že výtok z modelu bude volný.

Roura, jež tvořila propustek, byla pro všechny modely vyrobená z plexiskla, aby bylo možné pozorovat probíhající děje uvnitř. Celkem byly použity 3 různé roury. Většina modelů používala rouru s vnitřním průměrem 108,26 mm a délkou 1,25 m. Model se šikmou čelní stěnou používal rouru s průměrem vnitřním 109,74 mm a délkou 1,26 m na vrcholu roury a 1,37 m u dna roury. A dále model dvou propustků vedle sebe z prostorových důvodů používal 2 x rouru s vnitřním průměrem 83,60 mm a délkou 1,00 m. Tloušťka stěn roury se pohybovala kolem 5,6 mm. V rouře o průměru 108,26 mm byly v přední části vyvrtány kulaté měřicí otvory, které měly za úkol umožnit přístup náklonným hrotovým měřítkem dovnitř modelu propustku, aby bylo možné změřit hladinu. 1. měřicí otvor byl 6 cm za vtokem do modelu propustku, další otvory byly již od sebe vzdáleny 3 cm. Celkový počet měřicích otvorů v rouře byl 11 s tím, že v případě potřeby by byly vyvrtány další (11 otvorů bylo ovšem nakonec plně dostačujících). Avšak pro výzkum tlakového režimu proudění v propustku by otvory ve stropě znamenaly problém (přísávání vzduchu nebo naopak unikání vody z propustku). Řešením bylo překrytí otvorů v době měření tlakového proudění gumovou podložkou, již dotlačoval plastový dílec, který byl k rouře modelu přitlačován na dvou místech silnou elastickou gumou, která rouru obepínala. Tímto způsobem byly měřicí otvory utěsněny.

Podélný sklon modelů propustku musel být větší než 0,5 %, neboť tento sklon je normou ČSN 73 6201 uváděn jako minimální přípustný [2]. Sklon zároveň nesměl být příliš veliký, aby bylo možné za vtokem nalézt zúženou hloubku. Kdyby byl zvolený sklon větší, tak by se hladina s nabírající rychlostí stále snižovala a nedošlo by k pro zúženou hloubku typickému snížení a opětovnému zvýšení proudu. Proto byla maximální snaha, aby byl sklon na modelech kolem 0,5 % (ale ne méně).

Pro všechny pokusy nebyla kromě nátokové desky jiná snaha o tvarování koryta před a za propustkem. Tudíž se jedná o model, který má před sebou a za sebou simulované obdélníkové koryto. Vzhledem k tomu, že výzkum byl zaměřen na vtok do propustku tak, v obdélníkovém korytě bude více patrná změna proudnic, než kdyby se do žlabu umísťovala vestavba, jež by přetvořila průřez žlabu na lichoběžník. Dále bude možné případně srovnávat výsledky s modely, jež byly umístěny v širších žlabech (B50 a B100). Na modelu umístěném ve žlabu (B50) šířky 0,5 m pracoval autor této práce v rámci své bakalářské práce a na modelu propustku umístěném ve žlabu (B100) šířky 1,0 m pracoval Ing. Zrostlík v rámci své bakalářské a diplomové práce.



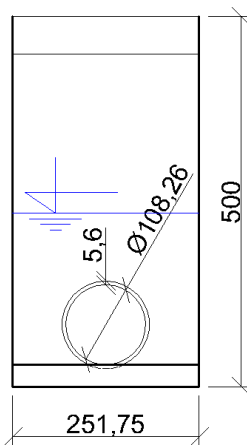
4.2.1 Typy vtoků a jejich varianty

4.2.1.1 Vtok I

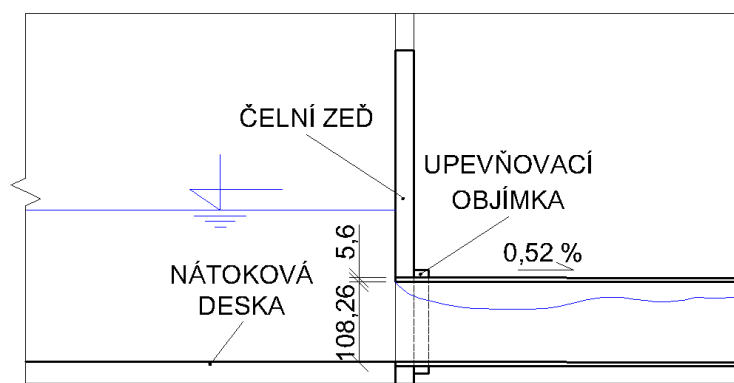
Tento modelový vtok byl tvořen čelní svislou zdí a ostrohranným vtokem do propustku (tj. vtoková hrana nebyla nijak zaoblená a měla úhel 90°). Propustek byl vycentrován na střed žlabu. Model byl vybaven nátokovou deskou. Dno propustku přesně navazovalo na nátokovou desku. Na modelu byla měřena hladina před propustkem i uvnitř propustku (hladinu za propustkem v tlakovém režimu měřila u tohoto modelu Bc. Petra Jurečková; její data jsou pro tento model následně použita). Průměr roury modelu propustku byl 108,26 mm. Podélný sklon propustku byl 0,52 %.

VTOK I

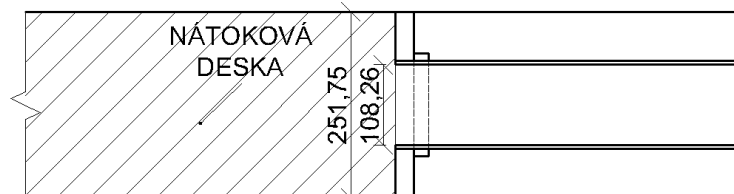
POHLED ZEPŘEDU



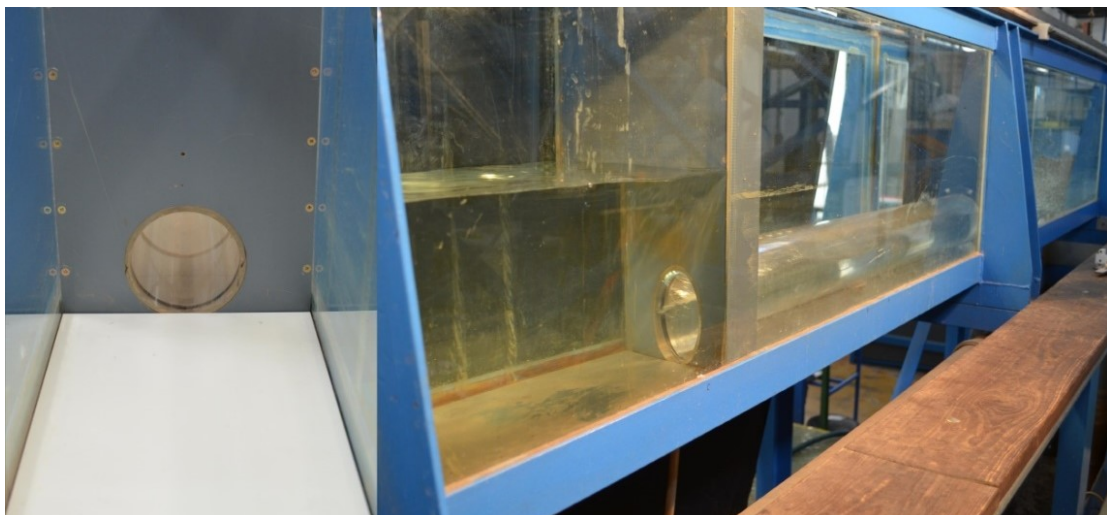
PODÉLNÝ ŘEZ OSOU PROPUSTKU



PŮDORYS S ROVINOU ŘEZU V OSE PROPUSTKU



Obr. 44 Schémata modelu propustku s typem vtoku I



Obr. 45 Fotografie modelu s typem vtoku I; fotografii vlevo pořídil Ing. Tomáš Píček, PhD.

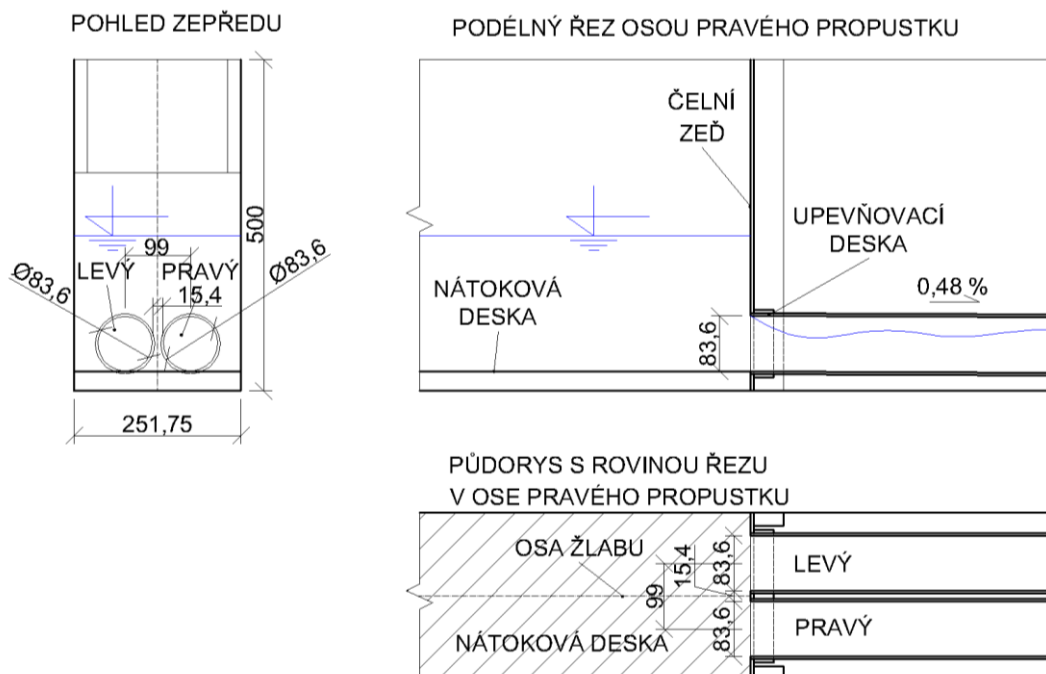


4.2.1.2 Vtok Ia

Tento model byl tvořen dvěma propustky. Jinak byla geometrie vtoku obdobou geometrie vtoku I. Hrana vtoku byla ostrohranná a propustky byly umístěny ve svislé čelní zdi. Propustky byly od sebe osově vzdáleny 99 mm a byly umístěny symetricky k vzhledem k ose žlabu. Obě roury tvořící propustek měly stejný průměr a to 83,6 mm. Model byl vybaven nátokovou deskou a dno propustků na ní v rámci možností navazovalo. Na modelu byla měřena hladina před propustkem (v případě tlakového režimu i za propustkem). Propustky byly pro účel měření rozlišeny jako pravý a levý při pohledu ve směru proudění. Podélný sklon propustků byl 0,48 %.

Před výstavbou tohoto modelu se uvažovalo o instalaci modelu tří propustků vedle sebe do žlabu B50; bohužel kvůli závadě na šoupěti u tohoto žlabu k realizaci tohoto modelu nedošlo a přistoupilo se k výstavbě menšího modelu dvou propustků vedle sebe instalovaných do žlabu B25.

VTOK Ia



Obr. 46 Schémata modelu propustku s typem vtoku Ia



Obr. 47 Fotografie modelu s typem vtoku Ia



4.2.1.3 Vtok Ib

Vtok Ib je variantou vtoku Ia. Rozdíl mezi těmito dvěma geometriemi spočívá v umístění přepážky z plechu o tloušťce 1 mm před vtok mezi dva propustky. Tato přepážka svým umístěním souhlasí s osou žlabu. Přepážka byla dole vsazena do dvou vymezovacích otvorů v nátokové desce. Nahoře byla rozepřena o stěny žlabu pomocí závitové tyče a plastového dílce. Všechny další parametry zůstaly stejné jako u modelu s vtokem Ia.



Obr. 48 Fotografie modelu s typem vtoku Ib; na obou obrázcích je patrné demontovatelné rozepření a upevnění přepážky

4.2.1.4 Vtok Ic

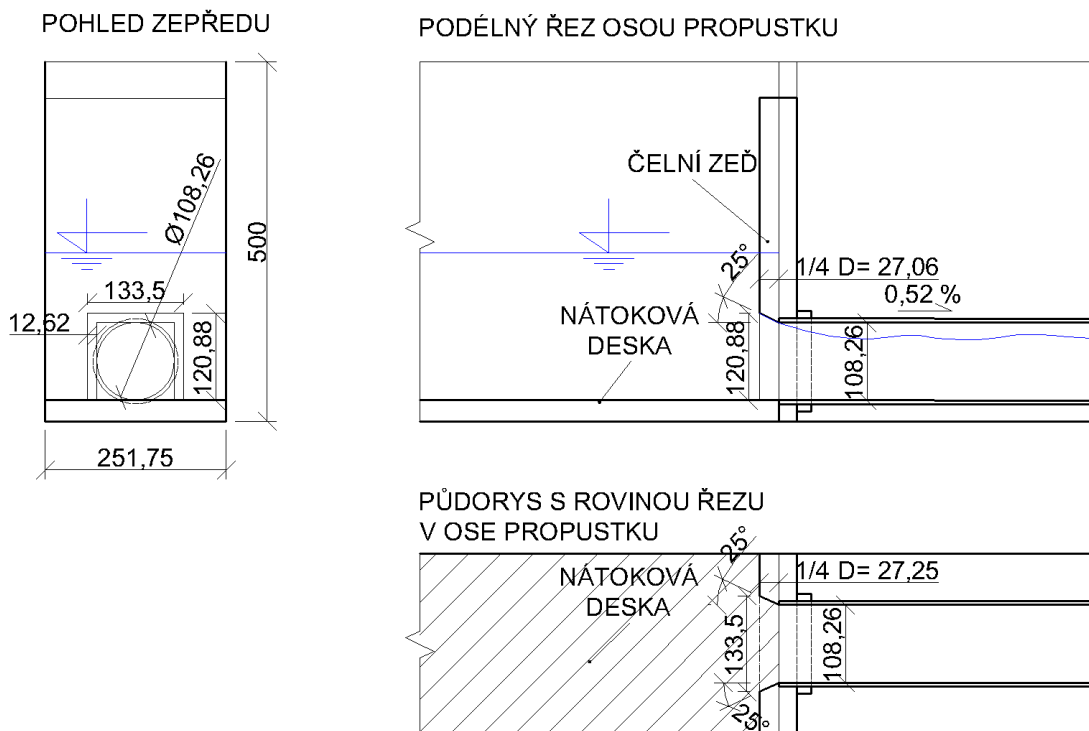
Tato varianta je variantou vtoku Ia. Jediný rozdíl mezi nimi spočívá v zaslepení levého vtoku do propustku plastovým dílem s gumovým těsněním. Tím se z tohoto modelu stala vlastně menší modifikace modelu s vtokem I. Tato úprava byla provedena za účelem možnosti srovnání.



4.2.1.5 Vtok II

Modelový vtok II testoval nastavbu na již realizovaný kruhový propustek se svislou čelní zdí. Vtok byl vytvořen nastavbou obdélníkového tvaru s kónickým zkosením, jehož stěny byly o 25° odkloněny od osy propustku. Délka zkosení byla $\frac{1}{4}$ průměru propustku (tedy 27,06 mm). Na zkosení plynule navazovala svislá čelní zeď. Propustek byl umístěn ve středu žlabu. Dno propustku přesně navazovalo na nátokovou desku. Na modelu byla měřena hladina před propustkem, uvnitř propustku a v případě tlakového režimu i za propustkem. Průměr roury modelu propustku byl 108,26 mm. Podélný sklon propustku byl 0,52 %.

VTOK II



Obr. 49 Schémata modelu propustku s typem vtoku II



Obr. 50 Fotografie modelu s typem vtoku II; fotografie pořídil Ing. Tomáš Pícek, PhD.

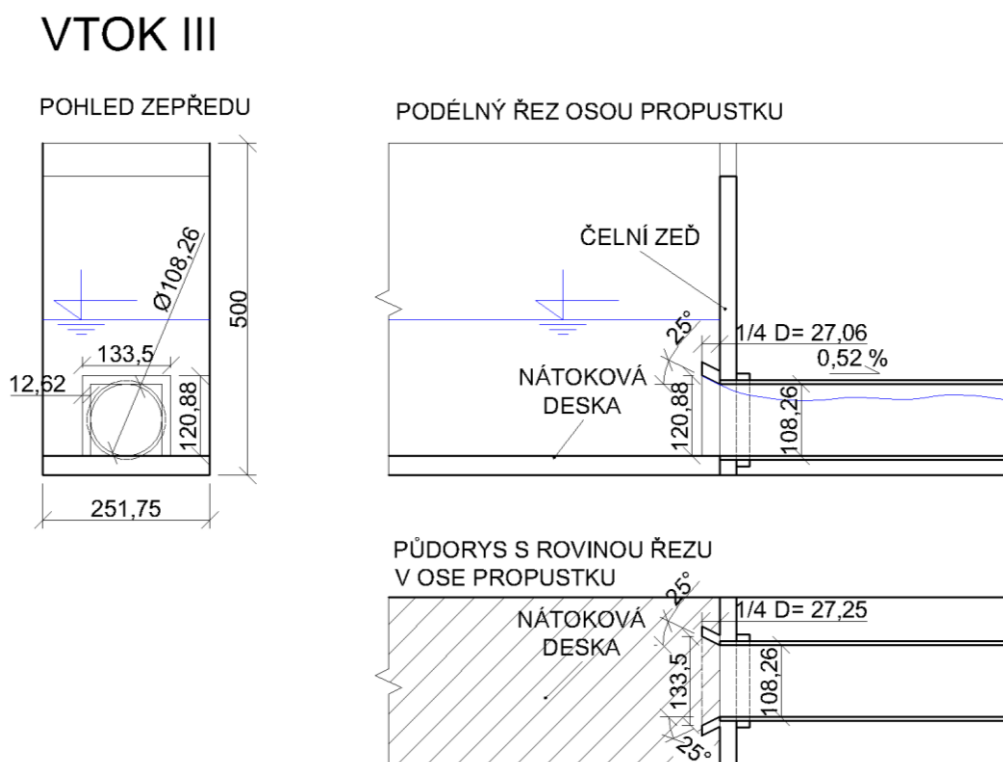


4.2.1.6 Vtok IIa

Geometrie vtoku IIa vychází z geometrie vtoku II. Odlišnost mezi těmito vtoku spočívá pouze v délce zkosení, která byla u této geometrie $1/10,826 * D$, tedy 10 mm. Všechny další parametry zůstaly zachovány.

4.2.1.7 Vtok III

Geometrie vtoku III vychází z geometrie vtoku II. Odlišnost mezi těmito vtoku spočívá v odstranění svislé čelní stěny, která lícovala se zkosenou nástavbou. Zůstala svislá čelní stěna původního modelu propustku s ostrou vstupní hranou. Tento vtok byl tedy vtokem předsazeným, přičemž délka předsazení byla $1/4$ průměru roury propustku D (tedy 27,06 mm). Další geometrické parametry jsou shodné s modelem vtoku II. Na modelu byla měřena hladina před propustkem a v případě tlakového režimu i za propustkem.



Obr. 51 Schémata modelu propustku s typem vtoku III



Obr. 52 Fotografie modelu s typem vtoku III; fotografie pořídil Ing. Tomáš Pícek, PhD.

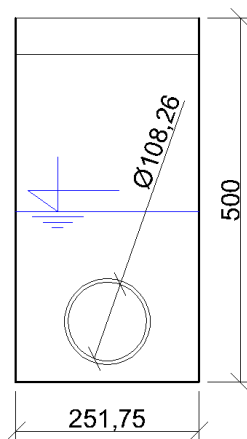


4.2.1.8 Vtok IV

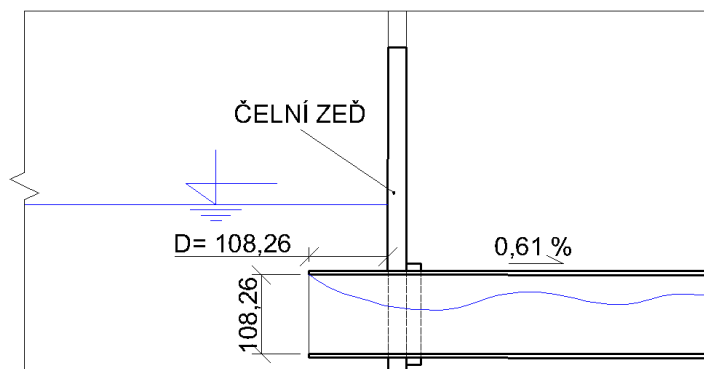
Model propustku s vtokem IV představoval předsazený tenkostěnný kruhový propustek s ostrou vtokovou hranou. Roura propustku byla předsazena o průměr propustku (108,26 mm) před svislou čelní stěnu. Propustek byl umístěn ve středu žlabu. Tento model nebyl jako jediný vybaven nátokovou deskou. Na modelu byla měřena hladina před propustkem, v případě tlakového režimu i za propustkem. Podélný sklon propustku byl 0,61 %.

VTOK IV

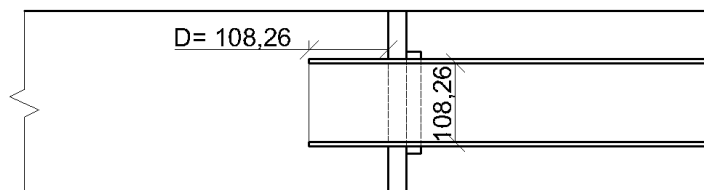
POHLED ZEPŘEDU



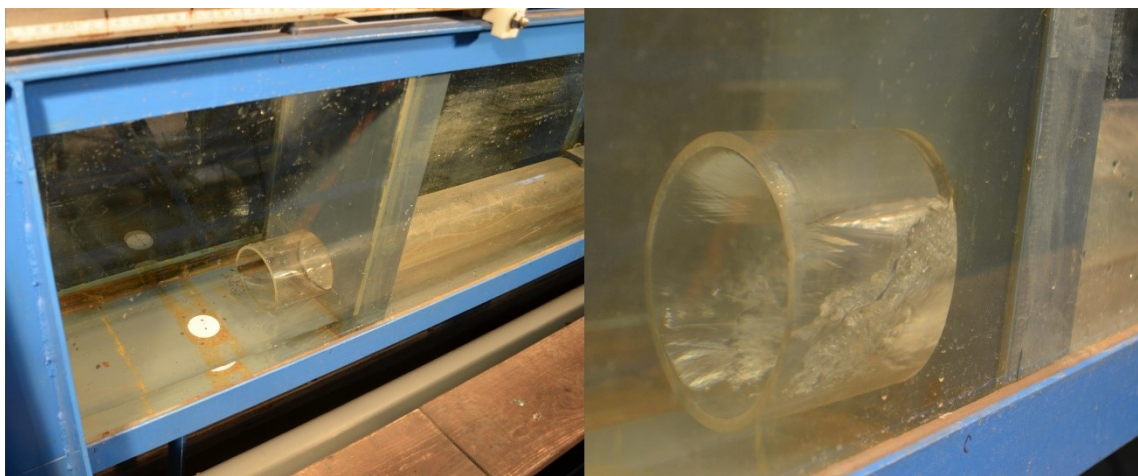
PODÉLNÝ ŘEZ OSOU PROPUSTKU



PŮDORYS S ROVINOU ŘEZU
V OSE PROPUSTKU



Obr. 53 Schémata modelu propustku s typem vtoku IV



Obr. 54 Fotografie modelu s typem vtoku IV

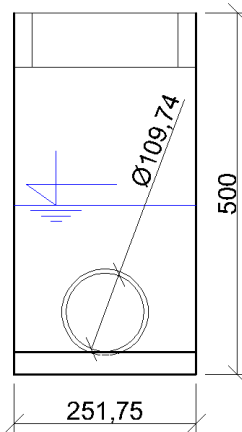


4.2.1.9 Vtok V

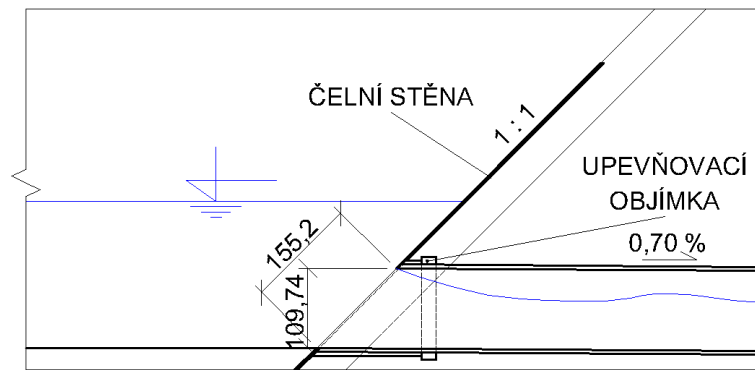
Vtok V byl reprezentován vtokem s šikmým čelem (ve sklonu 1 : 1) propustku a rourou propustku zarovnanou s tímto čelem. Vtok do propustku byl ostrohranný a propustek byl umístěn v osovém středu žlabu. Model byl opatřen nátokovou deskou a dno propustku na ní přesně navazovalo. Na modelu byla měřena hladina před propustkem a pro tlakový režim i za ním. Průměr roury propustku byl 10,974 mm a podélný sklon propustku byl 0,70 %.

VTOK V

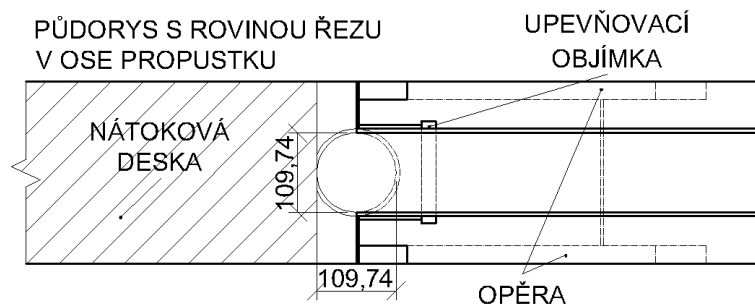
POHLED ZEPŘEDU



PODÉLNÝ ŘEZ OSOU PROPUSTKU



PŮDORYS S ROVINOU ŘEZU V OSE PROPUSTKU



Obr. 55 Schémata modelu propustku s typem vtoku V



Obr. 56 Fotografie modelu s typem vtoku V



5 Měření

Naměření dat pro každý jednotlivý model trvalo vždy několik dní, během nichž se vždy nejprve měřilo proudění o volné hladině uvnitř propustku (resp. proudění s volným a zahlceným vtokem do propustku) a následně se přistoupilo k měření tlakového režimu v propustku. Po naměření všech dat pro daný model následoval den, kdy se pořizovaly fotografie proudění.

5.1 Měřené veličiny

Měřené veličiny potřebné pro vyhodnocení experimentů byly následující:

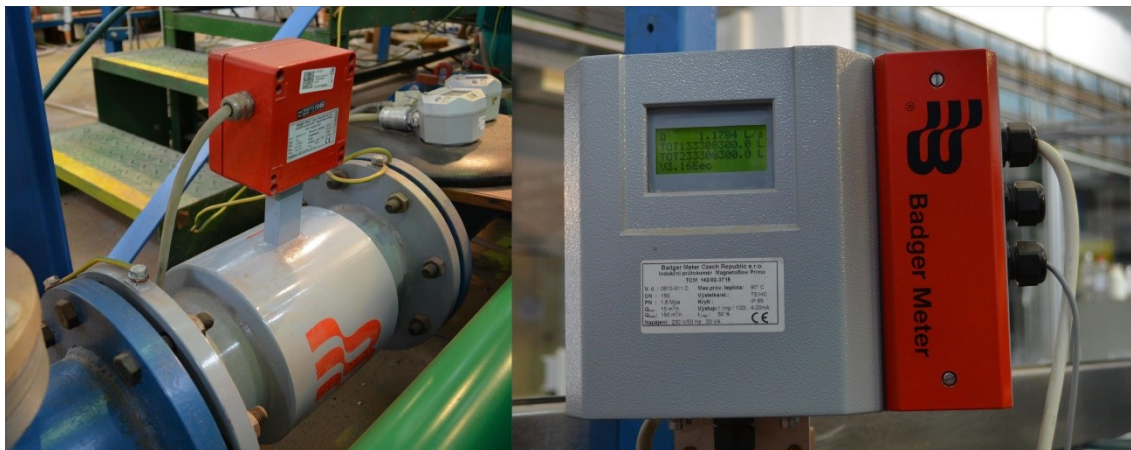
- průtok [l/s],
- podrobný profil hladiny [cm] (v podélném a často i v příčném směru),
- teplota vody [°C] (pro možnost kontroly).

5.1.1 Průtok

Hodnota průtoku byla regulována škrcením na regulačních armaturách (konkrétně se jednalo o šoupátka). Průtoky do 3 l/s byly pouštěny obtokem s osazeným vodoměrem. Pro vyšší průtoky než 3 l/s bylo využíváno hlavní přívodní potrubí žlabu B25 a obtok byl používán pro jemnou regulaci průtoku. Nastavované průtoky se pohybovaly v rozmezí 0,5 až 17,0 l/s.

Pro zjištění hodnoty průtoku bylo používáno několika nezávislých zařízení a to magneticko-indukčního průtokoměru, měrného přelivu a vodoměru. Měření průtoků indukčním průtokoměrem a měrným přelivem bylo provedeno u všech experimentů. Měření průtoků vodoměrem bylo možné jen u nízkých průtoků – kvůli kapacitě obtoku a možností použitého vodoměru. Tudíž vodoměr byl použit jen občas a spíše hodnoty průtoku z něj získané sloužily jako kontrolní. Hodnoty z přístrojů na měření průtoků byly odečítány až poté, co se hladina na modelu ustálila po provedené úpravě průtoku, jež byla provedena, aby byla změřena další úroveň hladiny.

Použitý magneticko-indukční průtokoměr „Magnetoflow Primo“ od firmy Badger Meter s převodníkem má chybu měření $\geq 0,25\%$ z měřené hodnoty [29]. Minimální přesně měřitelný průtok průtokoměrem je $15 \text{ m}^3/\text{h}$ (4,17 l/s) a maximální přesně měřitelný průtok je $150 \text{ m}^3/\text{h}$ (41,67 l/s), přičemž DN průtokoměru je 150 mm.



Obr. 57 Magneticko-indukční průtokoměr s převodníkem instalovaný na žlabu B25



Měrný přeliv žlabu B25 je ostrohranný přeliv trojúhelníkového tvaru s vrcholovým úhlem 90° – Thompsonův přeliv. Tento typ přelivu má obecně spolehlivou přesnost měření průtoků v rozsahu cca 1 až 50 l/s [22]. Výška hladiny před Thompsonovým přelivem byla měřena mechanicky a to pomocí hrotového měřítka ve tvaru háku (vizuální pozorování dotyku s hladinou). Hrotové měřítko bylo umístěno ve skleněném tlumícím válci, jež byl gumovou hadičkou propojen s nádrží před měrným přelivem (princip spojených nádob). Pro určení průtoků z měření výšky hladiny před propustkem byla použita konzumní křivka daného přelivu. Pro tento přeliv byla konzumní křivka popsána jednotlivými body. V případě že měřená hodnota ležela mezi dvěma popsány body, byla použita pro určení přesné hodnoty lineární interpolace.



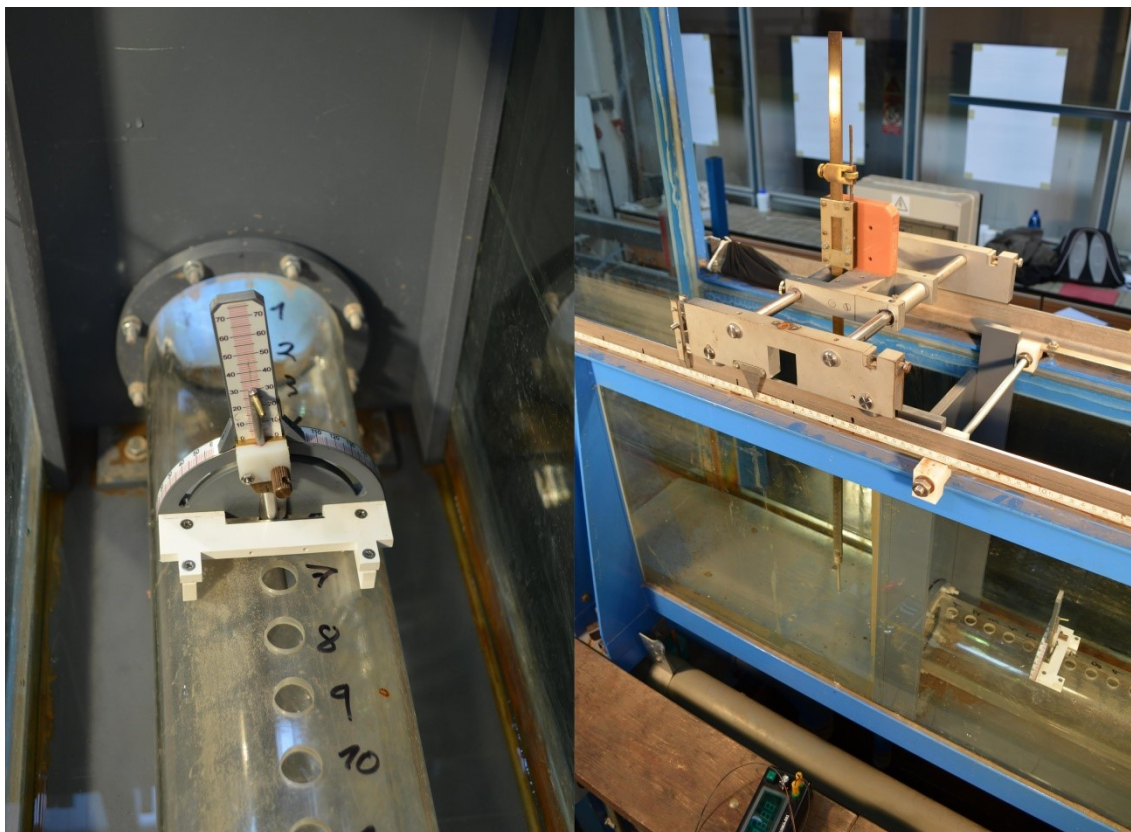
Obr. 58 Vlevo: svislé hrotové měřítko s jehlou ve tvaru háku v tlumícím válci; vpravo: Thomsonův měrný přeliv instalovaný ve žlabu B25

Použitý vodoměr od výrobce Actaris má přesnost odečítání $0,001 \text{ m}^3$. Maximální průtok vodoměrem je $20 \text{ m}^3/\text{h}$ ($5,56 \text{ l/s}$). Ing. Tomáš Pícek, Ph.D. zjistil, že hodnoty získané z průtokoměru jsou zatíženy chybou o velikosti přibližně $4,7 \%$ z měřené hodnoty. Proto je nutné hodnoty průtokoměru opravovat.

5.1.2 Podrobný profil hladiny

Úroveň hladiny před a za propustkem byla měřena svislým hrotovým měřítkem uloženém na pohyblivém můstku, který umožňoval posuv ve směru podélném i příčném vzhledem k ose žlabu. Jehla měřítka byla rovná. Dělené měřítko s noniem umožňuje určení hladiny s přesností $0,1 \text{ mm}$.

Pro možnost měření hladiny uvnitř propustku bylo Ing. Tomášem Píckem, Ph.D. zkonstruováno otočné hrotové měřítko, které umožňovalo měření v polárních souřadnicích. Konstrukce tohoto měřítka využívala zkušenosti z modelu, který byl využit v bakalářské práci autora. Otočné měřítko je plastové konstrukce s kovovými díly. Toto otočné měřítko má přesnost v měření délek 1 mm a přesnost pro měření úhlů je 1° .

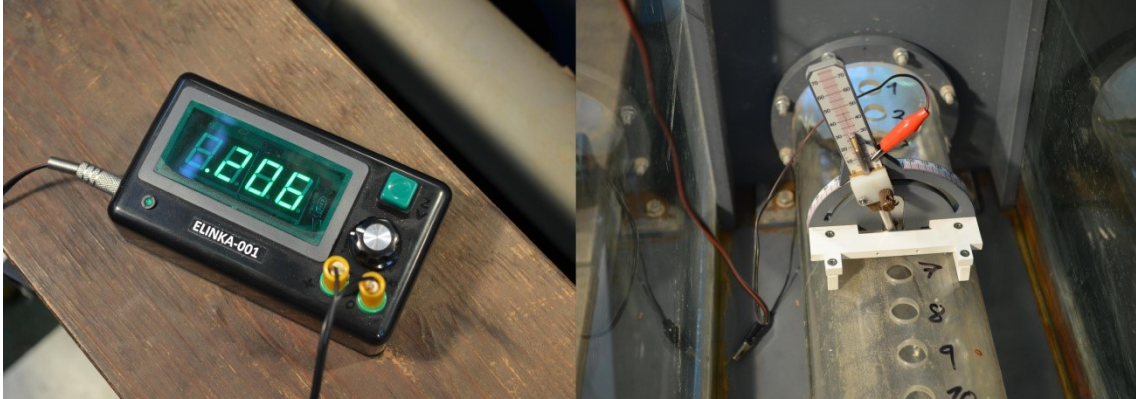


Obr. 59 Vlevo: otočné hrotové měřítko, dále jsou patrné vyvrtané měřicí otvory v rouře propustku; vpravo: hrotové měřítko uložené na pohyblivém můstku

Dalším důležitým přístrojem použitým pro měření hladin byl elektrický přístroj ELINKA-001, který byl zkonstruován zaměstnancem katedry hydrauliky. Tento přístroj je napájen buď z 9V blokové baterie (LR 61) nebo s pomocí transformátoru přímo z elektrické sítě. Přístroj ELINKA-001 se pomocí jednoho výstupního kabelu opatřeného svorkou (tzv. krokodýlek) připojí na hrotové měřítko a druhý kabel se vodičě propojí s vodou (např. se ponoří do vody). Jakmile se hrot hrotového měřítka dotkne hladiny vody v hydraulickém žlabu, tak dojde ke spojení elektrického okruhu. Toto propojení přístroj indikuje rozsvícením zelené diody. Dále je přístroj vybaven zeleně podsvíceným numerickým 4-místným displejem. Na tomto displeji se zobrazují hodnoty od 0,000 do 1,000. Přístroj totiž rozpoznává dobu styku hrotu s hladinou vody (propojení el. okruhu) a dobu, kdy se hrot hladiny vody nedotýká (el. okruh není propojen). Během integračního času, jehož délka se nastavuje otočným potenciometrem, se určuje poměr doby propojení hrotu s vodou a doby, kdy se hrot vody nedotýká. Určený údaj se zobrazuje na displeji v setinách (pokud bychom číslo na displeji vynásobili 100, tak získáme údaj v procentech). Údaj 1,000 tedy značí 100 % a znamená, že se hrot po celý integrační čas dotýká vody; údaj 0,000 naopak znamená, že se hrot vody nedotýká. Při měření hladin hrotovým měřítkem je klíčové přesné určení dotyku hrotu jehly s hladinou vody, což se většinou provádí vizuálně (záleží tedy na schopnostech a zkušenostech pozorovatele). Přístroj ELINKA-001 byl zkonstruován pro objektivizaci měření ve složitých případech rozvlňení hladiny, kdy může i zkušený pozorovatel selhat. V případech, kdy je hladina rozvlňená se těžko odhaduje „správný“ dotyk hrotu k hladině. V jednu chvíli je totiž hrot ponořený a hned je opět „ve vzduchu“. Aby byl bod získaný měřením věrohodný, tak je ideální, aby byl hrot u rozvlňené hladiny polovinu času ve vzduchu a polovinu času ponořený, čímž bude změřena jakási průměrná poloha hladiny. Při pouhém vizuálním

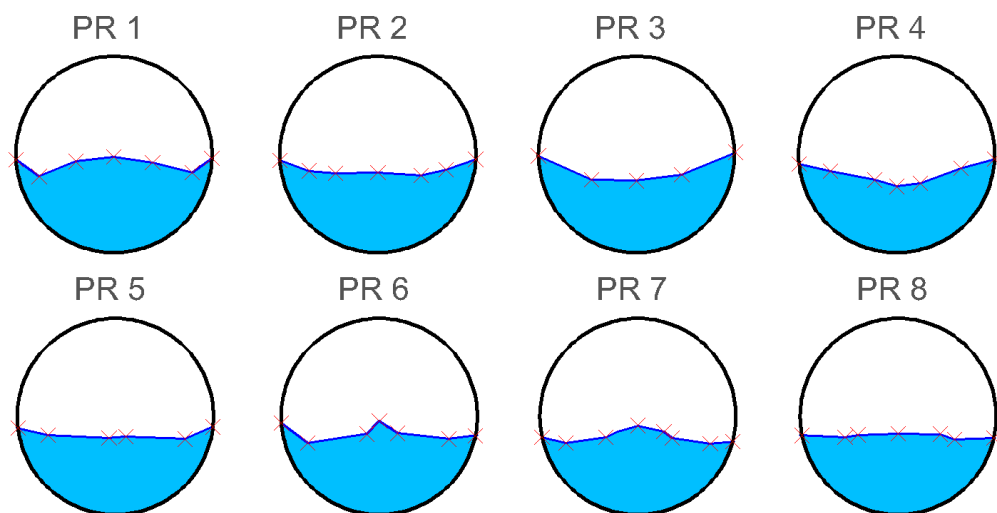


pozorování je tento úkol obtížný a proto je vhodné použít přístroj. S použitím přístroje ELINKA-001 se snažíme o dosažení hodnot blízkých 0,0500 (tedy 50 %), což odpovídá výše popsanému získání průměrné polohy hladiny. Přístroj ELINKA-001 byl používán u všech experimentů. Díky tomu je zaměření hladiny objektivnější, než bylo u předchozích experimentů. Je nutné dodat, že přes ověření funkčnosti přístroje, byla nadále všechna měření, kdy byl přístroj užit, vizuálně kontrolována pozorovatelem.



Obr. 60 Vlevo: zapojený přístroj ELINKA-001; vpravo: připojení výstupních kabelů se svorkou z přístroje ELINKA-001 na otočné hrotové měřítko

Měření hladin uvnitř propustku bylo časově velmi náročné. V každém z jedenácti předvrtaných otvorů bylo nutné zaměřit několik bodů a to tak, aby bylo dostatečně přesně zaznamenáno rozložení hladiny v daném profilu. Hladina uvnitř propustku je rozvlněná a její tvar v příčném profilu se mění po délce propustku. Nejlépe je rozložení patrné na následujícím obrázku, který čerpá z měření na fyzikálním modelu, jenž byl použit v autorově bakalářské práci.



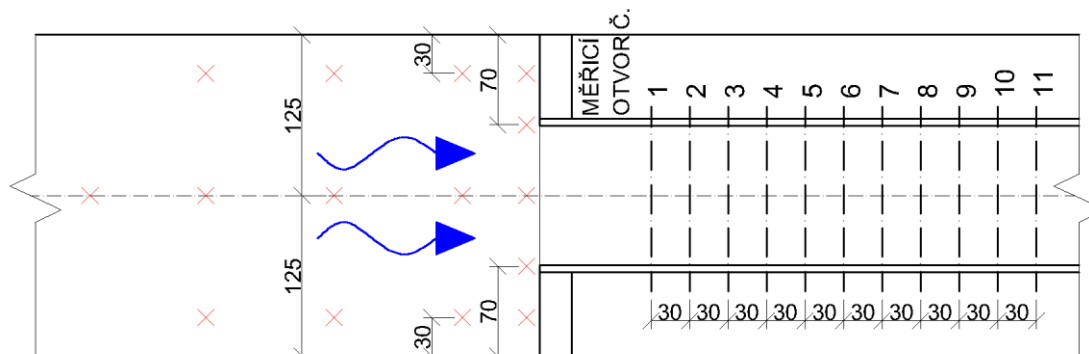
Obr. 61 Schémata změřených průběhů hladin uvnitř propustku na modelu z bakalářské práce; červené křížky označují zaměřené body; příčný profil 1 je profil nejbližší vtoku do propustku

Jak je z Obr. 61 patrné, tak hladina za vtokem do propustku je nejvyšší v ose propustku a u stěn. Se zvětšující se vzdáleností od vtoku se vypuklost zrovňuje, až je hladina skoro vodorovná a posléze se objeví „středová vlna“, jež dále opět mizí a hladina se opět uprostřed sníží. Toto rozložení hladiny se postupně utlumuje a hladina se čím dál více přibližuje k hladině ustálené. Při experimentech byly uvnitř propustku měřeny význačné body, které určovaly změnu tvaru hladiny; u jednodušších profilů uvnitř propustku stačily někdy i 3 body; u složitějších tvarů hladiny bylo potřeba



bodů více (většinou maximálně 7). Určení rozložení hladiny za propustkem tedy znamenalo vždy změřit několik desítek bodů. Vzhledem k tomu, že zkoumání rozložení hladiny nebylo primárním cílem této práce, neboť se jím podrobně zabývala předcházející bakalářská práce a aby mohl být vyhodnocen v rozumném časovém rámci dostatečný počet modelů vtoků, tak bylo měření hladiny za vtokem realizováno pouze u modelů vtoků I a II.

Pro vtoky I a II byla hladina před propustkem měřena v určitém rastru; nejdetailněji byla hladina měřena těsně před vtokem a dále od vtoku, jak se hladina uklidňovala, bylo měření bodů méně husté. Názorná ukázka měření hladin před propustkem je vidět na následujícím obrázku, který ukázkově demonstruje měřené body a profily pro jeden průtok na modelu propustku.



Obr. 62 Ukázka měřených bodů pro jeden průtokový stav na modelu vtoku II; červené křížky ukazují měřené body hladiny před propustkem; dále je na obrázku názorně vidět rozmístění měřících profilů pro hladinu uvnitř propustku

Pro další typy vtoků byla hladina před propustkem měřena pouze v bodech v ose žlabu, neboť nebylo nutné určovat tvar hladiny a hledalo se místo, kde už bude hladina ustálená a úroveň ustálené hladiny.

Hladina za propustkem byla měřena u všech vtoků v průběhu měření tlakového režimu proudění. Většinou byly zaměřeny 3 body v ose žlabu. První dva body byly těsně za sebou v nejtěsnější měřitelné blízkosti za výtokem z propustku. Tyto body byly potřebné do vyhodnocení ztrát a dalších parametrů při tlakovém proudění. Třetí bod byl naopak měřen poměrně daleko za výtokem z propustku, v místě, kde se jí již předpokládala ustálená hladina a sloužil primárně jako kontrola.

Měření hladin bylo vždy zahájeno až po ustálení celého systému po změně průtoku nebo úpravě stavu dolní vody v případě tlakového proudění.

5.1.3 Teplota

Ačkoliv nebylo předpokládáno, že by bylo nutné údaj o teplotě vody použít pro vyhodnocení experimentů, byla průběžně její hodnota zjišťována. Důvodem bylo, že bez údaje teploty by nemohla být určena viskozita nebo hustota vody, i kdyby to zrovna bylo nutné. Teplota byla měřena pro každý druhý až třetí průtokový stav. K měření byl použit rtuťový teploměr umístěný na plováku v zásobní nádrži na vodu žlabu B25. Teploměr byl takřka celý ponořen ve vodě. Stupnice teploměru umožňovala odečítání celých °C s tím, že šlo odhadnout teplotu s přesností 0,5 °C. Teplota vody se pohybovala v rozmezí od 15 °C do 25 °C a záleželo na ročním období, v kterém probíhalo dané měření, neboť hydraulickou laboratoř nelze v zimě dobře vytápět a v létě nelze naopak dobře větrat.



5.2 Přehled provedených experimentů

Jak vyplývá z výše uvedeného, tak pro každý model vtoku byly změřeny jednotlivé nastavené průtoky, pro něž byla změřen podrobný profil hladiny. Měřilo se jak proudění s volným i zatopeným vtokem při volné hladině uvnitř propustku, tak i tlakové proudění s různými úrovněmi hladiny dolní vody.

Celkově bylo měření provedeno na pěti odlišných typech vtoků, tří variantách se dvěma propustky vedle sebe a jednou variantou vtoku se zkosením hran, které bylo modifikováno. Pro všechny modely byla měřena hladina před propustkem a za propustkem. U dvou modelů byla měřena i hladina uvnitř propustku. Kompletní přehled provedených měření je vyhotoven v následující tabulce.

typ vtoku	Režim s volnou hladinou v propustku				Režim s tlakovým prouděním v propustku		
	rozsah průtoků [l/s]	počet měřených průtoků	hladina před propustkem	hladina uvnitř propustku	měřené průtoky cca [l/s]	počet měřených úrovní hladin	hladina před a za propustkem
I	0.5 – 15.3	15	ANO	ANO	3; 6; 9; 12; 15	21	ANO***
Ia	1.0 – 12.0	12	ANO	NE	6; 9; 12	10	ANO
Ib	1.0 – 12.0	12	ANO	NE	6; 9; 12	11	ANO
Ic	1.0 – 5.9	6	ANO	NE	3; 4.5; 6	8	ANO
II	1.0 – 16.5	16	ANO	ANO	6.6; 11.9; 16.8	18	ANO
IIa	1.0 – 14.4	15	ANO**	NE	4; 8; 12	11	ANO**
III	1.0 – 17.0	29	ANO*	NE	6.6; 9; 12; 16.9	17	ANO**
IV	1.0 – 15.5	16	ANO	NE	6.5; 9; 12; 17	18	ANO
V	1.0 – 14.4	15	ANO	NE	6.5; 9; 12; 17	17	ANO

* část dat měřil Ing. Tomáš Pícek, Ph.D.

** data měřil Ing. Tomáš Pícek, Ph.D.

*** data měřila Bc. Petra Jurečková

Tab. 7 Přehled provedených experimentů na fyzikálních modelech vtoků do propustku



6 Pozorování, vyhodnocení a diskuze

Vzhledem k odlišnostem chování proudění v propustku mezi prouděním o volné hladině a tlakovým prouděním budou pozorování a výsledky pro tyto dva režimy rozděleny do dvou podkapitol.

6.1 Proudění s volnou hladinou v propustku

Proudění o volné hladině bylo měřeno a vyhodnocováno pro případ volného i zahlceného vtoku do propustku. Mezi cíle měření patřilo nalezení zúžené hloubky za vtokem, zjištění kapacity vtoků propustků pro různé geometrie vtoků pomocí bezrozměrných konzumčních křivek, stanovení součinitele místní ztráty na vtoku ξ pro ty geometrie, u nichž byl určen profil zúžené hloubky, stanovení dalších možných vyhodnotitelných součinitelů popisujících proudění vody propustky a pozorování jevů proudění.

Aby bylo možné nalézt zúženou hloubku za vtokem propustku, tak bylo nutné, aby byl výtok z propustku pro všechny průtoky volný a nemohlo dojít k situaci, kdy by byla zúžená hloubka v propustku ovlivněná nebo dokonce zatopená dolní vodou. Zatopení zúžené hloubky může způsobit i vzniklý vodní skok v propustku, což by bylo pro měření nepřijatelné. Možnost zatopení dolní vodou byla eliminována polohou výtoku z modelu propustku – dno výtoku bylo umístěno přibližně 5 cm nad dnem hydraulického žlabu. Současně je profil žlabu a odtok z něj dostatečně kapacitní, aby samovolně nedocházelo ke vzdouvání vody dolní vody. Fotografie volného výtoku z modelu je k nalezení v přílohách na straně 118 (Obr. 92). Vzniku vodního skoku zabráňoval dostatečný sklon dna modelů propustku ($i_0 > i_k$) a přiměřená délka modelů. Froudovo číslo v propustku bylo vždy > 1 . Proudění uvnitř propustku tedy bylo vždy bystřinné (nadkritické).

Proudění v případě, že zúžená hloubka za vtokem není zatopená, je jen jednou z možností proudění v propustku, která může obecně nastat. Případy s vlivy dolní vody na proudění v propustku pro režim volné hladiny v propustku nebyly z praktických důvodů (nemožnost nalezení zúžené hloubky) řešeny. Teoreticky je tato problematika popsána v kapitole 2.2.4, která se zabývá současně používanými hydraulickými výpočty pro propustky.

6.1.1 Pozorované chování proudění

Při proudění s volnou hladinou a s nezahlceným vtokem a volným výtokem byla před propustkem hladina velmi klidná (takřka vodorovná). Ke snížení hladiny docházelo až v těsné blízkosti vtoku do propustku. Naopak hladina uvnitř propustku je zvlněná již od nejnižších průtoků. A čím vyšší průtok byl měřen, tím intenzivnější rozvlnění uvnitř propustku nasávalo, ačkoliv v základních rysech mělo proudění stále jedno rozložení. Po zúžení proudění těsně za vtokem vznikají různé druhy vln. V pohledu shora mají šípovitý tvar, který se propaguje dále po proudu. V příčném profilu dochází vždy ke snížení střední části hladiny a vyvýšení částí na kraji. Postupně se situace obrátí a uprostřed vzniká poměrně úzká a vysoká vlna, přičemž úroveň hladiny na krajích se o něco sníží. Poté dochází k zániku středové vlny a opět nastává situace, kdy je ve středu hladina nejnižší a nejvyšší je na krajích propustku. Při zvyšujících se průtocích se středová vlna posouvá dále po proudu a na začátku propustku se hladina na okrajích dostává výše.

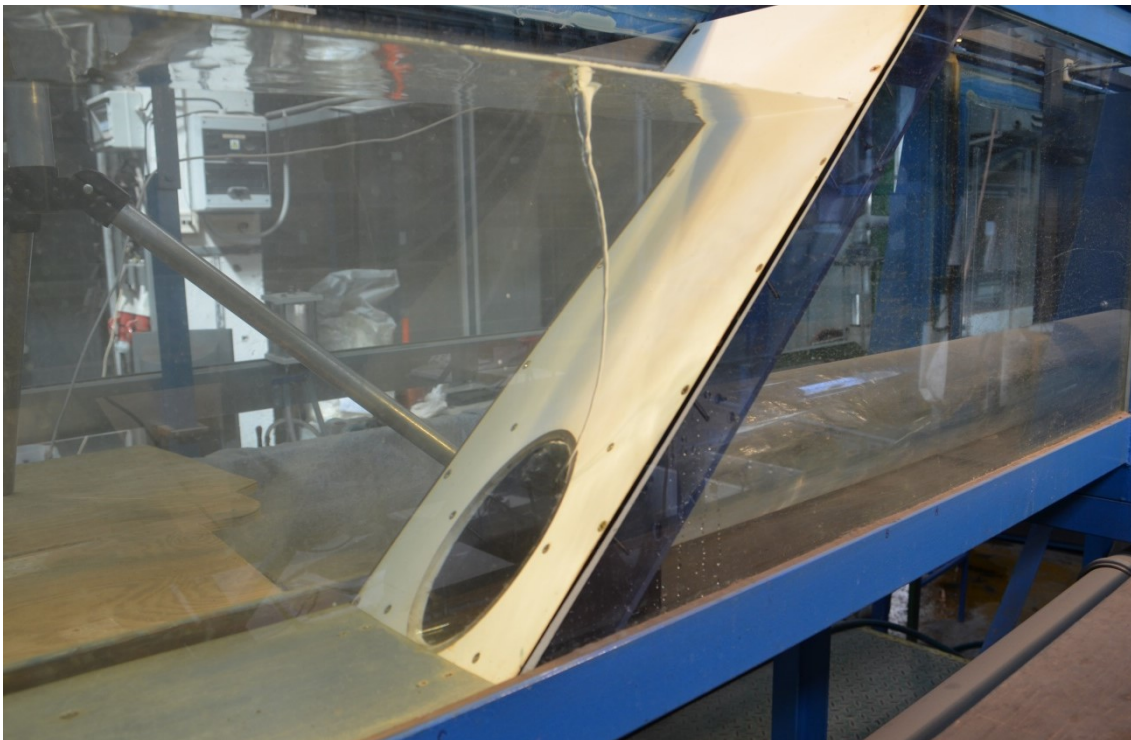


Jakmile dojde k zahlcení vtoku do propustku, tak brzy zmizí snížení hladiny v oblasti vtoku. Zato se občas objevuje drobné rozvlnění hladiny. U některých vtoků se při vyšších průtocích objevovaly pulzace hladiny, tedy relativně rychlý vzestup a následný pokles. Toto chování bylo zaznamenáno především u geometrie vtoku V. Většinou se tyto pulzace objevovaly ve spojitosti se vznikem vírů. Víry jsou u propustků negativním jevem, neboť pulzace hladiny způsobené vírem jsou nepříznivé pro stavbu propustku [8] a v případě, že vír zasahuje až do vtoku propustku, tak snižuje kapacitu propustku [10; 30]. Víry se vytvářely v podstatě u všech modelových vtoků. U vtoků II a III se víry objevovaly minimálně a jen výjimečně se prohloubily až do průřezu vtoku. Naopak u vtoku V (šikmé čelo propustku) se víry objevovaly s nejvyšší četností a zároveň se jednalo převážně o velké víry, které zasahovaly až do průřezu vtoku. Celkově většina pozorovaných vírů byla málo stabilní a po chvíli zanikly. Stabilní víry se objevovaly jen u nižších výšek hladiny před propustkem. Přehledně byl rozsah objevování vírů u proudění s volnou hladinou uvnitř propustku zpracován v Tab. 8, která následuje. Potvrzuje se údaj z literatury, že vír se nevytvoří pokud $y_h > 3$ až $4 D$ [30].

Typ vtoku	y_h/D [-]	velikost vírů
I	1.6 – 2.7	malé
II	1.5 – 2.2	malé
III	1.3 – 1.5	malé i velké
IV	1.2 – 1.6	malé i velké
V	1.2 – 2.9	velké

Tab. 8 V tabulce je přibližný rozsah poměru y_h (hladina horní vody) a D (průměr propustku), pro který se při experimentech objevovaly víry; vyhodnocení bylo provedeno jen pro základní typy vtoků

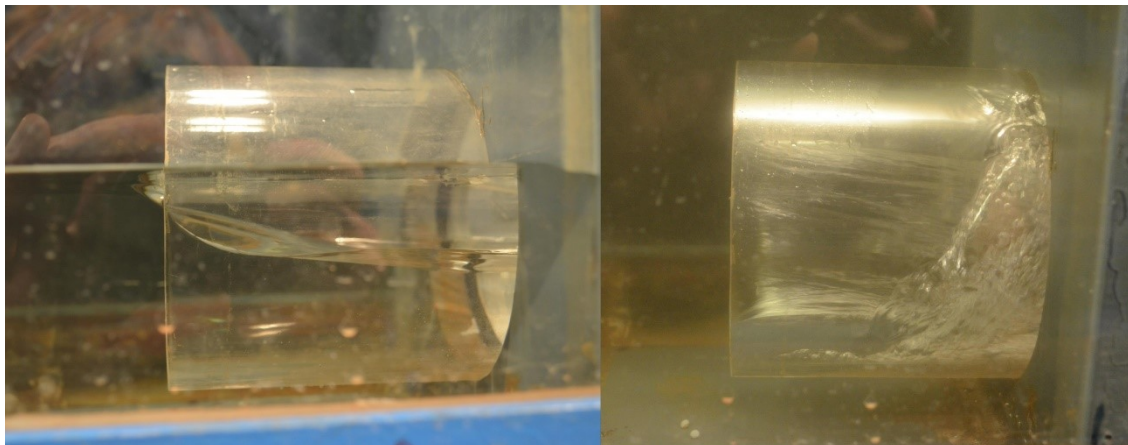
Z Tab. 8 vyplývá, že geometrie vtoku V se jeví jako problematická, neboť víry se vytvářejí brzy po zahlcení vtoku skoro až po výšku $3xD$.



Obr. 63 Velký vír, který zasahuje do profilu vtoku V při průtoku $Q = 12$ l/s; poměr $y_h/D = 2,90$



Zúžení proudu za vtokem je nejvíce patrné u stavů se zahlceným vtokem. Při stavech, kdy vtok ještě není zahlcen, je pozorovatelné boční zúžení proudu, které se ovšem vizuálně nejvíce dramaticky a není přímo pozorovatelné odtržení proudu od stěn. Jakmile se ovšem vtok do propustku zahltí, tak je odtržení od stěny propustku vždy patrné na jeho horní hraně. Pouze u vtoku IV (pozn. předsazený vtok) bylo odtržení proudu od stěn patrné po celém obvodu vtoku (viz Obr. 54 a Obr. 64). Vliv má patrně absence nátokové desky a předsazení před stěnou u tohoto vtoku. Asi překvapivě nejmenší pozorovatelné odtržení proudění od stěny bylo u vtoku V.



Obr. 64 Srovnání zúžení proudění a odtržení proudu od stěn propustku pro stav s volným vtokem (vlevo) a stav se zahlceným vtokem (vpravo) pro vtok IV, kde byly tyto jevy nejvíce patrné

6.1.2 Zúžená hloubka a součinitel k

Zúžená hloubka je místo s nejnižší hloubkou za vtokem do propustku. Dále za profilem zúžené hloubky se opět výška hladiny zvyšuje. K tomuto jasně definovanému profilu se následně vztahuje Bernoulliho rovnice (viz rovnice 2. 5), která je nezbytná pro celkový návrh propustku. Jak ovšem zúženou hloubku nalézt, když je hladina v propustku rozvlněná? Řešením je určit plochy příčných profilů hladiny za vtokem a profil s nejmenší plochou bude profil zúžené hloubky. Zjištění průtočné plochy v profilu zúžené hloubky je možné díky znalosti průběhu hladiny pro měřený průtok. Ovšem pro toto měření je nutné měřit průběh hladiny uvnitř propustku náklonným hrotovým měřítkem, což (jak již bylo napsáno) je časově velmi náročné, proto bylo toto měření provedeno jen u geometrií vtoků I a II a tak bude vyhodnocení údajů týkajících se zúžené hloubky provedeno jen pro tyto geometrie.

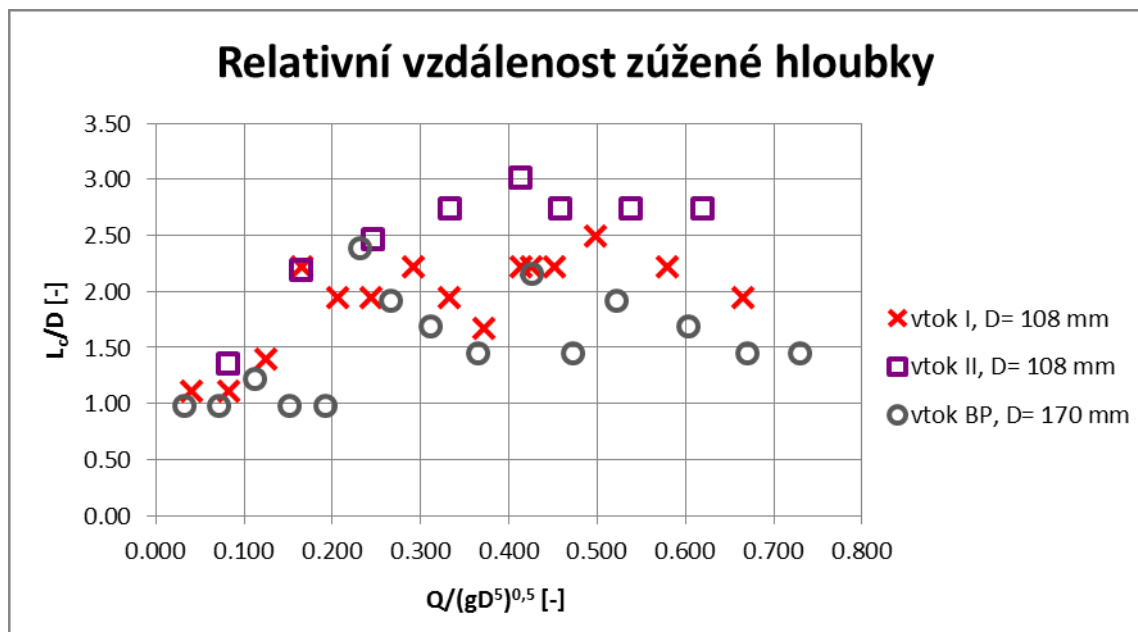
Pro přesné zjištění velikosti průtočných ploch ze zaměření hladiny byl Ing. Tomášem Pickem, Ph.D. vytvořen program v aplikaci MS Excel, do něhož byla potom vkládána naměřená data hladin, a program určil průtočnou plochu. Tento přístup byl rychlejší než autorem používaný postup vykreslení profilů pomocí LISP aplikace a jejich následném změření v programu AutoCAD 2012. Po vypočtení průtočné plochy byla nalezena minimální plocha, která byla v blízkosti vtoku (tj. jestliže docházelo ke zmenšení velikosti ploch a následně k jejich zvětšení a opětovnému zmenšení ve větší vzdálenosti, tak byl jako profil zúžené hloubky určen nejmenší profil blíže ke vtoku). Po nalezení profilu zúžené hloubky bylo zapotřebí určit velikost zúžené hloubky, ačkoliv hladina je rozvlněná. Toho bylo docíleno převedením rozvlněného průtočného profilu na průtočný profil s vodorovnou hladinou při zachování stejné plochy. Tímto je zúžená plocha jednoznačně určena.



Data naměřená pro modely vtoků I a II (posléze i pro další modely) budou také srovnávána s daty z měření, která byla provedena pro bakalářskou práci. Model propustku pro bakalářskou práci měl průměr $D = 170$ mm a byl umístěn do žlabu B50 (určená šířka žlabu byla 522 mm). Geometrie vtoku byla stejná jako u vtoku I s tím rozdílem, že model byl umístěn v širším žlabu, čímž může být simulováno například širší koryto toku. Drobnou změnou je malá oprava hodnoty průtoku oproti bakalářské práci. Důvodem této opravy průtoku je, že byla zjištěna netěsnost výpustného šoupěte v hydraulickém okruhu žlabu B50. Tato netěsnost mohla existovat už v době měření dat pro bakalářskou práci na modelu propustku. Proto je hodnota průtoku a veličin z něj počítaných upravena u dat z bakalářské práce o pravděpodobnou průměrnou hodnotu úniku vody netěsností (přibližně 0,3 l/s).

Aby bylo možné srovnávat změřené nebo spočítané veličiny pro různé modely, kdy takřka mnoho modelů má odlišný průměr propustku a další parametry, tak je nutné aplikovat teorii podobnosti hydrodynamických jevů, která byla popsána v kapitole 3.4. Pro srovnání budou používány bezrozměrné veličiny (bezrozměrný průtok, relativní zúžená hloubka apod.) podle této teorie. Některé koeficienty jsou již bezrozměrné samy o sobě (např. ztrátový součinitel ξ) a nemusí být tedy nijak upravovány.

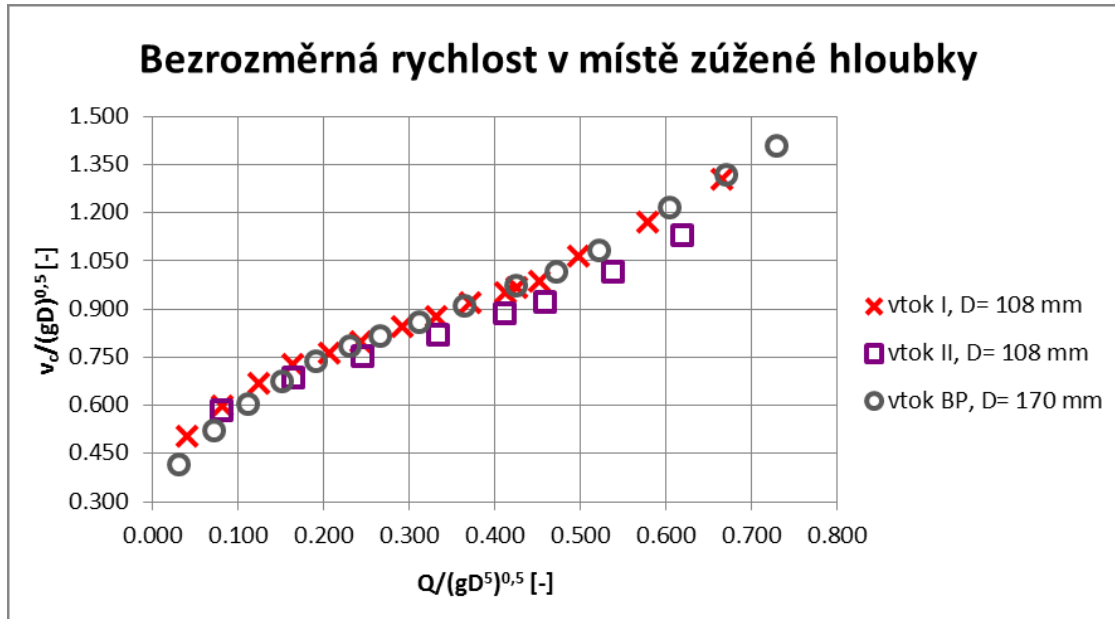
U vyhodnocených měření vtoků I, II a vtoku z bakalářské práce se zúžená hloubka nacházela vždy maximálně do vzdáleností 3 násobků průměru D propustku. Ve vzdálenosti zúžené hloubky jde vyzorovat určitý trend, který je poněkud překvapující. Nejdříve se vzdálenost, kde je lokalizován profil zúžené hloubky, prodlužuje a pak náhle se opět zúžená hloubka začne pozvolně přibližovat blíže ke vtoku. Tento průběh je patrný na grafu, který je vidět na následujícím Obr. 65. Je zde patrné, že podobný průběh byl u všech měřených geometrií. Zúžená hloubka se objevuje v podobné vzdálenosti u vtoků I a vtoku BP (pracovní název vtoku z bakalářské práce), které si jsou geometricky podobné; zato u vtoku II je již vzdálenost více odlišná a je více odlišná hlavně za vyšších průtoků. Je tedy vidět, že geometrie vtoku má vliv na vzdálenost, v níž se zúžená hloubka objeví.



Obr. 65 Graf zobrazuje relativní vzdálenost zúžené hloubky závislou na bezrozměrném průtoku



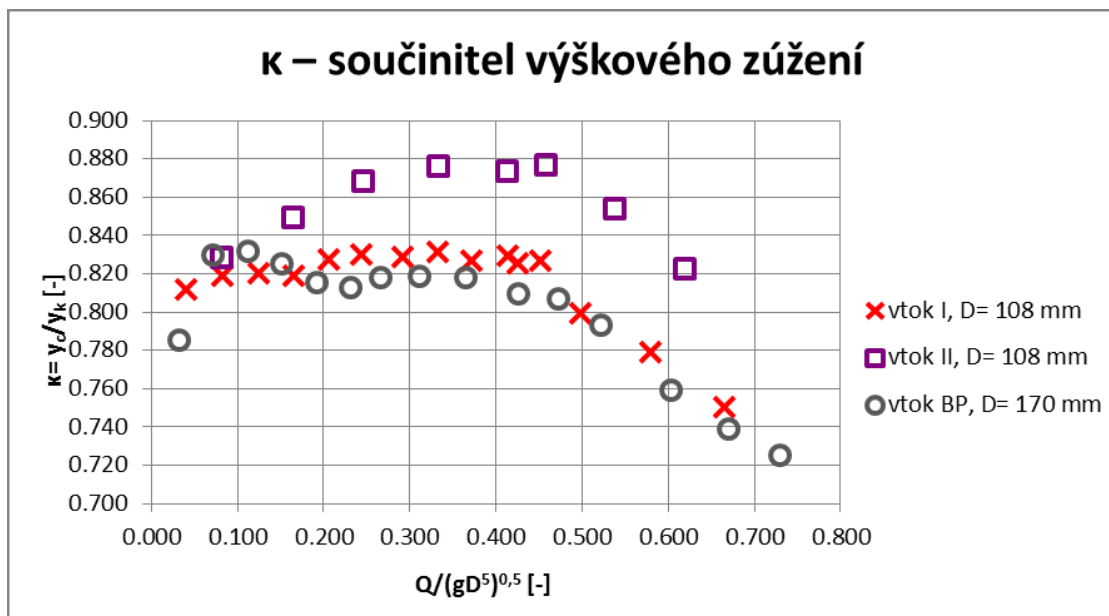
Nabízí se předpoklad, že větší vzdálenost zúžené hloubky by mohla souviset s vyšší rychlostí proudění. Aby bylo možné tento předpoklad vyhodnotit, je v grafu na Obr. 66 vynesena závislost bezrozměrné rychlosti na bezrozměrném průtoku v místě zúžené hloubky.



Obr. 66 Rychlost proudění v profilu zúžené hloubky

Jak je na Obr. 66 vidět, tak ač u vtoku II je zúžená hloubka nejdále za vtokem, tak je u ní rychlost proudění celkově nejnižší. Zato rychlosti mezi vtoky I a vtokem BP mezi sebou velmi dobře korelují. Je patrné, že naopak při nižší rychlosti je vyšší vzdálenost zúžené hloubky. Čím je ovšem způsoben zvrát tendence průběhu vzdáleností zúžené hloubky? Při bližším zkoumání se ukázalo, že tento zvrát nastává v okamžiku zahlcení vtoku. Jakmile se vtok do propustku zahltí, tak se tedy najednou začne vzdálenost mezi zúženou hloubkou a vtokem zkracovat nebo stagnovat.

Další parametrem, který ukazuje, jak se proud zužuje po vtečení do propustku, je součinitel výškového zúžení κ . Součinitel výškového zúžení κ spočítáme podle rovnice 2. 1. Vypočítané hodnoty součinitele κ jsou vyneseny v následujícím grafu na Obr. 67.



Obr. 67 Zjištěné hodnoty součinitele výškového zúžení κ ; počítaná kritická hloubka je kritická hloubka v propustku



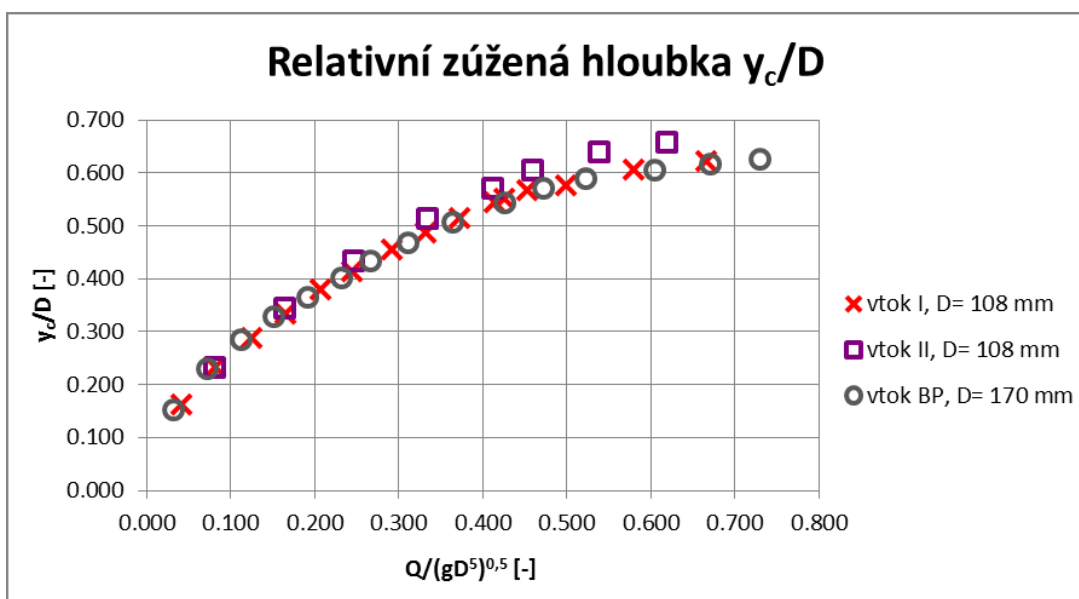
Na Obr. 67 lze pozorovat, že není příliš odlišný vývoj hodnot součinitele κ mezi vtoky I a BP, což značí, že na tento součinitel nemá vliv šířka koryta před propustkem. Patrný je vliv tvaru vtoku, neboť vtok II má průběh hodnot odlišný. Pro porovnání hodnot součinitele κ určených experimentem s hodnotami v aktuálně používané metodice (viz Tab. 3) bylo provedeno srovnání, které je v Tab. 9. Zde byl určen interval, v němž se vyhodnocené hodnoty κ pohybovaly (minimum až maximum), průměrná hodnota (průměr ze všech určených hodnot pro daný vtok) a upravená průměrná hodnota, která brala v úvahu jen hodnoty naměřené v intervalu bezrozměrného průtoku $\langle 0,05; 0,50 \rangle$, čímž byly odstraněny extrémní hodnoty při malém nebo naopak velkém průtoku.

Typ vtoku	Experiment			κ literatura [-]
	Interval κ [-]	Průměr κ [-]	Upravený průměr κ [-]	
BP	0.725 – 0.832	0.80	0.82	0.9
I	0.750 – 0.831	0.81	0.82	
II	0.823 – 0.877	0.86	0.86	0.95

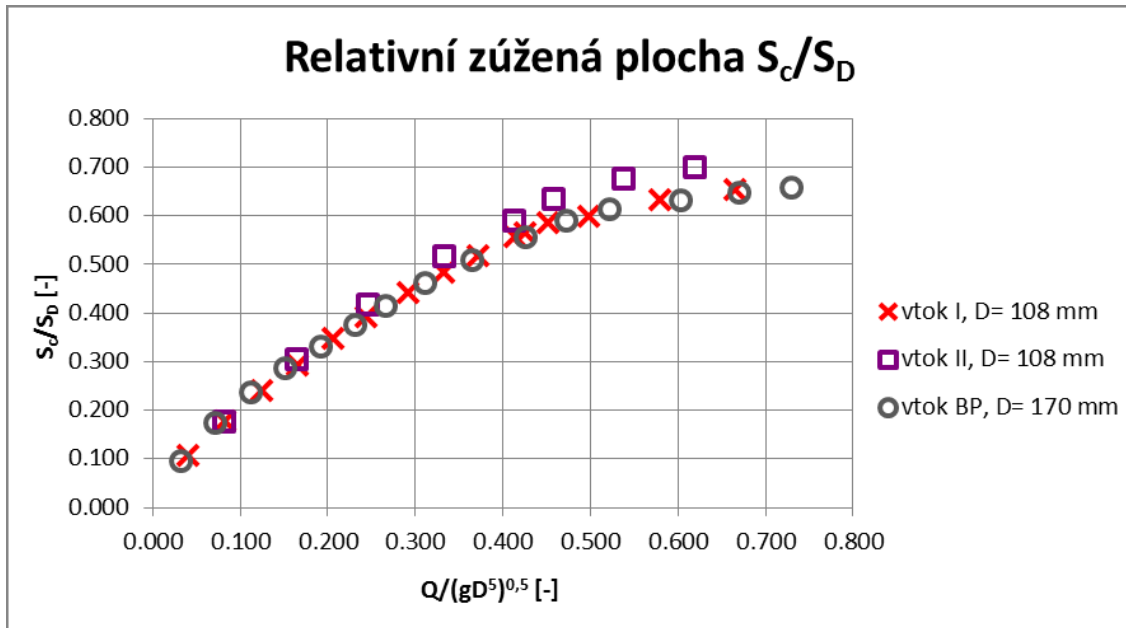
Tab. 9 Vyhodnocení a srovnání experimentem určených hodnot součinitele κ s hodnotami současně používanými; srovnání vtoku II je provedeno s vtokem, který je podobný, leč bohužel ne úplně stejný, neboť v dostupné literatuře není stejná geometrie, jako má vtok II

Srovnání hodnot z experimentů a literatury ukazuje, že současně užívané hodnoty součinitele κ jsou o 0,05 až 0,1 vyšší než hodnoty z experimentů. To značí, že zúžení proudění na vtoku je o něco větší, než se obvykle předpokládá. Dále je vidět, že vtok II vykazuje menší výškové zúžení než vtoky si podobné I a BP.

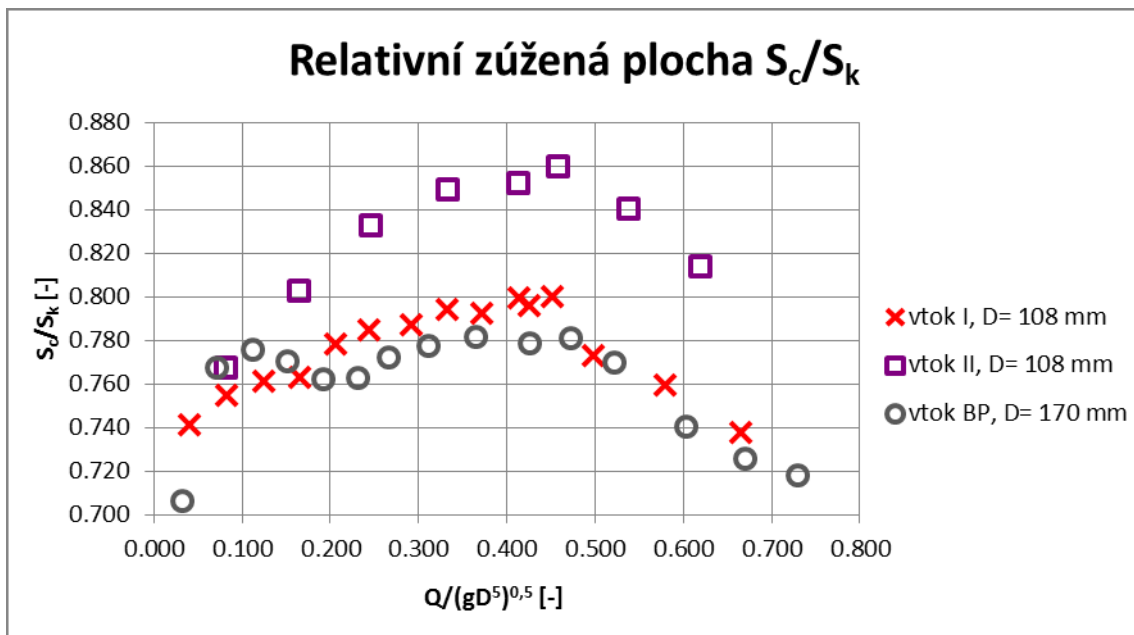
Dále byly vyhotoveny tři další grafy, které dávají lepší představu o srovnání zúžené hloubky, popř. průtočné plochy v místě zúžené hloubky s dalšími veličinami a to konkrétně s průměrem propustku, průtočnou plochou při kritické hloubce a průtočnou plochou profilu propustku. Grafy korespondují s vyhodnocením výše napsaným. Vtok II má nejvyšší hodnotu součinitele výškového zúžení a tudíž i má nejvyšší hodnotu zúžené hloubky (viz Obr. 68) a obsahu průtočné plochy (viz Obr. 69 a Obr. 70). Vtoky I a BP naopak stále vycházejí velmi podobně.



Obr. 68 Nárůst zúžené hloubky při zvyšujícím se průtoku



Obr. 69 Nárůst průtočné plochy v profilu zúžené hloubky při zvyšujícím se průtoku



Obr. 70 Porovnání vývoje poměru průtočné plochy v místě zúžené hloubky s průtočnou plochou v kritické hloubce propustku



6.1.3 Součinitelé β , ξ a φ

6.1.3.1 β – součinitel zatopení

Součinitel zatopení β určuje, kdy je daný vtok už zatopený. Součinitel je definován rovnicí 2. 19, v níž je vyjádřen z rovnice 2. 8. K vyhodnocení tohoto součinitele nejsou zapotřebí měření uvnitř propustku, proto je vyhodnocení provedeno pro všechny základní geometrie měřených vtoků. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce. V téže tabulce je rovněž provedeno srovnání s hodnotami užívanými v současné metodice (viz str. 24).

Typ vtoku	β experiment [-]	β literatura [-]
BP	1.051	1.16 – 1.20
I	1.051	
II	1.057	1.33 – 1.40*
III	1.048	
IV	1.048	1.08 – 1.09
V	1.035	1.09 – 1.10

* srovnáno s podobným vtokem

Tab. 10 Experimentem určené hodnoty součinitele zatopení vtoku β srovnávané s hodnotami používanými současnou metodikou; vtoky II a III jsou srovnány pouze s geometricky podobným vtokem, ale ne stejným vtokem, protože pro stejná geometrie nebyla v žádném nalezeném zdroji měřena

Tab. 10 jasně ukazuje, že současně používané hodnoty součinitele β počítají se zahlcením vtoku do propustku při vyšší hladině před propustkem. Srovnání hodnot u propustků II a III je pouze orientační, neboť zcela stejná geometrie vtoku nebyla v nalezení zdrojích nikdy vyhodnocována. Je zajímavé, že hodnoty získané experimentem se liší maximálně o několik setin. Dále je vidět, že šířka koryta před propustkem na zahlcení s nejvyšší pravděpodobností vliv nemá, neboť pro vtoky BP a I vychází hodnota součinitele β stejná. Hodnoty získané experimentem jsou na straně bezpečnosti. Protože experimentální hodnoty součinitele β jsou si velmi podobné, stojí uvažovat nad tím, jestli nepoužívat pro všechny nejběžnější typy vtoků jednu průměrnou hodnotu součinitele β , čímž by došlo k určitému zjednodušení. Průměr experimentálních hodnot je $\beta = 1,048$, součinitel β by tedy mohl být nově zaveden jako $\beta = 1,04$. Zůstane však otázkou jestli se navýšením vůbec zabývat setinami a rovnou nepočítat s tím, že k zahlcení propustku dojde při výšce hladiny před, která přibližně odpovídá horní výšce hrany propustku a tedy by součinitel $\beta = 1,0$.

6.1.3.2 ξ – součinitel místní ztráty vtokem do propustku

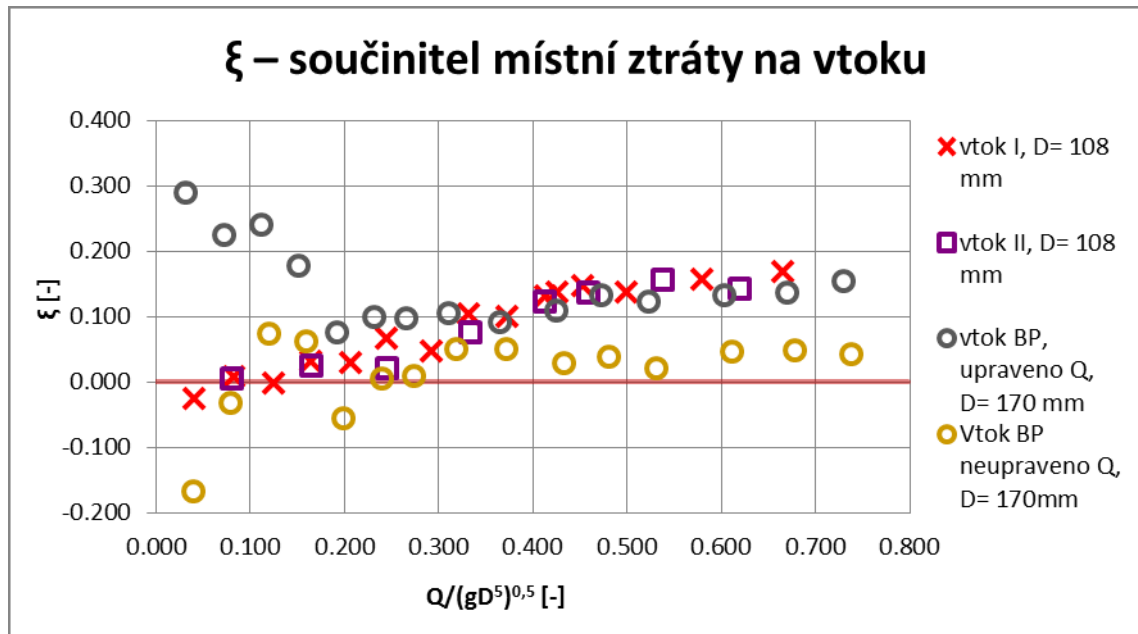
Součinitel místní ztráty na vtoku ξ lze jednoduše vyjádřit z rovnice 2. 6. Místní ztráta na vtoku je jeden ze členů Bernoulliho rovnice (rovnice 2. 5) definované pro profil před propustkem a profil zúžené hloubky. Vyjádřením místní ztráty na vtoku tedy dostaneme Bernoulliho rovnici ve tvaru:

$$Z_m = \xi \cdot \frac{v_c^2}{2 \cdot g} = i_0 \cdot L_{AB} + y_h + \frac{\alpha \cdot v_h^2}{2 \cdot g} - y_c - \frac{\alpha \cdot v_c^2}{2 \cdot g} \quad (6. 1)$$

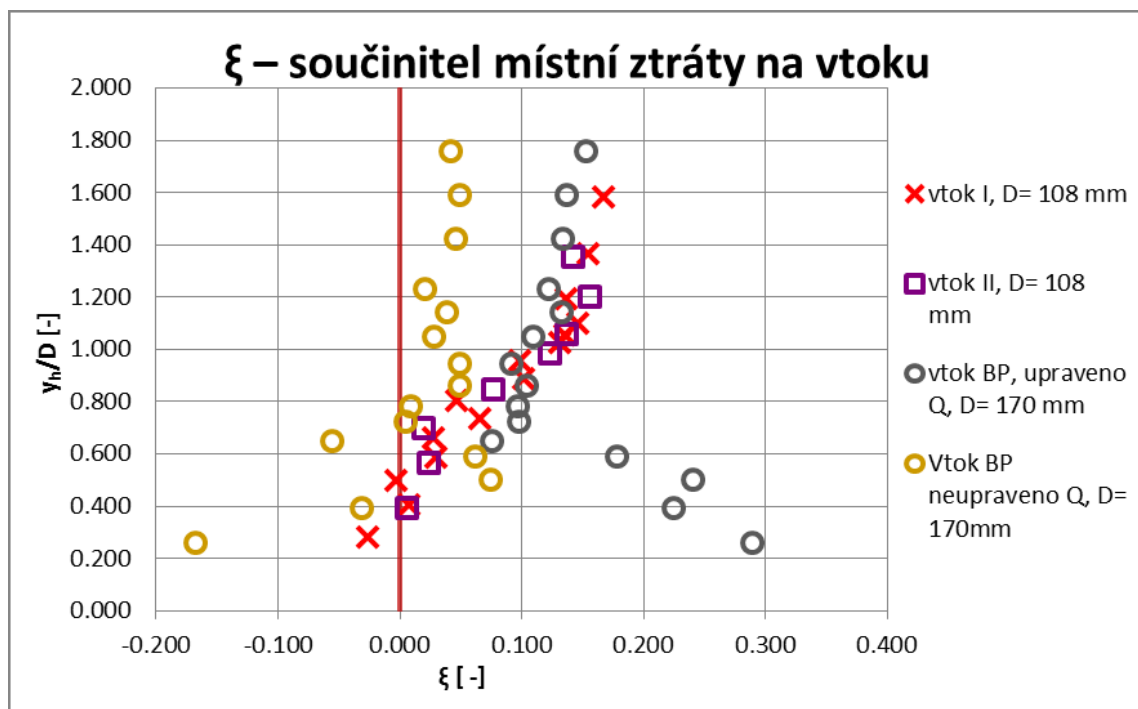
Podle takto upravené Bernoulliho rovnice byl součinitel ξ určen. Nejdříve byla spočítána ztráta energie na vtoku do propustku v cm a tato ztráta byla následně podělena rychlostní výškou pro profil zúžené hloubky a výsledkem byl součinitel ξ . Hodnota Coriolisova čísla α byla brána jako $\alpha = 1,0$.



Protože data pro nalezení zúžené hloubky byla měřena jen pro vtoky I a II, tak i součinitel ξ je pro proudění o volné hladině uvnitř propustku vyhodnocen pouze pro tyto vtoky a dále jsou použita i data z bakalářské práce. Data z bakalářské práce jsou ovšem ovlivněna pravděpodobnou netěsností šoupěte v hydraulickém systému žlabu B50. Proto byl změřený průtok pro data z bakalářské práce upraven o odhadnutou průměrnou velikost průsaku $Q = 0,3$ l/s. Tato změna ovšem (jak bude vidět níže) má na součinitel ξ velký vliv, obzvláště u malých průtocích. Proto budou používána i data bez úpravy průtoku, aby bylo možné sledovat vliv změny průtoku na hodnoty ξ .



Obr. 71 Výsledné hodnoty součinitele místní ztráty na vtoku ξ pro proudění o volné hladině uvnitř propustku; v grafu jsou použita i data určená v bakalářské práci a to jak pro původně změřený průtok, tak i pro průtok upravený o předpokládaný průsak netěsnícím šoupětem; červená čára označuje osu x



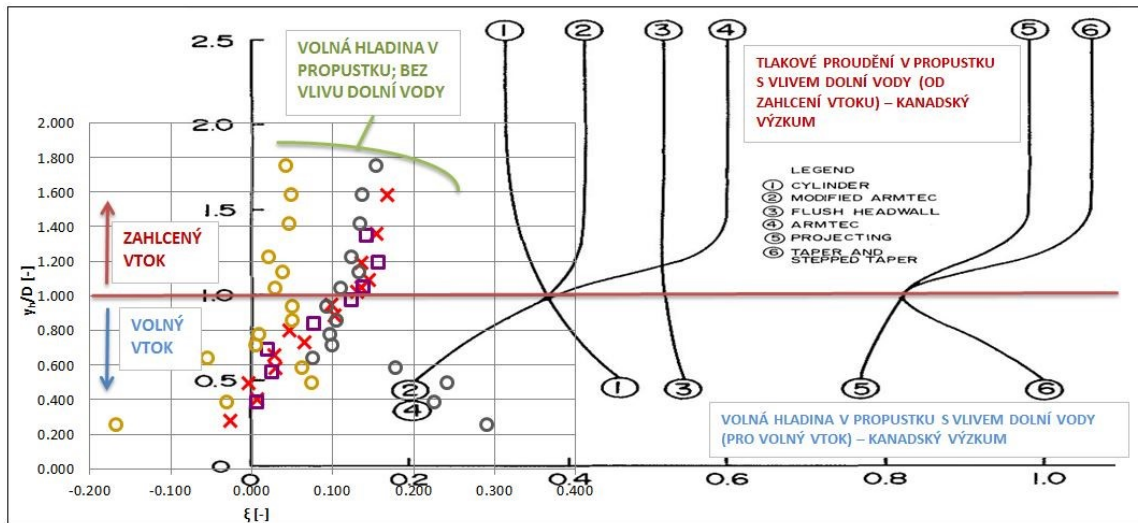
Obr. 72 Experimentem určené hodnoty součinitele místní ztráty ξ ; červená čára označuje osu y



Jak ukazuje vyhodnocení velikosti součinitele místní ztráty ξ pro vtoky I, II a BP (viz Obr. 71 a Obr. 72), tak hodnoty součinitele ξ nabývají poměrně nízkých hodnot. Na první pohled je nápadná výrazná odlišnost mezi hodnotami naměřenými u geometrie vtoku z bakalářské práce, kde je nejistota správně určeného průtoku. Průměrný rozdíl takto vyhodnoceného součinitele je desetinásobný, neboť v jednom případě je průměr všech hodnot 0,014 (Q neupraveno) a ve 0,146 (Q upraveno). Největší chyba (jak bylo uvedeno v bakalářské práci) je pro nejnižší průtoky, kdy i malá chyba měření způsobuje velkou změnu hodnoty součinitele ξ . Proto některé vyhodnocené hodnoty součinitele ξ jsou záporné, ačkoliv je to fyzikálně nemožné. Jednoduše je pro malé průtoky ztráta vtokem zcela zanedbatelná a chyby měření způsobí, že hodnoty mohou spadnout do záporných hodnot. Tato problematika měření je detailně popsána v článku „*Culvert inlet efficiency*“ od autorů Smith a Oak. Zde je uvedeno, že chyba určení průtoku o 1 % způsobí chybu 4 – 8 % v součiniteli ξ [17]. Rozdíl mezi neupraveným a upraveným průtokem u měření z bakalářské práce je u nejnižšího průtoku 20 %. Proto by se mělo brát vyhodnocení z dat z bakalářské práce pouze jako orientační, neboť jeho nejistota je příliš velká.

Při vyhodnocení měření vtoků I a II se u vtoku I při nízkých průtocích opět objevují záporné hodnoty součinitele ξ , které jsou velmi blízko nuly. S navyšujícím se průtokem je se hodnoty součinitele ξ postupně navyšují, až se takřka ustálí na hodnotách okolo $\xi = 0,15$. Průběh hodnot pro vtok II je velmi podobný, přičemž se neobjevují žádné záporné hodnoty. Konstantní trend hodnot se ukazuje opět ke konci a tyto hodnoty jsou průměrně $\xi = 0,145$. Vzhledem k podobnosti a malému rozptylu dat začátku řady hodnoty pro vtoky I a II se jeví, že tato měření byla přesnější (pravděpodobně díky přístroji ELINKA-001, větším zkušenostem pozorovatele a větší jistotě měření průtoků) než u předcházející bakalářské práce.

Hodnoty součinitele ξ získané výzkumem byly srovnávány s hodnotami z dostupné literatury a metodiky. Jako první bylo provedeno ilustrativní srovnání naměřených bodových hodnot součinitele ξ s křivkami průběhu ξ z grafu z kanadského článku „*Culvert inlet efficiency*“. Toto srovnání je vyhotoveno na Obr. 73. V tomto srovnání jsou do sebe proloženy grafy z Obr. 72 a Obr. 27. Na Obr. 73 můžeme pozorovat, že hodnoty součinitele ξ pro vtoky měřené v rámci experimentu jsou nižší než hodnoty, jichž dosahují křivky z grafu kanadského výzkumu. Přitom průběh vyhodnocených hodnot ξ je podobný jako u křivek průběhu součinitele ξ pro některé vtoky z grafu kanadského výzkumu. Ovšem rozdíl v hodnotách ξ je očividně poměrně veliký, neboť experimentem určené hodnoty dosahují maximálně hodnoty lehce přes $\xi = 0,15$, kdežto hodnoty součinitele ξ podle kanadského jsou nejméně $\xi = 0,2$, ale pro některé vtoky dosahují hodnoty ξ až 1,0. Určitý rozdíl je jistě způsoben tím, že geometrie vtoků z kanadského výzkumu nejsou zcela shodné s geometriemi z tohoto výzkumu, neboť všechny geometrie vtoků kanadského výzkumu jsou umístěny ve svahu a tudíž nemají kolmou čelní stěnu jako většina vtoků tohoto výzkumu. Přesto jeden vtok z kanadského výzkumu je velmi podobný vyhodnocovanému vtoku I, protože má jakousi obdobu čelní stěny nasazenou na předsazený propustek a je zde tedy podoba se svislou čelní stěnou. Tento vtok z kanadského výzkumu je v grafu na Obr. 73 reprezentován křivkou č. 3 a je vidět, že pro křivku 3 nabývá součinitel ξ hodnot okolo 0,5, což je mnohem vyšší hodnota, než ukazuje autorem provedený výzkum. Proto rozdílnost geometrie není hlavním původcem velkého rozdílu hodnot ξ .



Obr. 73 Ilustrativní srovnání určeného průběhu hodnot součinitele místní ztráty ξ v místě zúžené hloubky a křivek průběhu hodnot součinitele ξ , které byly výsledkem kanadského výzkumu popsaného v článku „Culvert inlet efficiency“ (viz str. 32). Hodnoty součinitele ξ z kanadského výzkumu se odlišují tím, že nevztahují součinitel k profilu zúžené hloubky, ale zahrnují do něj i ztráty vznikající za tímto profilem (např. rozšiřování zúženého proudění).
Pozn.: přiřazení geometrií vtoků do propustku kanadského výzkumu vtoků je patrné na Obr. 25.

Rozdíl mezi hodnotami součinitele ξ z tohoto a kanadského výzkumu není způsobem odlišnostmi v geometrii vtoků, ale odlišností přístupů ve vyhodnocení součinitele ξ , dále odlišnostmi způsobu měření a odlišnostmi v režimech proudění. Proto je nutné brát srovnání na Obr. 73 pouze jako ilustrativní. V tomto srovnání je ovšem zřetelně vidět, jak velký mají tyto odlišnosti vliv. Příčiny rozdílů budou rozebrány dále.

Jedním rozdílem, který způsobuje vyšší hodnoty ξ u křivek vytvořených kanadskými autory Smithem a Oakem, je rozdílná metodika měření. Kanadčané měřili proudění s vlivem dolní vody (tzv. „outlet control“); proudění v jejich případě přechází postupně z režimu o volné hladině do tlakového režimu v propustku. V případě našeho měření bylo proudění i po zahlcení vtoků propustku vždy s volnou hladinou a výtok z propustku byl vždy volný, bez jakéhokoliv vlivu dolní vody. Tento rozdíl je také důvodem, proč musí být bráno srovnání z Obr. 73 jako ilustrativní, protože srovnávané režimy proudění si zcela neodpovídají. Zároveň se ukazuje, že užívání stejných hodnot součinitele ξ pro režim proudění s volnou hladinou i tlakový režim v propustku nevede k exaktnímu řešení, ačkoliv je to mnohdy běžná praxe.

Nejvýznamnějším rozdílem v řešení velikosti hodnoty součinitele ξ v tomto výzkumu oproti kanadskému nebo i dalším výzkumům spočívá ve vztahování součinitele ξ k profilu zúžené hloubky (vyjádřením ξ z rovnice 6.1). To bylo možné díky profilu hladiny uvnitř propustku. Tato měření podle nalezených informací nikdo jiný dříve neprováděl. Vztahování součinitele ξ k profilu zúžené hloubky jasně definuje místní ztrátu na vtoku pro proudění o volné hladině v propustku s volným nebo zahlceným vtokem bez vlivu dolní vody. Ostatní výzkumy (např. kanadský výzkum) zahrnují obecně do místní ztráty vtokem i ztrátu rozšířením zúženého proudění, která se projevuje hned za zúženou hloubkou. Ztráta rozšířením zúženého proudění (Bordova ztráta) má mnohem větší velikost, než je reálná ztráta vtokem zúžením proudu, jak bylo dokázáno v bakalářské práci a potvrzeno nalezením článku „Hydraulic Data Comparison of Concrete and Corrugated Metal Culvert Pipes“ (viz str. 26).



Důvodem, proč jiné výzkumy zahrnují do hodnoty ξ ztrátu rozšířením proudění nastávající za zúženou hloubkou, je, že jejich měření hladin jsou prováděna před vtokem do propustku a na výtoku z něj. Ztráta je následně dopočítávána z rozdílu hladin. Tento přístup je vhodný v případě tlakového režimu proudění nebo zatopení zúžené hloubky dolní vodou při proudění s volnou hladinou, kdy nelze profil zúžené hloubky nalézt. V případě proudění s volnou hladinou v propustku bez vlivu dolní vody ovšem není správný. Správné řešení je vypočítat místní ztrátu vtokem k profilu zúžené hloubky a od profilu zúžené hloubky počítat standartní průběh hladin při nerovnoměrném proudění. Proto by bylo vhodné používat pro režimy proudění s volnou hladinou bez vlivu dolní odlišné hodnoty součinitele místní ztráty na vtoku ξ než pro tlakové režimy proudění a režimy proudění se zatopenou zúženou hloubkou.

Aplikace přístupu odlišení součinitele ξ pro režimy s volnou hladinou a režimy s tlakovým prouděním přinese přesnější výpočet místní ztráty na vtoku, což je důležité pro správný návrh propustku. Přístup rozlišení součinitele ξ pro proudění o volné hladině a tlakový režim proudění je kupříkladu použit už v práci „*Hydraulic Data Comparison of Concrete and Corrugated Metal Culvert Pipes*“ (1950), kde jsou stanoveny zvlášť hodnoty součinitele ξ pro proudění s volnou hladinou a zvlášť pro tlakové proudění. Tedy se ukazuje, že tento přístup není úplně nový ani pro praxi příliš komplikovaný.

Typ vtoku	Experiment		Literatura						
	Průměr ξ [-]	Výběrový průměr ξ [-]	ξ TP 204 [-]	ξ článek USA** [-]		ξ UK, příručka*** [-]		ξ USA, příručka**** [-]	
				beton	vln. plech	beton	vln. plech	beton	vln. plech
BP Q= ± 0.0	0.01	0.04	0.40–0.50	0.10	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50
BP Q= + 0.3	0.15	0.12							
I	0.08	0.13							
II	0.09	0.13	0.10–0.15*	–	–	–	–	–	0.20*

* srovnáno s podobným vtokem

Tab. 11 Srovnání hodnot součinitele ξ (vztaženého k profilu zúžené hloubky) získaných z experimentů s hodnotami z dostupné literatury; pro vtok BP jsou uvedeny hodnoty pro hodnoty s neupraveným a upraveným průtokem

Literatura: ***Hydraulic Data Comparison of Concrete and Corrugated Metal Culvert Pipes* [19], *** Culvert design operation guide [5], **** *Hydraulic Design of Highway Culverts - HDS-5 - Third Edition* [4]

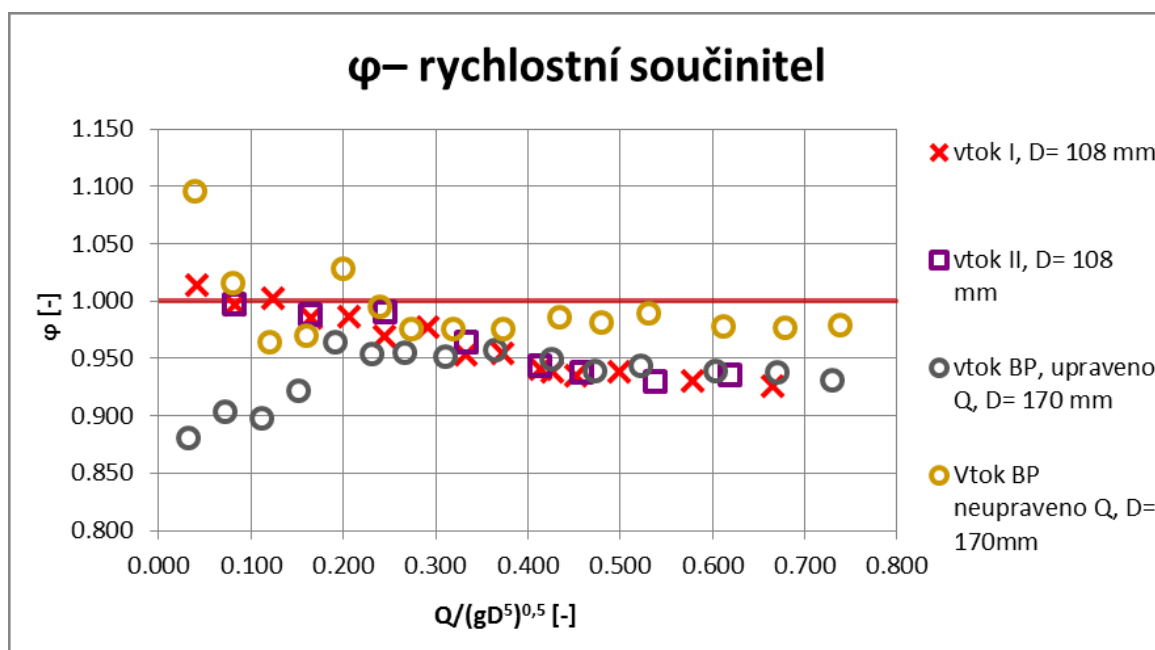
Srovnání hodnot ξ získaných z provedených experimentů a hodnot z dostupné literatury je provedeno v Tab. 11. V tabulce jsou uvedeny experimentem získané průměrné hodnoty součinitele ξ vztaženého k profilu zúžené hloubky a pak také průměr z vybraných hodnot součinitele ξ , kdy jako vybrané hodnoty byly uvažovány hodnoty po ustálení průběhu vyhodnocených hodnot (nebyly tedy pro tento průměr brány v úvahu hodnoty pro nejnižší průtoky, kdy má chyba měření největší vliv a hodnoty součinitele ξ jsou nejnižší). Jak vyhodnocení ukazuje, tak pro vtok I je hodnota součinitele ξ o něco málo vyšší než 0,1. A velmi podobné hodnoty vykazuje i vtok II. Je zajímavé, že na rozdíl od zahraniční literatury, naše literatura nerozlišuje pro hodnoty součinitele ξ typ materiálu, z něhož je propustek postaven. Zato tabulky zahraniční literatury takřka vždy z materiálů rozlišují minimálně beton a vlnitý plech. Rozdíl v hodnotách ξ pro tyto materiály je někdy podstatný. Vtok II má bohužel trochu odlišnou geometrii od vtoků nalezitelných v tabulkách a je tedy srovnáván s pouze podobnými typy vtoků. Ve srovnání je vidět, že až na hodnoty z článku „*Hydraulic Data Comparison of Concrete and Corrugated Metal Culvert Pipes*“, kde se hodnoty z provedených experimentů dobře shodují s hodnotami pro betonový propustek, je mezi hodnotami z výzkumu ($\xi \approx 0,1$) a z literatury ($\xi \approx 0,5$) pro



vtok I velký rozdíl. Tento rozdíl je způsoben výše popsaným problémem, když naše i zahraniční literatura započítává do ztráty na vtoku i ztrátu náhlým rozšířením proudění (Bordova ztráta) za zúženou hloubkou. Že tomu tak je, bylo dokázáno v bakalářské práci, kde byla ztráta rozšířením proudění za zúženou hloubkou počítána, a výsledný součet se ztrátou zúžením se blížil k hodnotám udávaným literaturou. Tudiž tímto výzkumem nově získané výsledky potvrzují, že v bakalářské práci byly hodnoty součinitele ξ určeny správně a že pro proudění o volné hladině uvnitř propustku je součinitel ztráty na vtoku nižší než v literatuře, protože je součinitel ξ definován k místu zúžené hloubky.

6.1.3.3 φ – rychlostní součinitel

Rychlostní součinitel φ přímo souvisí se součinitelem místní ztráty ξ . Můžeme jej spočítat podle rovnice 2. 7. Vyhodnocení hodnot součinitele φ z výzkumu je vyhotoveno na Obr. 74. Jako u vyhodnocení součinitele ξ , tak i zde jsou vyneseny hodnoty z bakalářské práce s upraveným průtokem, tak i s původně naměřenými hodnotami.



Obr. 74 Vyhodnocení rychlostního součinitele φ ; červená čára označuje hraniční hodnotu 1,0

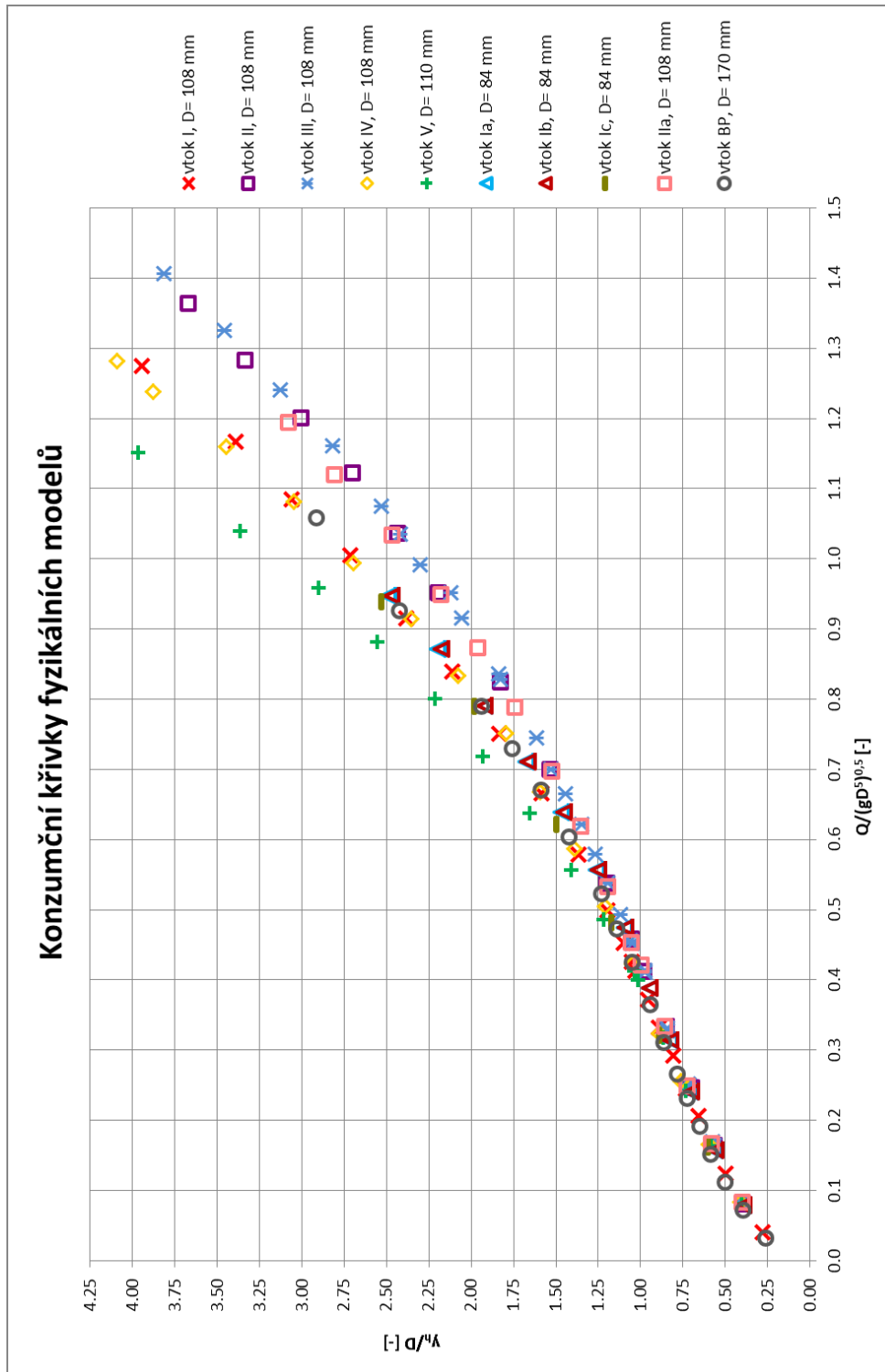
V případech, kdy součinitel φ přesahuje hodnotu 1,0, což samozřejmě není možné, se jedná o vliv chyb měření (viz předcházející stránky).

6.1.4 Konzumční křivky modelů

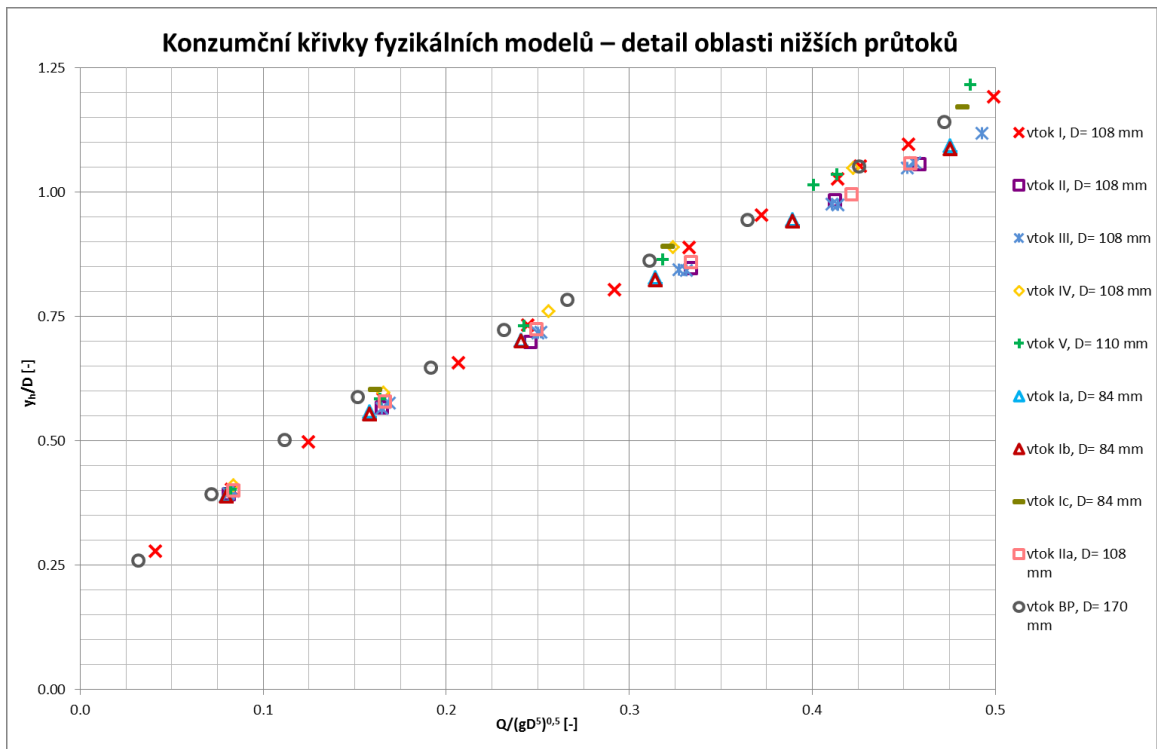
Pro každý modelovaný vtok byla vytvořena bezrozměrná konzumční křivka – závislost y_r/D na $Q/(gD^5)^{0.5}$ (viz kapitola 3.4 zabývající se podobností hydrodynamických jevů). V angličtině lze stejný graf nalézt pod názvem „inlet control curve“ nebo „head discharge curves“. Nalezená anglická literatura nepracuje se zcela bezrozměrnými čísly; většinou je jako konstanta vynecháno gravitační zrychlení g a výraz $Q/(gD^5)^{0.5}$ pak přejde na tvar $Q/D^{2.5}$. Případně je použito i srovnání s plnou plochou daného příčného profilu S_D při užití tvaru $Q/S_D \cdot D^{0.5}$. Výhodou bezrozměrné konzumční křivky je, že lze poměrně snadno srovnat mnoho propustků s různými vtoky. Modely, které budou v tomto srovnání mít nejvyšší kapacitu, budou mít zároveň nejlépe tvarovaný vtok a součinitel místní ztráty na



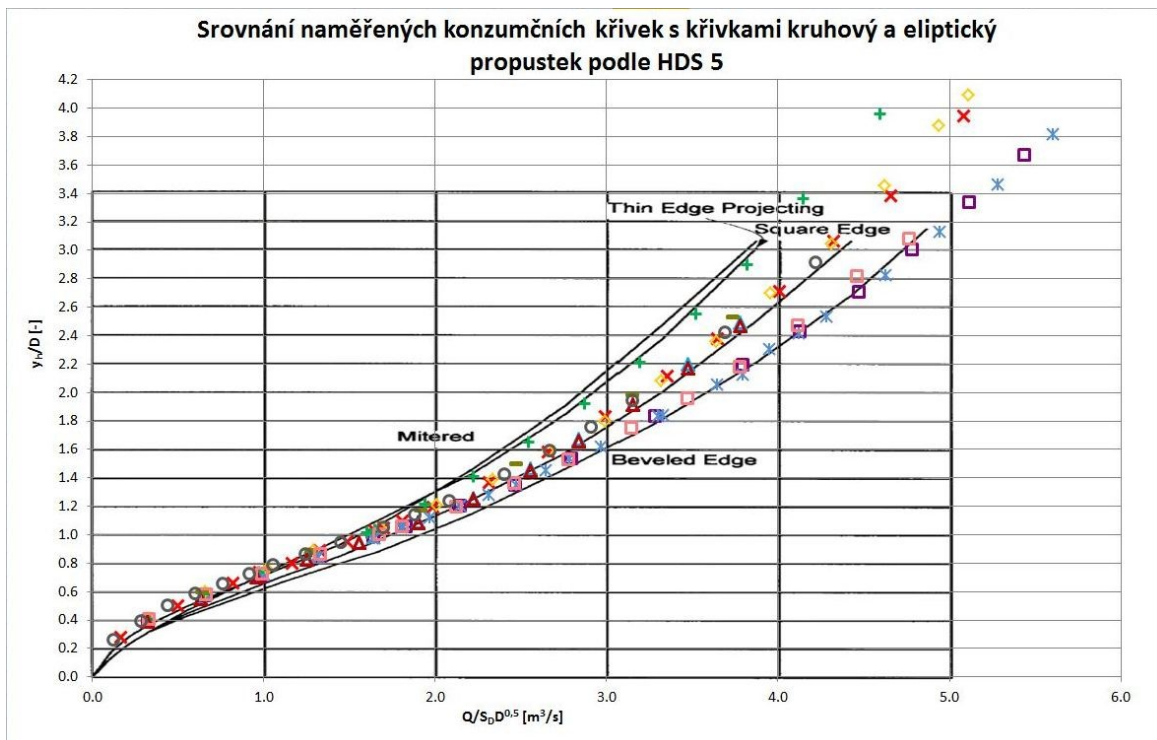
vtoku u nich bude nejmenší. Navíc měření konzumční křivky je časově méně náročné než měření podrobného podélného profilu hladiny před propustkem a v propustku, přičemž přesné vyhodnocení součinitele ξ se bez těchto měření neobejde. Pro konzumční křivku je postačující znát průměrnou ustálenou hladinu pro známý měřený průtok. Tudíž bylo dostačující provést měření několika bodů hladiny před propustkem v ose žlabu pro každý průtok. Vzhledem k tomu, že v následně uvedeném grafu (Obr. 75) jsou přehledně zpracovány všechny měřené modelové geometrie, tak jej lze považovat za jeden nejdůležitějších a nejprehlednějších výsledků této práce.



Obr. 75 Výzkumem naměřené konzumční křivky všech provedených fyzikálních modelů; proudění o volné hladině uvnitř propustku

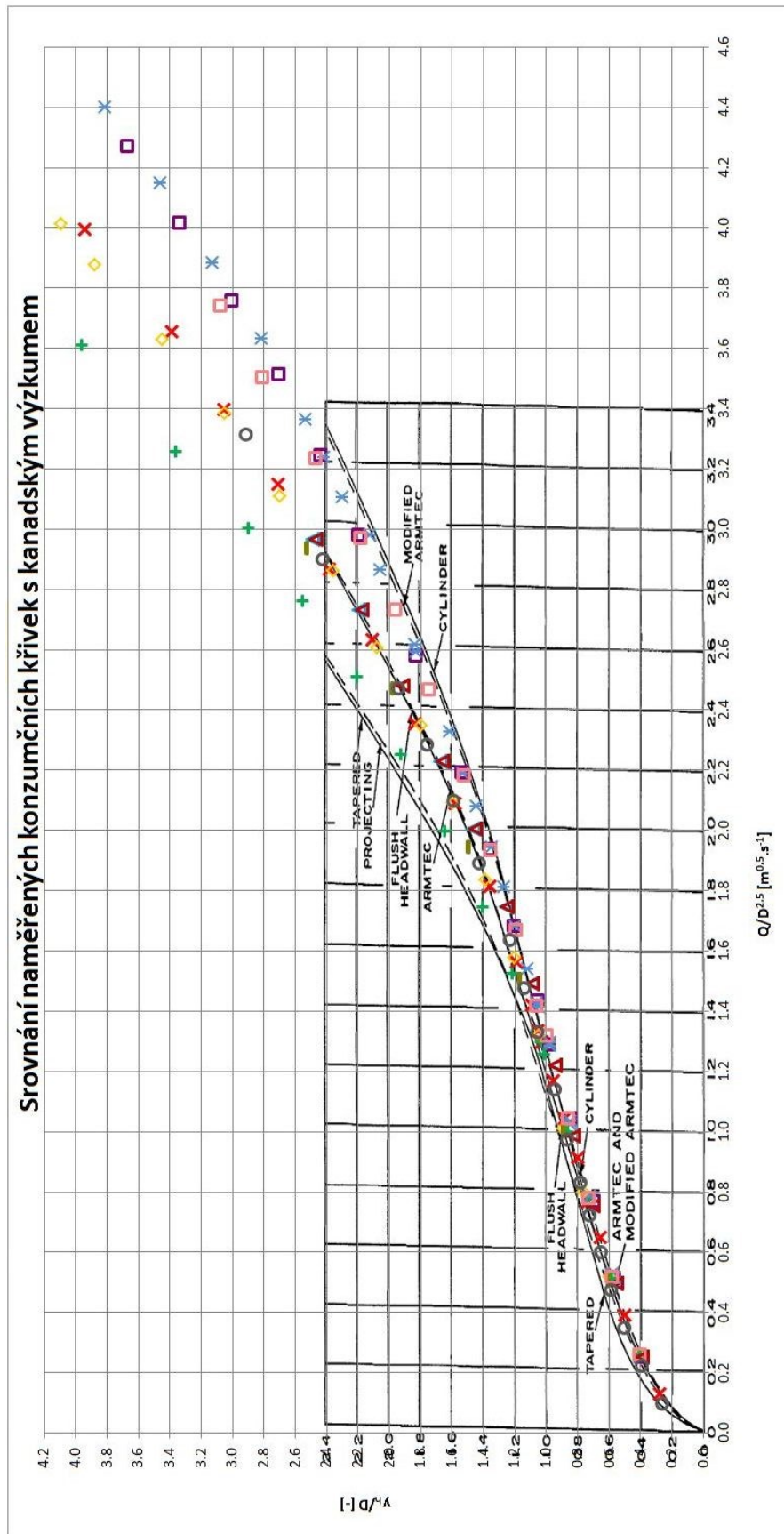


Obr. 76 Detail z grafu na Obr. 75 na oblast nižších průtoků; *k* zahlcení vtoků do modelových propustků dochází až pro body $y_w/D > 1,0$



Obr. 77 Srovnání naměřených konzumčních křivek s konzumčními křivkami z publikace „Hydraulic Design of Highway Culverts - HDS-5 - Third Edition“, kde jsou konzumční křivky sestaveny pro kruhové a eliptický příčný profil propustku z vlnitého plechu.

Předklad typů vtoků v angličtině: Mitered – šikmé čelo propustku, Beveled Edge – zkosená hrana, Square Edge – ostrá hrana, The Edge Projecting – předsazený propustek; legenda vtoků z tohoto výzkumu je k nalezení u předcházejících obrázků.



Obr. 78 Srovnání naměřených konzumních křivek s konzumními křivkami z článku „Culvert inlet efficiency“; graf z kanadského článku není bohužel dokonale oskenován a proto ve svislé ose poněkud „ubíhá“ doprava. Předklad typů vtoků z angličtiny: Tapered – šikmé čelo propustku, Flush Headwall – vtok s čelní svislou deskou, Cylinder – s kruhovou předsaženou objímkou, Armtec – obchodní název kanadské firmy (modified – upravený), Projecting – předsažený vtok; legenda vtoků z tohoto výzkumu je k nalezení u předcházejících obrázků



Z naměřených konzumčních křivek na Obr. 75 můžeme určit, který typ vtoku je nejkapacitnější. Největší rozdíly v kapacitě vtoků můžeme pozorovat pro nejvyšší průtoky a tedy i nejvyšší výškové úrovně hladin před propustkem. Při těchto nejvyšších průtocích je patrné, že vtok V se šikmým čelem vychází jednoznačně nejméně kapacitní. Naopak jako nejkapacitnější se jeví vtoky se zkosením vstupní hrany II a III. V případě vtoku III je tím pádem vidět, že ani předsazení tohoto vtoku nijak negativně neovlivnilo jeho celkovou kapacitu. Dále si lze povšimnout, že ačkoliv varianta vtoku II, tedy vtok IIa, je stavebně jednodušší, protože délka zkosení je takřka třetinová oproti vtoku II, tak nedochází k významnému snížení kapacity propustku. Ostatní vtoky (I a varianty, IV, BP) jsou mezi přibližně přesně mezi vtoky V a III.

Poněkud překvapivý se zdá výsledek, že předsazený vtok do propustku (vtok IV), vychází přibližně stejně jako vtok, který lícuje se svislou čelní stěnou (vtok I a BP). A ještě více překvapivý se může tento výsledek zdát, pokud se podíváme na hodnoty součinitele místní ztráty na vtoku ξ , které jsou u nás používány. Běžně se uvádí, že vtok, který lícuje s čelní stěnou s ostrou vstupní hranou má součinitel $\xi = 0,4 - 0,5$; vtok se šikmým čelem má součinitel $\xi = 0,7 - 0,8$; vtok předsazený má součinitel $\xi = 0,8 - 0,9$ [3; 9]. Z těchto hodnot je jasné, že podle naší metodiky by měl být vtok se svislou čelní stěnou výrazně více kapacitní než vtok předsazený nebo se šikmým čelem. Navíc podle hodnot v naší metodice je předsazený vtok jasně demonstrován jako nejhorší typ vtoku. Ovšem výsledky výzkumu ukazují, že je tomu jinak. Pokud se podíváme na kapacitu při nejvyšších průtocích, tak jasně vidíme, co bylo už výše napsáno a to že vtok se šikmým čelem vychází nejhůře, vychází hůře než předsazený propustek. Přitom propustek se šikmým čelem je velmi často používaný typ. V situace, kdy jsou propustky vedle sebe (vtoky Ia a Ib), podle pozorování nehraje skoro žádnou roli dělicí deska mezi propustky. Obě varianty se takřka shodují.

Zahlcení vtoku do propustku se projeví na konzumční křivce tak, že křivka změní svůj dosavadní průběh; vznikne inflexní bod. Tuto změnu dobře demonstrovuje Obr. 16 na straně 13. Na tomto obrázku je názorně vidět změna charakteru proudění – z problému podobnému přepadu nebo zúžení proudění o volné hladině dochází k postupné transformaci na problém obdobný řešení výtoku otvorem. Na naměřených konzumčních křivkách jsou inflexní body a změna trendu křivky dobře patrné. Kdy nastává zahlcení vtoku bylo podrobně popsáno v kapitole 6.1.3 β – součinitel zatopení.

Podstatné je také podívat se na konzumční křivky při nižších průtocích před zahlcením propustku. Při průtocích menších průtocích (nedojde k zahlcení vtoku), budete totiž propustek fungovat většinu doby své funkce. Aby byla patrná část grafu, před zahlcením vtoku do propustku, tak byl vytvořen Obr. 76, který je výřezem Obr. 75. Na detailu konzumčních křivek v oblasti nižších průtoků můžeme opět pozorovat, že nejkapacitnější jsou vtoky II, IIa a III. Zajímavé je, že situace, kdy jsou propustky vedle sebe, se také jeví jako vhodná a ukazuje se, že překvapivě dochází k lepšímu chování, než pokud by byl propustek samostatně. Toto pozorování, by ovšem bylo vhodné ještě ověřit. Opět se potvrzuje, že mezi variantami vtoku Ia a Ib (bez a s dělicí deskou mezi propustky) je rozdíl minimální a tedy nemá smysl jakoukoliv dělicí přepážku u takto vzdálených propustků budovat. U nižších průtoků není nejméně kapacitní vtok V (šikmé čelo propustku), ale vtoky I (svislá čelní stěna, ostrý vtok) a IV (předsazený propustek).

Aby bylo výše napsané lépe představitelné a bylo názorně demonstrováno, jak vychází výpočty podle výzkumem určených konzumčních křivek, tak byl do Tab. 12 vypracován ukázkový příklad



s propustkem o průměru $D= 1 \text{ m}$. Naměřenými body konzumčních křivek byly jednotlivě proloženy polynomičké křivky šestého řádu, přičemž korelační koeficient se přibližoval k hodnotě 1,0 (průměrně hodnota korelačního koeficientu byla 0,999). Pro proloženou polynomičkou křivku byla určena její rovnice a podle této rovnice následně probíhal výpočet.

$Q/(gD^5)^{0.5} = 0.05 -$	$Q/(gD^5)^{0.5} = 0.10 -$	$Q/(gD^5)^{0.5} = 0.25 -$	$Q/(gD^5)^{0.5} = 0.50 -$	$Q/(gD^5)^{0.5} = 1.00 -$
$Q = 0.16 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 0.31 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 0.78 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 1.57 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 3.13 \text{ m}^3/\text{s}$

Typ vtoku	y_h/D [-]	y_h [m]	Typ vtoku	y_h/D [-]	y_h [m]	Typ vtoku	y_h/D [-]	y_h [m]	Typ vtoku	y_h/D [-]	y_h [m]	Typ vtoku	y_h/D [-]	y_h [m]
I	0.27	0.27	I	0.44	0.44	I	0.75	0.75	I	1.19	1.19	I	2.69	2.69
II	0.25	0.25	II	0.42	0.42	II	0.73	0.73	II	1.12	1.12	II	2.32	2.32
III	0.25	0.25	III	0.42	0.42	III	0.73	0.73	III	1.12	1.12	III	2.29	2.29
IV	0.26	0.26	IV	0.44	0.44	IV	0.76	0.76	IV	1.19	1.19	IV	2.70	2.70
V	0.27	0.27	V	0.45	0.45	V	0.74	0.74	V	1.25	1.25	V	3.13	3.13
Ia	0.26	0.26	Ia	0.44	0.44	Ia	0.72	0.72	Ia	1.14	1.14	Ia	2.67	2.67
Ib	0.26	0.26	Ib	0.43	0.43	Ib	0.72	0.72	Ib	1.14	1.14	Ib	2.64	2.64
Ic	0.25	0.25	Ic	0.43	0.43	Ic	0.78	0.78	Ic	1.21	1.21	Ic	2.86	2.86
Ila	0.26	0.26	Ila	0.44	0.44	Ila	0.73	0.73	Ila	1.13	1.13	Ila	2.36	2.36
BP	0.30	0.30	BP	0.48	0.48	BP	0.75	0.75	BP	1.20	1.20	BP	2.72	2.72

Tab. 12 Prezentační příklad výsledků výpočtu podle naměřených konzumčních křivek - propustek o průměru $D= 1,0 \text{ m}$ zatěžován různými průtoky; výsledkem výška hladiny před propustkem; pomocí barevných škal zvýrazněno maximum (červeně = nejhorší výsledek) a minimum (zeleně = nejlepší výsledek) a hodnoty mezi těmito extrémy; zvýraznění bylo provedeno také pomocí barevných pruhů

Jak je z Tab. 12 patrné, tak při všech průtocích vychází nejlépe vtok II, vtok Ila a vtok III. Vtok V je za nižších průtoků „průměrný“, ovšem po zahlcení vtoku se stává jednoznačně nejhorším vtokem. Předsazený propustek vychází v podstatě stále velmi shodně s vtokem I (popř. jeho variantami Ia, Ib, Ic). Tyto vtoky jsou horší za nižších průtoků, ovšem s navyšujícím se průtokem se drží stále někde uprostřed mezi vtoky II a V. Jak se ukazuje, tak šířka koryta před propustkem (srovnání vtoků I, Ic a BP) nemá zásadní vliv, neboť tyto výsledné hodnoty výšky hladiny před propustkem jsou si velmi podobné.

6.1.4.1 Popis srovnání výzkumu s jinými

Bylo provedeno srovnání s naměřených konzumčních křivek s konzumčními křivkami získanými z jiných výzkumů. Jako první bylo provedeno srovnání s konzumčními křivkami pro propustky z vlnitého plechu. Toto srovnání je vyhotoveno na Obr. 77. Konzumční křivky nejsou zcela bezrozměrné; osa x má jako jednotky m^3/s a osa y je bezrozměrná. Ze srovnání je na první pohled patrné, že se konzumční křivky získané v rámci tohoto výzkumu a konzumční křivky z americké publikace „*Hydraulic Design of Highway Culverts - HDS-5 - Third Edition*“ dobře shodují. Američanům taktéž vychází jako nejhorší vtok se šikmým čelem. Vtok se zkosenou hranou se rovněž jeví jako nejkapacitnější a vtok s ostrou hranou je průměrně kapacitní. Rozdíl je u předsazeného vtoku, který v americké publikaci vychází podobně jako vtok se šikmým čelem. Vychází tedy jako málo kapacitní narozdíl od našeho výzkumu, kde se tato geometrie jeví jako průměrná. Další rozdíl mezi daty z našeho výzkumu a daty z americké publikace spočívá v trochu odlišné kapacitě vtoků za nižších a následně za vyšších průtoků. Při nižších průtocích vycházejí propustky z americké publikace kapacitněji a naopak při vyšších průtocích vycházejí jako trochu méně kapacitní. Jistý rozdíl může jistě způsobit, že americké konzumční křivky byly sestaveny pro vtoky z vlnitého plechu. Bohužel není



dohledatelná metodika měření, která vedla k určení konzumčních křivek v americké publikaci a tudíž nelze vyvozovat další závěry z tohoto srovnání.

Druhé provedené srovnání je zobrazeno na Obr. 78. V tomto srovnání jsou srovnávány konzumční křivky určené tímto výzkumem s konzumčními křivkami publikovanými v kanadském článku „*Culvert inlet efficiency*“. Konzumční křivky opět nejsou úplně bezrozměrné; osa x má jednotku $m^{0.5} \cdot s^{-1}$ a osa y je bezrozměrná. I v tomto srovnání je jasně vidět shoda mezi oběma výzkumy. Jako u přechozího srovnání tak i zde je jediný výrazněji rozdílný výsledek průběh hodnot u geometrie vtoku s předsazeným propustkem (vtok IV). Tento rozdíl by mohl být způsobený tím, že zatímco u našeho výzkumu byl vtok předsazený před svislou stěnu, tak v případě kanadského výzkumu byl vtok umístěn v simulaci náspu. To by znamenalo, že blízké okolí vtoku (tvarování stěny v níž je vtok umístěn) by mohlo mít určitý vliv na kapacitu vtoku. V tomto srovnání konzumčních křivek se naměřené geometrie vtoků jeví jako kapacitnější než podobné geometrie v kanadském článku.

Další možná srovnání by bylo možné provést s konzumčními křivkami z článku „*Tests on Circular-Pipe-Culvert Inlets*“ na str. 29. Zde publikované konzumční křivky jsou ovšem vyneseny jednotlivě pro každou geometrii, což je pro souhrnné srovnávání méně přehledné a proto nebylo srovnání s těmito daty provedeno.



6.2 Tlakové proudění v propustku

Režim tlakového proudění propustku s vlivem dolní vody byl měřen u všech vyhodnocovaných geometrií vtoků, ač některá měření neprováděl autor práce (viz Tab. 7). Hlavním cílem prováděných měření bylo určit součinitel místní ztráty na vtoku ξ . Geometrie výtoku z propustku byla pro všechny typy modelovaných vtoků stejná. Vždy se jednalo o výtok s ostrou hranou zarovnaný se svislou stěnou, v níž byl umístěn. Dno propustku vyústovalo vždy přibližně 5 cm nad dnem hydraulického žlabu. Výzkum je zaměřen na vtok do propustku, takže měnit geometrie výtoku by bylo zbytečné a jejich případná změna by mohla i ovlivnit některé výsledky.

Tlakové proudění uvnitř propustku bylo měřeno za stavů se zahlceným vtokem a zatopeným výtokem. Úroveň dolní vody byla nastavována pomocí uzávěru na konci hydraulického žlabu (viz Obr. 43). Pro každý průtok bylo vždy nastaveno několik jednotlivých úrovní dolní vody, které byly následně měřeny (měřena byla hladina před propustkem, těsně za propustkem a daleko za propustkem).

6.2.1 Pozorované chování proudění

Tlakový režim uvnitř propustku při volném výtoku samovolně vznikl pouze jednou za celý výzkum (jednalo se o vtok I a průtok 15,3 l/s při měření stavu proudění o volné hladině uvnitř propustku). Pokud není výtok z propustku zatopený dolní vodou a podélný sklon propustku není menší než 0,5 % a propustek není významně dlouhý, tak lze předpokládat, že k přechodu proudění z volné hladiny na tlakové proudění uvnitř propustku není zcela běžný, ani pokud hladina před propustkem vystoupá výše než čtyřnásobek průměru propustku.

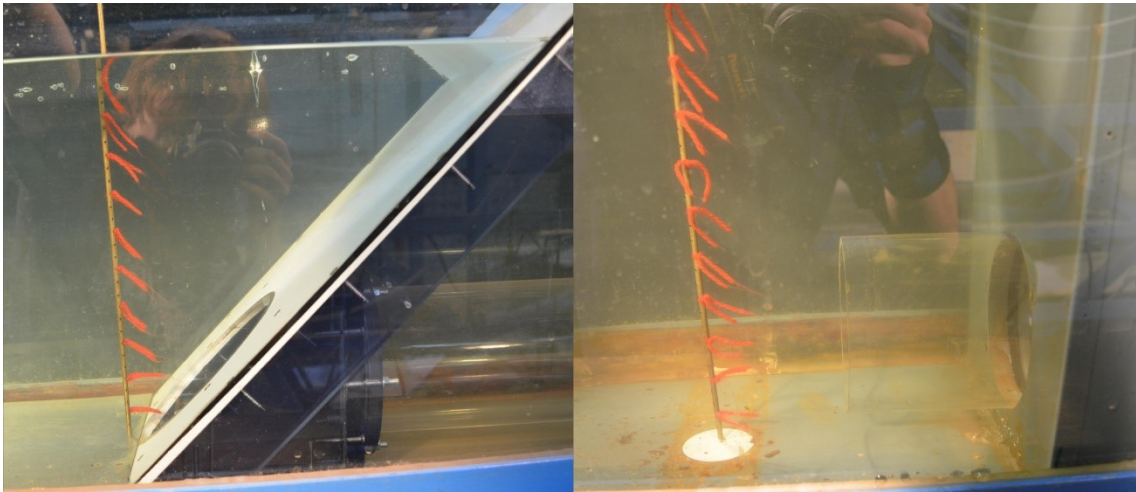
Propustek v režimu tlakového proudění je kapacitnější než při proudění o volné hladině; je-li výtok v obou případech volný. Toto zjištění bylo snadno pozorovatelné. Stačilo při stavu proudění se zahlceným vtokem a volným prouděním uvnitř propustku vyvolat na výtoku na okamžik dostatečnou ztrátu (např. jej na chvíli zčásti zablokovat) a proudění uvnitř propustku přešlo postupně na tlakové proudění (vlna vzduší – kladná zpětná vlna). Po přechodu na tlakový režim proudění ztlačila hladina před propustkem (odhadem byl pokles kolem 20 % výšky hladiny před propustkem). Toto chování potvrzuje i jeden z poznatků (konkrétně poznatek č. 2) z publikace „*The Flow of Water Through Culverts*“ z roku 1926 (viz str. 25).

Hladina před propustkem se chovala podobně jako při proudění s volnou hladinou uvnitř propustku a zahlceným vtokem. Pro nižší průtoky byla hladina klidná, u vyšších průtoků se objevovalo mírné podélné rozvlnění. Při tlakovém proudění není možné vizuálně přímo pozorovat zúžení proudu, jako to bylo možné u proudění s volnou hladinou uvnitř propustku. Aby bylo možné si utvořit jednoduchou představu o proudnicích v okolí vtoku, tak byly vytvořeny fotografie s bavlnkami umístěnými na kovovou tyč. Tyto fotografie jsou zobrazeny na Obr. 79.

U tlakového režimu vznikaly u některých geometrií víry. Nejvíce byly zaznamenány u vtoku IV (předsunutý propustek) a především u vtoku V (šikmé čelo propustku). Víry u vtoku V často zasahovaly až do průtočného profilu propustku a docházelo tedy k přísávání vzduchu. Tento jev lze hodnotit jako nepříznivý. Stejně přehledné vyhodnocení, kdy se víry objevovaly, nelze u tlakového režimu proudění bohužel provést. Důvodem je, že autor práce nebyl přítomen u všech měření

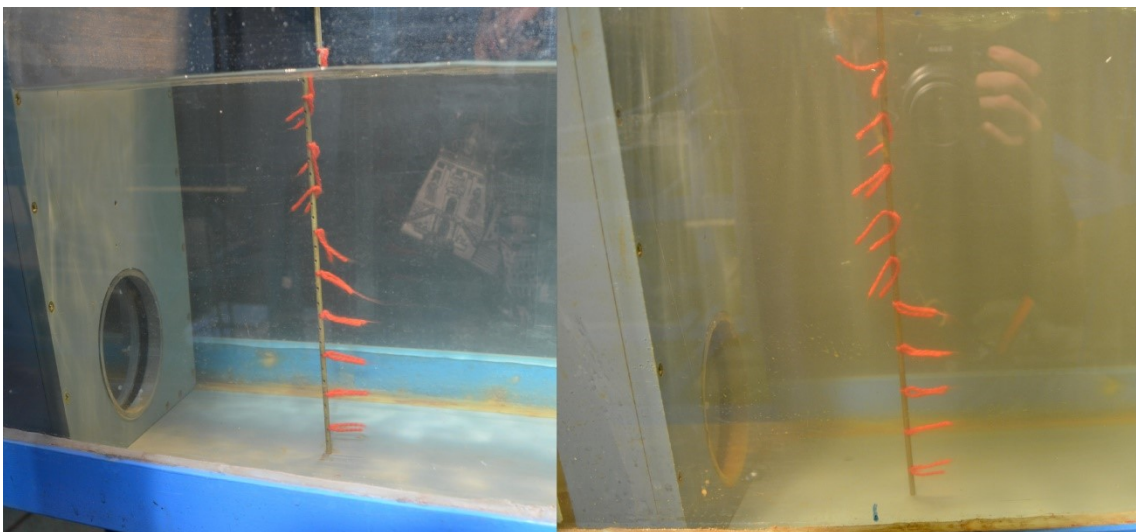


tlakového režimu (viz Tab. 7) a nebyly vedeny dostatečné záznamy tohoto jevu během měření ostatními pozorovateli.



Obr. 79 Vizualizované proudění v ose žlabu před vtokem propustku pomocí tyče s instalovanými bavlnkami; obrázek vlevo – vtok V, $Q = 6,5 \text{ l/s}$, úroveň hladiny za propustkem 30,5 cm; obrázek vpravo – vtok IV, $Q = 6,5 \text{ l/s}$, úroveň hladiny za propustkem 35,0 cm; u obrázku vlevo je patrná tvorba víru

Více rozvlněná byla hladina za výtokem z propustku. Opět záviselo na velikosti průtoku a výšce hladiny za propustkem. U nízkých úrovní hladiny, což byly stavy, kdy byla hladina do jednoho násobku průměru propustku nad horní hranou výtoku z propustku, bylo samozřejmě rozvlnění nejintenzivnější. Pro vyšší úrovně hladiny nebylo již tolik rozvlnění hladiny patrné. U proudění se vytvářely úplavy a voda se místy točila nebo i vracela zpět, tzn. že část proudění měla i opačný směr. Toto chování proudění je názorně demonstrováno na Obr. 80. Za vysokých průtoků a nízkých úrovní dolní vody docházelo k provzdušňování proudění. Proudění bylo při vysokých průtocích vířivé a velmi turbulentní. Tyto jevy jsou demonstrovány na Obr. 81. Hladina těsně za propustkem byla vždy nejnižší, následně její výška záhy o několik centimetrů stoupala.



Obr. 80 Vizualizované proudění v ose žlabu za výtokem z propustku pomocí tyče s instalovanými bavlnkami; obrázek vlevo – vtok V, $Q = 6,5 \text{ l/s}$, úroveň hladiny za propustkem 30,5 cm; obrázek vpravo – vtok IV, $Q = 12,1 \text{ l/s}$, úroveň hladiny za propustkem 37,0 cm



Obr. 81 Víření proudění za výtokem z propustku; vtok IV, $Q = 17,0$ l/s, úroveň hladiny za propustkem 17,0 cm

6.2.2 ξ – součinitel místní ztráty vtokem do propustku

Abychom mohli získat součinitel místní ztráty na vtoku do propustku ξ při tlakovém proudění, tak vyjdeme z Bernoulliho rovnice pro profil před propustkem (horní voda) a pro profil těsně za výtokem z propustku (dolní voda); přičemž obě dvě hladiny máme změřené pomocí hrotového měřítka:

$$y_h + \frac{\alpha \cdot v_h^2}{2 \cdot g} = y_d + \frac{\alpha \cdot v_p^2}{2 \cdot g} + Z_t + Z_m \quad (6.2)$$

kde y_h – úroveň hladiny před propustkem [m],
 α – Coriolisovo číslo [-] (pozn. zde uvažováno jako $\alpha = 1,0$),
 v_h – rychlost proudění před propustkem [m/s],
 g – gravitační zrychlení [m/s^2],
 y_d – hloubka vody za výtokem z propustku [m],
 v_p – rychlost proudění v propustku [m/s],
 Z_t – ztráta třením [m],
 Z_m – místní ztráta [m].

Bernoulliho rovnici následně upravíme tak, že z ní vyjádříme místní ztrátu (rovnice pro výpočet místní ztráty je rovnice 2. 6) a z místní ztráty můžeme určit součinitel místní ztráty ξ . Musíme ovšem znát ztrátu třením, která je určena Darcy-Weischachovo rovnicí za předpokladu rovnoměrného potrubí [10; 31]:

$$Z_t = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\alpha \cdot v_p^2}{2 \cdot g} \quad (6.3)$$

kde λ – součinitel ztráty třením [-],
 L – délka propustku [m],
 D – průměr propustku [m].

Součinitel místní ztráty určíme podle Colebrook-Whiteovy rovnice (platnost pro $Re > 4 \cdot 10^3$) [10; 31]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left[\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{\Delta}{3,71 \cdot D} \right] \quad (6.4)$$

kde Δ – hydraulická drsnost [m].



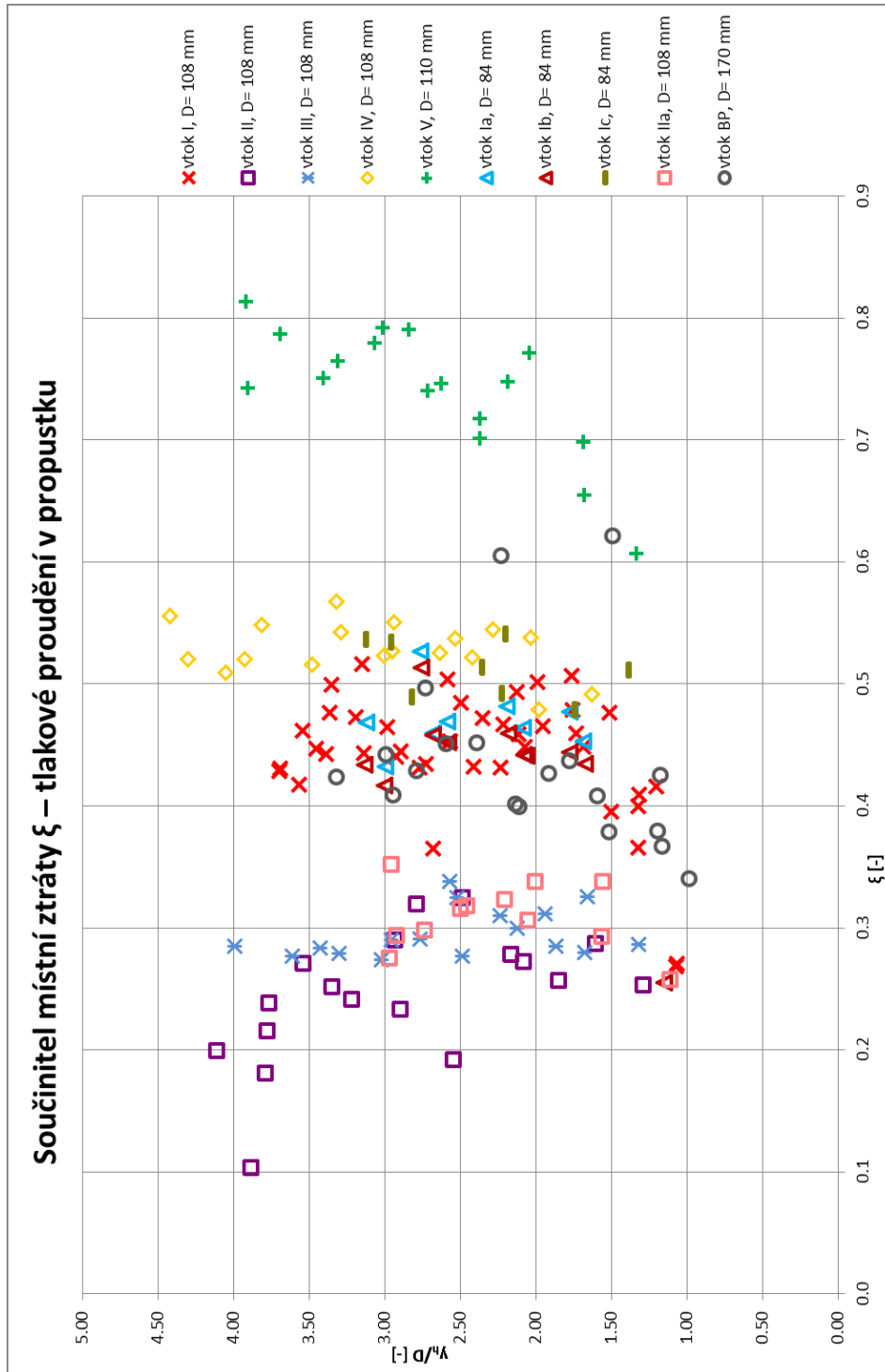
Reynoldsovo číslo určíme z rovnice [10; 31]:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (6.5)$$

kde Re – Reynoldsovo číslo [-],

ν – kinematická viskozita vody [$m^2 \cdot s^{-1}$].

Pro výpočet byla zvolena hydraulická drsnost potrubí z plexiskla jako $\Delta = 0,01 \text{ mm}$. Kinematická viskozita vody ν byla určena pro teplotu vody $16 \text{ }^\circ\text{C}$ jako $\nu = 1,1166 \cdot 10^{-6}$.



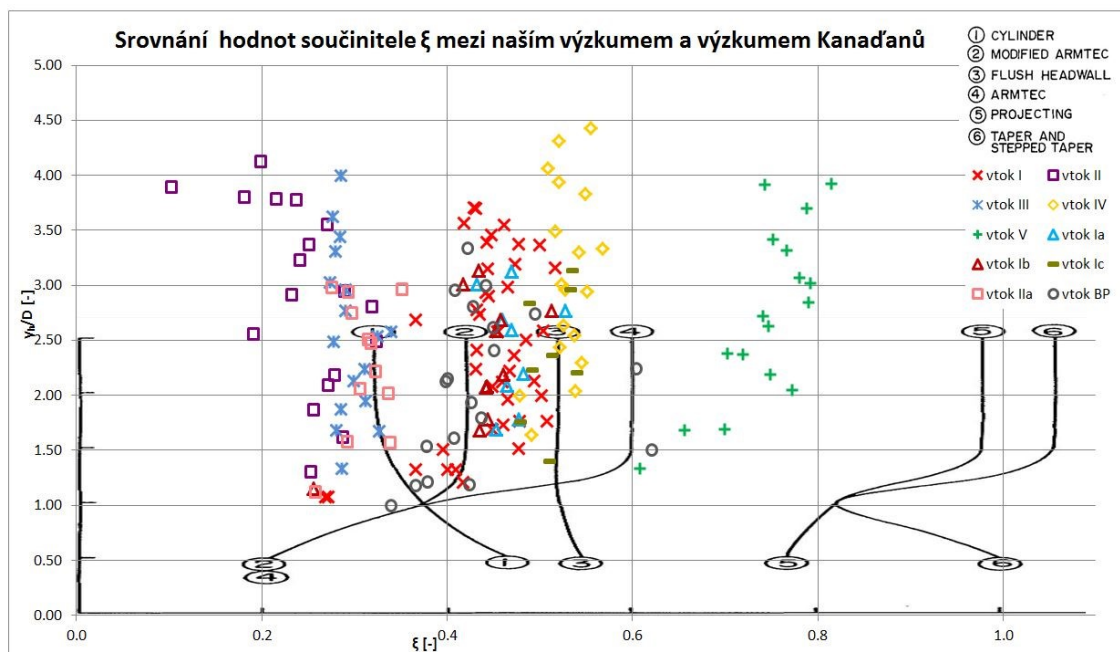
Obr. 82 Hodnoty bezrozměrné hloubky před propustkem v závislosti na velikosti součinitele místní ztráty ξ při tlakovém proudění v propustku



Vypočtené hodnoty součinitele místní ztráty na vtoku do propustku ukazuje graf na Obr. 82. V grafu je vynesena závislost bezrozměrné hloubky před propustkem na velikosti součinitele ξ pro všechny modely. Z grafu můžeme vyčíst, která geometrie vtoku má nejmenší součinitel místní ztráty ξ . Na první pohled je jasné, že nejhorší geometrie vtoku je vtok V (šikmá čelní stěna) a nejlepší je naopak vtok II (zkosený vtok ve svislé čelní stěně). Vtoky I a IV jsou opět „průměrné“, přičemž při tlakovém režimu proudění se ukazuje, že vtok I (ostrohranný vtok ve svislé čelní stěně) má nižší součinitel ξ než vtok IV (předsazený propustek). Ukazuje se tedy, že je určitý rozdíl v hodnotách součinitele ξ pro režim volné hladiny uvnitř propustku nebo naopak pro tlakový režim. Dále je vidět, že vtok III (předsazený zkosený vtok) vychází podobně jako vtok IIa (méně zkosený vtok ve svislé čelní stěně) a oba vycházejí o něco hůře než vtok II. Projevil se určitý drobný rozdíl mezi vtoky Ia a Ib (2 propustky vedle sebe; s anebo bez rozdělovací desky mezi propustky). Rozdělovací deska mezi dvěma propustky má nepatrný pozitivní vliv. Dále se ukazuje, že globálně není výrazný rozdíl mezi vtoky I a BP a tedy se potvrzuje, že mezi velmi širokým obdélníkovým profilem (u vtoku BP je poměr $b/D = 3,06$; b – šířka žlabu, D – průměr propustku) koryta toku před vtokem a užším obdélníkovým profilem (u vtoku I je poměr $b/D = 2,33$; b – šířka žlabu, D – průměr propustku) není markantní rozdíl.

Na grafu na Obr. 82 je patrné rozptýlení změřených bodů. Stejně rozptýlení vyhodnocených bodů vykazovalo i vyhodnocení výzkumu univerzity Saskatchewan, jak se dočteme v článku „*Culvert inlet efficiency*“. Toto rozptýlení je způsobeno složitostí odečtení správné hladiny za výtokem z propustku z důvodu fluktuace hladiny těsně za výtokem. Hladina byla odečítána z pomoci přístroje ELINKA-001, ovšem i s tímto přístrojem je pozorovatel schopen změřit pouze průměrnou polohu hladiny, nikoliv přesnou polohu hladiny v daném čase. A jak je napsáno v článku „*Culvert inlet efficiency*“, tak chyba 1 mm v odečtení hladiny způsobí 5 – 10% chybu v hodnotě součinitele ξ [17].

Bylo provedeno sloučení grafu z Obr. 82 a grafu z kanadského výzkumu uvedeného v článku „*Culvert inlet efficiency*“. Výsledný graf je zobrazen na následujícím Obr. 83.

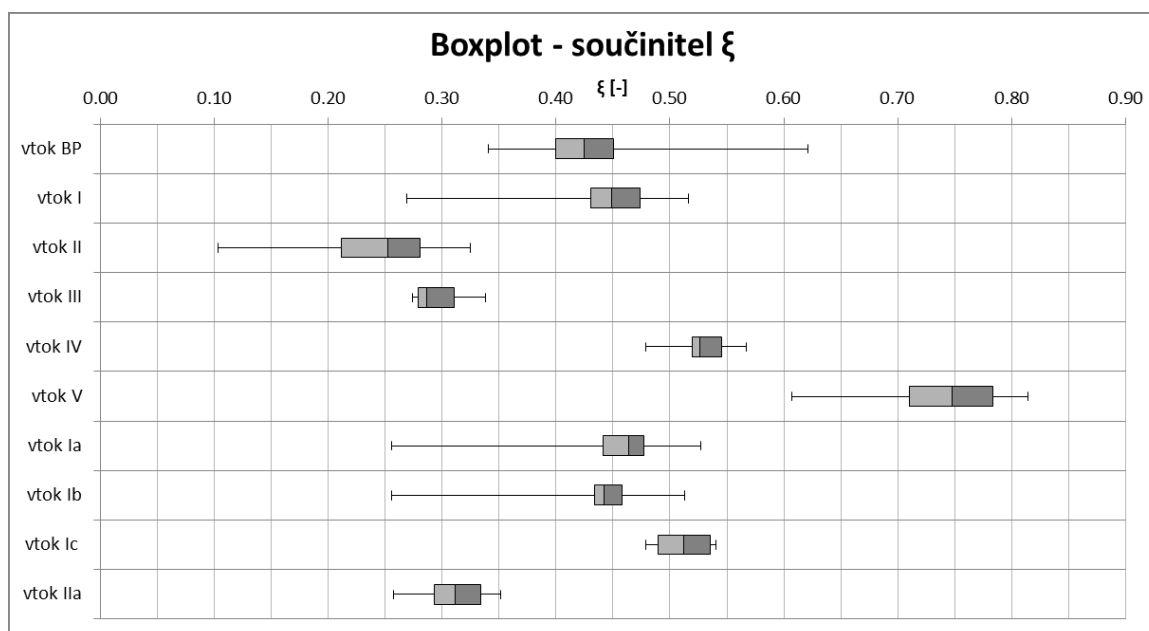


Obr. 83 Srovnání tímto výzkumem určených hodnot součinitele ξ a křivek pro součinitel ξ z kanadského článku „*Culvert inlet efficiency*“ (viz str. 32); obrázky vtoků z kanadského výzkumu jsou patrné na Obr. 25



Z grafického srovnání výsledků našeho výzkumu s kanadským výzkumem lze vyvodit, že hodnoty určené naším výzkumem kanadskému výzkumu rámcově odpovídají. Je zajímavé, že pro proudění o volné hladině tomu tak nebylo (viz Obr. 73.). Z toho lze vyvodit, že je rozdíl mezi hodnotami součinitele ξ pro proudění o volné hladině uvnitř propustku a pro tlakový režim uvnitř propustku. Myšlenky napsané na straně 7979 a dále byly tudíž správné. Také se ukázalo, že tímto výzkumem zjištěné hodnoty součinitele ξ jsou pro vtoky IV a V odlišné od hodnot určenými kanadským výzkumem. Pro tyto dva vtoky kanadský výzkum předpokládá mnohem vyšší hodnoty součinitele ξ . Naopak hodnoty pro vtok I vycházejí podobně jako u obdobného vtoku z kanadského výzkumu. Další vtoky testované kanadským výzkumem mají geometrii odlišnou od vtoků testovaných v tomto výzkumu a tak nelze provést další srovnání výsledků mezi těmito výzkumy. Ještě je zajímavé si povšimnout, že náš výzkum zachycuje hodnoty součinitele ξ pro tlakový režim od poměru $y_r/D > 1,0$. Důvodem je, aby v propustku byl vždy tlakový režim. Kanadský výzkum měřil i hodnoty při nižším stavu hladiny a tedy i pro proudění o volné hladině uvnitř propustku s vlivem dolní vody. Jak vychází z obou výzkumů, tak pro $y_r/D > 1,5$ se dá říci, že hodnoty součinitele ξ jsou v průměru konstantní [17].

Aby šlo jednodušeji vyhodnotit experimentálně zjištěné hodnoty součinitele ξ , tak byl vytvořen krabicový graf (anglicky „boxplot“ nebo „box plot“). Tento graf tvoří „krabička“ jejíž okraje tvoří dolní a horní kvartil. Uvnitř krabičky se nachází medián. „Vousy“ navazující na krabičku jsou minimum a maximum. Také mohou „vousy“ označovat konec 1,5 násobku mezikvartilového rozpětí a dále vzdálené body jsou tzv. odlehlá pozorování [32]. Pro tento případ ovšem byl zvolen typ „boxplotu“ vyznačující „vousy“ maximum a minimum. Důvodem je, že hodnoty součinitele ξ se mění v závislosti na průtoku a tak případné vyhodnocené maximum nebo minimum má v tomto případě adekvátní vypovídající hodnotu. Hotový krabicový graf je zobrazen na následujícím Obr. 84.



Obr. 84 Boxplot (krabicový diagram) vyhodnocující hodnoty součinitele místní ztráty na vtoku do propustku ξ při tlakovém proudění uvnitř propustku; „vousy“ grafu ukazují minimum a maximum

Jako přehled hodnot použitých pro krabicový graf a pro možnost přesného srovnání hodnot součinitele ξ byla vytvořena Tab. 13. Následně byla vytvořena Tab. 14, kde je souhrn hodnot



součinitele ξ podle dostupné literatury. Tab. 14 je vytvořena pro stejné nebo srovnatelné geometrie vtoků, jako byly testovány při výzkumu.

Typ vtoku	průměr ξ [-]	medián ξ [-]	min ξ [-]	max ξ [-]	dolní kvartil ξ [-]	horní kvartil ξ [-]
I	0.44	0.45	0.27	0.52	0.43	0.47
II	0.24	0.25	0.10	0.32	0.21	0.28
III	0.29	0.29	0.27	0.34	0.28	0.31
IV	0.53	0.53	0.48	0.57	0.52	0.55
V	0.74	0.75	0.61	0.81	0.71	0.78
Ia	0.45	0.46	0.26	0.53	0.44	0.48
Ib	0.43	0.44	0.26	0.51	0.43	0.46
Ic	0.51	0.51	0.48	0.54	0.49	0.54
Ila	0.31	0.31	0.26	0.35	0.29	0.35
BP	0.44	0.42	0.34	0.62	0.40	0.45

Tab. 13 Základní statistický popis výsledných hodnot součinitele ξ pro tlakový režim proudění uvnitř propustku s kruhovým příčným profilem

Typ vtoku	Podobný vtoku z výzkumu	Hodnoty z literatury pro kruhový profil propustku							
		ξ TP 204 [-]	ξ článek USA** [-]		ξ UK, příručka*** [-]		ξ USA, příručka**** [-]		
			beton	vln. plech	beton	vln. plech	beton	vln. plech	
svislá čelní stěna, ostrá hrana	vtok I	0.40–0.50	0.10	0.50	0.5	0.5	0.5	0.5	
svislá čelní stěna, zkosená hrana	vtok II	0.10–0.15*	-	-	-	-	0.2*	0.2*	
předsazený propustek, ostrá hrana	vtok IV	0.80–0.90	0.15	0.90	0.3*	0.9	0.5	0.9	
šikmé čelo propustku, ostrá hrana	vtok V	0.70–0.80	-	-	-	-	0.7	0.7	

*srovnáno s podobným vtokem

Tab. 14 Hodnoty součinitele ξ pro kruhový profil podle dostupné literatury

Literatura: **Hydraulic Data Comparison of Concrete and Corrugated Metal Culvert Pipes [19], *** Culvert design operation guide [5], **** Hydraulic Design of Highway Culverts - HDS-5 - Third Edition [4]

Pokud bychom chtěli brát součinitel ξ jako jedno číslo (pro tlakový režim proudění) pro daný vtok, tak nejvíce odpovídající bude z Tab. 13 sloupec s mediány součinitele ξ . Medián totiž není ovlivněn extrémními hodnotami jako průměr. Avšak při pohledu na průměrné hodnoty součinitele ξ vidíme, že rozdíl mezi průměrem a mediánem je skoro zanedbatelný.

Podíváme-li se na hodnoty součinitele ξ pro 1 propustek (vtok I) a 2 propustky vedle sebe, tak si můžeme všimnout, že nejsou patrné velké odlišnosti v těchto hodnotách a tudíž se ukazuje, že se 2 propustky vedle sebe při modelované osové vzdálenosti nijak negativně neovlivňují z pohledu ztráty na vtoku.

Provedeme-li srovnání experimentem určených hodnot s hodnotami z literatury, tak zjistíme, že hodnoty experimentu se velmi dobře shodují s hodnotami zahraniční literatury. Při srovnání s literaturou českou je shoda také dobrá, až na geometrii předsazeného vtoku propustku, kde už je znatelný rozdíl v hodnotách součinitele ξ . Každopádně potvrzuje, že v literatuře používané hodnoty součinitele ξ jsou platné pro tlakové proudění. Jak již bylo v předchozím textu uváděno, tak naopak pro proudění o volné hladině uvnitř propustku by měly být používány jiné hodnoty součinitele ξ .



6.2.2.1 Reynoldsovo číslo při modelovaném tlakovém režimu

Pro modelování tlakového proudění pro vyšetření místní ztráty na vtoku do propustku podle Reynoldsova zákona by mělo být měřítko zmenšení modelu takové, aby proudění bylo minimálně v kvadratické oblasti, jak již bylo napsáno na straně 50. V následující tabulce jsou uvedeny jednoduše statisticky popsané hodnoty Reynoldsova čísla, které byly dosahovány pro jednotlivé modelované vtoky.

Typ vtoku	průměr Re [-]	medián Re [-]	min Re [-]	max Re [-]
I	100 864	94 795	31 598	157 992
II	124 024	125 446	69 517	177 057
III	106 245	95 533	67 937	178 005
IV	105 036	95 691	66 567	179 795
V	99 226	92 686	65 774	177 786
Ia	59 500	61 583	40 169	82 179
Ib	59 500	61 583	40 169	82 179
Ic	59 077	61 106	41 465	82 248
Ila	84 359	84 157	41 394	127 658
BP	160 731	165 190	44 809	298 948

Tab. 15 Souhrn dosahovaných Reynoldsových čísel pro modely v tlakovém režimu proudění

Typ vtoku	vtok I	vtok II	vtok III	vtok IV	vtok V	vtok Ia	vtok Ib	vtok Ic	vtok Ila	vtok BP
Δ/D	9.24E-05				9.11E-05	1.20E-04			9.24E-05	5.87E-05

Tab. 16 Hodnoty relativní drsnosti pro modely v tlakovém režimu proudění; předpokládaná drsnost $\Delta = 0,00001$ m

Pokud vezmeme hodnoty z předcházejících Tab. 15 a Tab. 16, tak pro dané hodnoty Reynoldsova čísla a relativní drsnosti můžeme z Moodyho diagramu (viz Moodyho diagram na straně 114) odečíst oblast proudění. V prováděných experimentech byla dosahována přechodná oblast turbulentního proudění. Z toho vyplývá, že nebylo dosaženo kvadratické oblasti proudění. Tento fakt byl bohužel zjištěn až při vyhodnocení naměřených dat. Nedosažení kvadratické oblasti proudění může znamenat, že by na modelu a ve skutečnosti nebyl stejný režim proudění a tím pádem by výsledky z části výzkumu, kdy byly zkoumány modely v tlakovém režimu proudění, nemusely být obecně platné.



7 Závěry a doporučení

Účelem této práce bylo nalezení zúžené hloubky, stanovení hodnot součinitele místní ztráty na vtoku do kruhového propustku ξ pro různé geometrie vtoku propustku, stanovení dalších součinitelů popisujících proudění v propustcích a pozorování jevů proudění.

Výzkum probíhal ve vodohospodářské laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze na fyzikálních modelech umístěných v laboratorním žlabu. Bylo sestaveno celkem pět odlišných geometrií vtoků propustku včetně jedné varianty vtoku II, dále byly provedeny dvě varianty pro dva propustky umístěné vedle sebe a jedna kontrolní varianta pro jeden propustek v uspořádání dvou propustků vedle sebe. Ve vyhodnoceních byla použita i data získaná z měření použitých v předcházející bakalářské práci. Celkem tedy bylo řešeno deset různých geometrií vtoků. Byly měřeny stavy při volném proudění v celém propustku (s volným i zahlceným vtokem) bez vlivu dolní vody a stavy při tlakovém proudění v celém propustku s vlivem dolní vody.

V práci bylo popsáno a fotograficky dokumentováno složité prostorové proudění vody propustky. U geometrie s předsazeným propustkem (vtok IV) a se šikmým čelem propustku (vtok V) se vyskytovaly velké víry. Obzvláště u geometrie se šikmým čelem propustku se tento negativní jev objevuje ve zvýšené míře v režimu volné hladiny (pro y_r/D v rozmezí 1,2 až 2,9) i v režimu tlakového proudění. Dále byl potvrzen známý poznatek, že propustek v tlakovém režimu proudění je více kapacitní než propustek s prouděním o volné hladině uvnitř propustku. Tento poznatek by mohl být využit v některých případech, kdy by byl chvilkovým vyvoláním velké ztráty na výtoku z propustku, převeden režim proudění na tlakový (např. jeřáb na silnici by břemenem dočasně zablokoval výtok z propustku se zahlceným vtokem). Po vzniku tlakového proudění v propustku by došlo k poklesu hladiny před propustkem a mohlo by se zabránit např. přelití náspu.

Pro vtoky I a II byla nalezena zúžená hloubka pro různé průtoky. Bylo prokázáno shoda dat s daty z předcházející bakalářské práce. Bylo dokázáno, že na geometrie vtoku má vliv na vzdálenost zúžené hloubky za vtokem do propustku. Ukázalo se, že zahlcení vtoku do propustku způsobuje změnu trendu vzdálenosti zúžené hloubky za vtokem. Po zahlcení vtoku do propustku se zúžená hloubka o něco přiblíží blíže ke vtoku, ačkoliv předchozí trend ukazoval, že se zvyšujícím se průtokem se zúžená hloubka od vtoku oddaluje. Pro rozdílné šířky koryta před propustkem (srovnání vtoku I a vtoku BP) nebyla zjištěna významná odlišnost a tedy se předpokládá, že šířka koryta před propustkem nemá na tento jev významný vliv. Byl určen součinitel výškového zúžení κ vztažený k profilu zúžené hloubky pro obě geometrie vtoku. Zjištěná hodnota součinitele κ je $\kappa = 0,82$ pro vtok I (i pro vtok BP) a $\kappa = 0,86$ pro vtok II. Tyto hodnoty jsou o 0,05 až 0,1 nižší než současně používané hodnoty pro obdobné vtoky.

Součinitel zatopení β byl vyhodnocen pro všechny měřené geometrie vtoku. Bylo zjištěno, že experimenty určené hodnoty součinitele β mnohem nižší než uvádí současná literatura (rozdíl je řádově v jednotkách až desítkách procent v závislosti na geometrii vtoku). Kvůli pouze nepatrným rozdílům mezi vyhodnocenými hodnotami součinitele β doporučuje práce používat hodnotu $\beta = 1,04$ pro většinu vtoku nebo dokonce součinitel β neužívat (brát jeho hodnotu jako $\beta = 1,0$) a předpokládat, že k zahlcení vtoku dojde v okamžiku, kdy hladina před propustkem bude dosahovat k horní hraně



vtoku do propustku (poměr $y_r/D = 1,0$). Tím by došlo k zjednodušení současné metodiky. Navíc je tento přístup na straně bezpečnosti.

Součinitel místní ztráty vtokem do propustku ξ byl vyhodnocen u proudění o volné hladině v propustku pro vtoky I a II; pro tlakový režim proudění byl tento součinitel vyhodnocen pro všechny geometrie vtoku. Pro proudění o volné hladině byl součinitel ξ vyhodnocen k nalezenému profilu zúžené hloubky (viz Tab. 11). Ukázalo se, že vyhodnocený součinitel ξ je mnohem nižší než běžně uvádí česká i zahraniční literatura. Tento rozdíl je způsoben odlišným přístupem k místní ztrátě na vtoku. Metodicky by bylo správné místní ztrátu na vtoku vztahovat k profilu zúžené hloubky (tento přístup je použit v této práci) a za profilem zúžené hloubky začít s výpočtem hladin nerovnoměrného proudění. Ovšem většina literatury slučuje do místní ztráty vtokem ztrátu zúžením proudění, která se vztahuje k profilu zúžené hloubky, a ztrátu rozšířením zúženého proudění (Bordova ztráta), která nastává za profilem zúžené hloubky a je celkově větší. Sloučením těchto dvou odlišných ztrát do jedné vede k vyšším hodnotám ξ . Proto jsou současně používané hodnoty součinitele ξ vyšší, pokud se aplikují pro režimy proudění s volnou hladinou v propustku a nepopisují tedy dobře daný jev. Tato úvaha byla nastíněna v předcházející bakalářské práci a touto prací se potvrzuje. Bylo by tedy vhodné rozlišovat součinitel ξ pro režimy s volnou hladinou v propustku, kdy je místní ztráta vztažena k profilu zúžené hloubky, a pro tlakový režim proudění, kdy se do místní ztráty promítne i ztráta rozšířením za vzniklou kontrakcí proudění vtokem. Některé starší výzkumy už s rozlišením součinitele ξ pro proudění o volné hladině a tlakový režim pracovaly. Výhodou tohoto přístupu je vyšší přesnost výpočtu.

Výsledky výzkumu pro tlakový režim proudění (viz Tab. 13) vykazují dobrou shodu s aktuálně používanými hodnotami tohoto součinitele (viz Tab. 14). Naměřeným hodnotám více odpovídá zahraniční anglicky psaná literatura. U hodnot používaných naší metodikou byl zjištěn podstatný rozdíl u geometrie s předsazeným vtokem propustku. Zahraniční literatura užívá v základu dvě rozdělení pro ztrátový součinitel ξ a to podle geometrie vtoku a následně podle materiálu vtoku (většinou beton nebo vlnitý plech). Uvádět odlišné hodnoty součinitele ξ pro materiály s výrazně odlišnou drsností se autorovy práce zdá jako vhodný přístup. Výzkum ukázal, že pro tlakové proudění (pro $y_r/D > 1,0$) s narůstajícím průtokem se součinitel mění přibližně o hodnotu $\pm 0,1$ ovšem v průměru má ovšem konstantní průběh. Je tedy smysluplné používat pro tlakový režim proudění jednu hodnotu součinitele ξ pro daný vtok a materiál. Bohužel se při vyhodnocení dat po ukončení měření přišlo na fakt, že pro tlakový režim proudění, při němž se používá Reynoldsův zákon mechanické podobnosti, nebyla dosažena kvadratická oblast turbulentního proudění a je tudíž možné, že výsledky pro tlakový režim proudění nemusejí být zcela věrohodné.

Pro proudění o volné hladině uvnitř propustku byl součinitel ξ kvůli vysoké pracnosti měření vyhodnocen jen pro vtoky I a II. Byly však vypracovány bezrozměrné konzumční křivky (viz Obr. 75), které byly zpracovány pro všechny geometrie vtoku výzkumu. Z těchto bezrozměrných konzumčních křivek vyplývá, kapacita jednotlivých vtoků. Největší rozdíl v kapacitě vtoků byl pro nejvyšší průtoky a tedy i nejvyšší hladiny před propustkem. Pro vysoké průtoky se jako nejméně kapacitní ukázal vtok V (šikmé člo propustku). Následně velmi podobně vycházely vtoky I (svíslá čelní stěna, ostrohranný vtok) a IV (předsazený propustek); tyto dvě geometrie by se daly označit jako průměrné. Nejlépe vycházel vtok II (svíslá čelní stěna, zkosené hrany vtoku) včetně své modifikace IIa (kratší zkosení) a



vtok III (předsazené zkosení před svislou čelní stěnu). Pro nízké průtoky nejsou rozdíly v kapacitě vtoků tolik významné. Výzkumem určené konzumční křivky byly srovnány s konzumčními křivkami propustků z jiných výzkumů nebo dostupné literatury. Až na drobné rozdíly (více na str. 86) se tímto výzkumem určené konzumční křivky dobře shodovaly s konzumčními křivkami z jiných zdrojů.

V rámci výzkumu bylo elementárně testováno chování dvou propustků vedle sebe (geometrie vtoku Ia, Ib a kontrolní model Ic). Ačkoliv byly modelové propustky velmi blízko sebe (osová vzdálenost 99 mm, pro průměr propustku 83,6 mm, mezera v nejužším místě mezi vtoky tedy byla pouze 15,4 mm), tak se ukázalo, že z pohledu místní ztráty na vtoku se dva propustky vedle sebe nijak významně neovlivňují ani při proudění o volné hladině ani při tlakovém proudění. Pokusy s tenkou dělicí deskou mezi propustky (geometrie vtoku Ib) vedly ke zjištění, že vliv této přepážky není významný a ve skutečnosti by se nevyplatilo ji realizovat.

Závěrem lze říci, že výzkum prokázal, vhodnost omezení navrhování vtoků se šikmým čelem (vtok V), neboť tento se tento vtok jeví jako zcela nejhorší, jak z hlediska kapacity, tak z hlediska stability proudění – tvorba vírů a doprovodných jevů jako pulzování hladiny apod. Překvapením tohoto výzkumu je geometrie předsazeného propustku, která se neukázala jako nejhorší. Dále bylo dokázáno, že přídatné zkosení vtoku (geometrie vtoku II, IIa a III) je vhodné užívat. Toto zkosení bylo navrženo Ing. Tomášem Pickem, Ph.D. jako stavebně jednoduché (zkosení je kónicky se zužující obdélník; toto zkosení má snadno proveditelné bednění pro betonáž). Bylo by vhodné toto zkosení užívat u nových staveb propustků i u rekonstrukcí stávajících s cílem částečného zlepšení současného stavu.



Seznam použité literatury

1. **HISTORIC DOCUMENTATION COMPANY, Inc, PORTSMOUTH, RI.** *Historic Stone Highway Culverts in New Hampshire*. [Online] Zář 2009. [Citace: 27. Listopad 2016.] 64 str.. <http://www.nh.gov/dot/org/projectdevelopment/environment/documents/CulvertManagementManual.pdf>.
2. **CTN PRAGOPROJEKT, a.s.** ČSN 73 6200. *Mosty – Terminologii a třídění*. [Norma]. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, červenec 2011. str. 48. Třídící znak 73 6200.
3. **VÝZKUMNÝ ÚSTAV VODOHOSPODÁŘSKÝ T. G. MASARYKA v. v. i.** *Technické podmínky 204: Hydrotechnické posouzení mostních objektů na vodních tocích*. Praha : Ministerstvo dopravy, Odbor infrastruktury, 2009. str. 95. Dostupné také z: <http://www.pjpk.cz/TP%20204.pdf>.
4. **SCHALL, J., a další, a další.** Federal Highway Administration – Bridges & Structures. *Hydraulic Design of Highway Culverts - HDS-5 - Third Edition*. [Online] duben 2012. [Citace: 18. 8 2016.] 326 str.. <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/12026/hif12026.pdf>.
5. **BALKHAM, M., a další, a další.** *Culvert design operation guide*. London : CIRIA, Classic house, 174-180 Old Street, London, EC1V 9BP, 2010. str. 382. Dostupné také z: http://www.ciria.org/Resources/Free_publications/C689.aspx . ISBN: 978-0-86017-689-3.
6. **PRAGOPROJEKT, a.s., ŠIMLEROVÁ, D.** ČSN 73 6201. *Projektování mostních objektů*. [Norma]. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, říjen 2008. str. 76. Třídící znak 73 6201.
7. **HLAVÁČ, V. a ANDĚL, P.** *Mosty přes vodní toky – ekologické aspekty a požadavky. Metodická příručka*. Jihlava : Krajský úřad Vysočina, 2008. str. 32. ISBN 978-80-87051-40-5.
8. **KUNŠTÁTSKÝ, Jiří.** *Hydraulické výpočty propustků a mostů*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury n. p., 1956. str. 48.
9. **HAVLÍK, V. a MAREŠOVÁ, I.** *Hydraulika 11, Příklady*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2001. str. 326. ISBN 80-01-01586-6.
10. **KOLÁŘ, V., PATOČKA, C. a BÉM, J.** *Hydraulika*. Praha : SNTL – nakladatelství technické literatury n. p., 1983. str. 480.
11. **HAVLÍK, Aleš.** *Proudění mostními objekty a propustky*. [Online] [Citace: 30. srpen 2016.] http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/prednasky/HY2V_08_Mosty_propustky.pdf.
12. **HAVLÍK, Aleš a PICEK, Tomáš.** *Hydraulika otevřených koryt*. [Online] [Citace: 30. srpen 2016.] http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/prednasky/HY2V_05_Ustalene_proudeni_v_korytech.pdf.
13. **BODHAINE, G. L.** *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Chapter A3: Measurement of peak discharge at culverts by indirect methods*. [editor] Peck L. Dallas. Denver : United States government printing office, 1982. str. 69. Dostupné také z: http://www.civil.uwaterloo.ca/cive381/helpful_resources/Bohdaine_paper.pdf.



14. **SEDLÁČEK, Daniel.** *Modelový výzkum proudění na vtoku do propustku.* Praha : České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2015. str. 55. Bakalářská práce.
15. **TULLIS, B.** *NCHRP report 734: Hydraulic Loss Coefficients for Culverts.* Washington D. C. : National Academy of Sciences, 2012. str. 123. Dostupné také z: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_734.pdf. ISBN 978-0-309-25867-8 / ISSN 0077-5614.
16. The Official Portal for Department of Irrigation and Drainage Malaysia. *Urban Stormwater Management Manual: Chapter 27 - Culverts.* [Online] [Citace: 2016. srpen 31.] <http://www.water.gov.my/images/stories/BSMA/Ch%2027%20-%20Culverts.pdf>.
17. **SMITH, C. D. a OAK, A. G.** Can. J. Civ. Eng. Vol, 22, 1995. *Culvert inlet efficiency.* [Online] 1995. [Citace: 3. srpen 2016.] 6 str.. <http://thirdworld.nl/culvert-inlet-efficiency>.
18. **YARNELL, D. L., NAGLER, F. A. a WOODWARD, S. M.** The Flow of Water Through Culverts. *University of Iowa Studies in Engineering.* Bulletin 1, červen 1926, str. 157.
19. **STRAUB, L. G. a MORRIS, H. M.** *Hydraulic Data Comparison of Concrete and Corrugated Metal Culvert Pipes.* Minneapolis : University of Minnesota; St. Anthony Falls hydraulic laboratory, 1950. str. 25. Dostupné také z: http://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/107907/1/tp_003b.pdf.
20. **SCHILLER, R. E.** Tests on Circular-Pipe-Culvert Inlets. *Highway Research Board* . 1955, Report 15-B, str. 23. Dostupné také z: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbulletin/126/126-002.pdf>.
21. **HAGER, W. H. a GIUDICE, G.** Generalized Culvert Design Diagram. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.* Vol. 124, 1998, No. 5, str. 4.
22. **ČÁBELKA, J. a GABRIEL, P.** *Matematické s fyzikální modelování v hydrotechnice [1] Výzkum na hydraulických modelech a ve skutečnosti.* Praha : Academia, 1987. str. 304. Sv. I.
23. **MATOUŠEK, Václav.** *Základy fyzikálního modelování.* [Online] [Citace: 23. září 2016.] http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Users/Matousek/downloads/web_HY3V_04_Zaklady_fyzikalniho_modelovani.protected.pdf.
24. **VANĚK, Jakub.** *Numerické modelování proudění v bezpečnostních objektech malých vodních nádrží.* Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Brno : __, 2012. str. 54, Diplomová práce.
25. **ZROSTLÍK, Štěpán.** *Matematické a fyzikální modelování proudění na vtoku do propustku.* České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Praha : __, 2012. str. 77. Diplomová práce.
26. **MATOUŠEK, Václav.** Pohyb reálné kapaliny II: Turbulence. [Online] [Citace: 23. září 2016.] http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Users/Matousek/downloads/web_HY3V_02_PRK_II_Turbulence.protected.pdf.
27. **KANTOR, Martin.** *Hydraulika bezpečnostních přelivů vodních děl za extrémních průtoků.* České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Praha : __, 2007. str. 58. Diplomová práce.
28. **MATOUŠEK, Václav.** Modelová podobnost. [Online] [Citace: 25. září 2016.] http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Users/Matousek/downloads/web_HY3V_05_Modelova_podobnost.protected.pdf.
29. **BadgerMeter, Inc.** *Model Magnetoflow Primo®.* [Online] [Citace: 20. říjen 2016.] https://www.instrumart.com/assets/BadgerI-Magnetoflow-amp_datasheet.pdf.



30. **SMETANA, Jan.** *Hydraulika*. [editor] Jiří Beránek. 1. Praha : Nakladatelství Československé akademie věd, 1957. str. 490. Sv. II.
31. **HAVLÍK, Aleš a PICEK, Tomáš.** *Hydraulika potrubí*. [Online] [Citace: 19. Listopad 2016.] http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/prednasky/HY2V_04_Hydraulika_potrubi.pdf.
32. **JARUŠKOVÁ, Daniela.** *Pravděpodobnost a matematická statistika 12*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2000. str. 138.



Seznam obrázků

<i>Obr. 1</i> Typický betonový propustek obdélníkového profilu	12
<i>Obr. 2</i> Typický propustek z vlnitého plechu kruhového profilu s betonovou čelní stěnou a bočními křídly	12
<i>Obr. 3</i> Srovnání mostu a propustku ve stejném profilu	13
<i>Obr. 4</i> Běžně užívané profily propustků	14
<i>Obr. 5</i> Ekologicky nevhodné řešení výtoku propustku	15
<i>Obr. 6</i> Propustek s volnou hladinou v celé jeho délce	16
<i>Obr. 7</i> Propustek se zatopeným vtokem a volnou hladinou uvnitř propustku	16
<i>Obr. 8</i> Propustek s tlakovým prouděním	17
<i>Obr. 9</i> Zatopený vtok během povodní; viditelná tvorba víru	17
<i>Obr. 10</i> Volný vtok do propustku během povodní	17
<i>Obr. 11</i> Konzumční křivky propustku	19
<i>Obr. 12</i> Schéma přelítí vozovky	19
<i>Obr. 13</i> Kontrakce proudění ve vtoku do propustku; při zaoblení hran je kontrakce menší	20
<i>Obr. 14</i> Vtok do propustku s volnou hladinou; zúžená hloubka	20
<i>Obr. 15</i> Znárodnění průběhu čáry energie v propustku při tlakovém proudění ovlivněním dolní vodou	22
<i>Obr. 16</i> Konzumční křivka propustku v případě, kdy je rozhodující vtok	23
<i>Obr. 19</i> Schémata úprav vtoku příslušejících k Tab. 3	24
<i>Obr. 17</i> Typický vtok do propustku: svislá čelní stěna a sklopené boční stěny	24
<i>Obr. 18</i> Typický vtok do propustku: vtok zarovnaný se svahem (šikmé čelo propustku)	24
<i>Obr. 20</i> Typický vtok do propustku: kolmá čelní stěna	25
<i>Obr. 21</i> Typický vtok do propustku: předsazený vtok	25
<i>Obr. 22</i> Testování volného proudění v obdélníkovém propustku (3 x 3 stopy; délka 36 stop) v roce 1926	26
<i>Obr. 23</i> Model betonového propustku s průměrem 36 palců v hydraulické laboratoři při výzkumu v polovině 20. stol.; modelovaná geometrie vtoku – kolmá čelní stěna	27
<i>Obr. 24</i> Srovnání bezrozměrných konzumčních křivek pro jednotlivé geometrie vtoku a různé sklony dna propustku; u křivek z modelů s malými sklony dna je patrný přechod z proudění o volné hladině k tlakovému proudění uvnitř propustku; schémata vtoků jsou k nalezení v přílohách na straně 115 ..	29
<i>Obr. 25</i> Geometrie vtoků do propustku testované v rámci výzkumu v Kanadě	30
<i>Obr. 26</i> Výsledné bezrozměrné konzumční křivky pro vtoky řešené kanadským výzkumem	31
<i>Obr. 27</i> Výsledné průběhy koeficientu místní ztráty na vtoku pro vtoky řešené kanadským výzkumem	32
<i>Obr. 28</i> Schéma modelu propustku; značení základních veličin	32
<i>Obr. 29</i> Zobecněný diagram proudění pro propustky	33
<i>Obr. 30</i> Konzumční křivky propustku pro:	33
<i>Obr. 31</i> Podmínka zahlcení výtoku z propustku	35



Obr. 32 Propustek s volnou hladinou, volným vtokem a výtokem, když $i_0 > i_k$	36
Obr. 33 Propustek s volnou hladinou, volným vtokem a výtokem, když $i_0 \approx i_k$	36
Obr. 34 Propustek s volnou hladinou a vtokem zatopeným dolní vodou	37
Obr. 35 Propustek se zatopeným vtokem a volným výtokem; proudění o volné hladině.....	39
Obr. 36 Ovlivnění zatopeného vtoku propustku dolní vodou	40
Obr. 37 Vznik víru vniknutím vzduchu do vtoku při tlakovém proudění.....	40
Obr. 38 Jedna z forem přechodu k tlakovému režimu celého propustku	41
Obr. 39 Tlakové proudění v propustku; volný výtok.....	41
Obr. 40 Tlakový průtok propustkem ovlivněný dolní vodou	43
Obr. 41 Nikuradseho graf charakterizující různé oblasti ztrát třením při proudění vody v kruhovém potrubí	51
Obr. 42 Dva pohledy na hydraulický žlab B25; obrázek vlevo: pohled na vtokovou část žlabu a vedení potrubí, na pravé části obrázku je vidět sousední sklopný žlab B20; obrázek vpravo: pohled na žlab shora při probíhajícím experimentu s vlivem dolní vody, viditelné kolejničky pro hrotové měřítko na podjezdu.....	53
Obr. 43 Uzávěr pro regulaci úrovně hladiny dolní vody, který byl používán místo žaluziového uzávěru	54
Obr. 44 Schémata modelu propustku s typem vtoku I	56
Obr. 45 Fotografie modelu s typem vtoku I; fotografii vlevo pořídil Ing. Tomáš Píček, PhD.	56
Obr. 46 Schémata modelu propustku s typem vtoku Ia	57
Obr. 47 Fotografie modelu s typem vtoku Ia	57
Obr. 48 Fotografie modelu s typem vtoku Ib; na obou obrázcích je patrné demontovatelné rozepření a upevnění přepážky	58
Obr. 49 Schémata modelu propustku s typem vtoku II	59
Obr. 50 Fotografie modelu s typem vtoku II; fotografie pořídil Ing. Tomáš Píček, PhD.	59
Obr. 51 Schémata modelu propustku s typem vtoku III	60
Obr. 52 Fotografie modelu s typem vtoku III; fotografie pořídil Ing. Tomáš Píček, PhD.	60
Obr. 53 Schémata modelu propustku s typem vtoku IV.....	61
Obr. 54 Fotografie modelu s typem vtoku IV.....	61
Obr. 55 Schémata modelu propustku s typem vtoku V.....	62
Obr. 56 Fotografie modelu s typem vtoku V.....	62
Obr. 57 Magneticko-indukční průtokoměr s převodníkem instalovaný na žlabu B25.....	63
Obr. 58 Vlevo: svislé hrotové měřítko s jehlou ve tvaru háku v tlumícím válci; vpravo: Thomsonův měrný přeliv instalovaný ve žlabu B25.....	64
Obr. 59 Vlevo: otočné hrotové měřítko, dále jsou patrné vyvrtné měřicí otvory v rouři propustku; vpravo: hrotové měřítko uložené na pohyblivém můstku	65
Obr. 60 Vlevo: zapojený přístroj ELINKA-001; vpravo: připojení výstupních kabelů se svorkou z přístroje ELINKA-001 na otočné hrotové měřítko	66
Obr. 61 Schémata změřených průběhů hladin uvnitř propustku na modelu z bakalářské práce; červené křížky označují zaměřený bod; příčný profil 1 je profil nejbližší vtoku do propustku	66



Obr. 62 Ukázka měřených bodů pro jeden průtokový stav na modelu vtoku II; červené křížky ukazují měřené body hladiny před propustkem; dále je na obrázku názorně vidět rozmístění měřících profilů pro hladinu uvnitř propustku	67
Obr. 63 Velký vír, který zasahuje do profilu vtoku V při průtoku $Q = 12 \text{ l/s}$; poměr $y_H/D = 2,90$	70
Obr. 64 Srovnání zúžení proudění a odtržení proudu od stěn propustku pro stav s volným vtokem (vlevo) a stav se zahlceným vtokem (vpravo) pro vtok IV, kde byly tyto jevy nejvíce patrné	71
Obr. 65 Graf zobrazuje relativní vzdálenost zúžené hloubky závislou na bezrozměrném průtoku	72
Obr. 66 Rychlost proudění v profilu zúžené hloubky	73
Obr. 67 Zjištěné hodnoty součinitele výškového zúžení κ ; počítaná kritická hloubka je kritická hloubka v propustku	73
Obr. 68 Nárůst zúžené hloubky při zvyšujícím se průtoku	74
Obr. 69 Nárůst průtočné plochy v profilu zúžené hloubky při zvyšujícím se průtoku	75
Obr. 70 Porovnání vývoje poměru průtočné plochy v místě zúžené hloubky s průtočnou plochou v kritické hloubce propustku	75
Obr. 71 Výsledné hodnoty součinitele místní ztráty na vtoku ξ pro proudění o volné hladině uvnitř propustku; v grafu jsou použita i data určená v bakalářské práci a to jak pro původně změřený průtok, tak i pro průtok upravený o předpokládaný průsak netěsnícím šoupětem; červená čára označuje osu X	77
Obr. 72 Experimentem určené hodnoty součinitele místní ztráty ξ ; červená čára označuje osu y	77
Obr. 73 Ilustrativní srovnání určeného průběhu hodnot součinitele místní ztráty ξ v místě zúžené hloubky a křivek průběhu hodnot součinitele ξ , které byly výsledkem kanadského výzkumu popsaného v článku „Culvert inlet efficiency“ (viz str. 32). Hodnoty součinitele ξ z kanadského výzkumu se odlišují tím, že nevztahují součinitel k profilu zúžené hloubky, ale zahrnují do něj i ztráty vznikající za tímto profilem (např. rozšiřování zúženého proudění)	79
Obr. 74 Vyhodnocení rychlostního součinitele φ ; červená čára označuje hraniční hodnotu 1,0	81
Obr. 75 Výzkumem naměřené konzumční křivky všech provedených fyzikálních modelů; proudění o volné hladině uvnitř propustku	82
Obr. 76 Detail z grafu na Obr. 75 na oblast nižších průtoků; k zahlcení vtoků do modelových propustků dochází až pro body $y_H/D > 1,0$	83
Obr. 77 Srovnání naměřených konzumčních křivek s konzumčními křivkami z publikace „Hydraulic Design of Highway Culverts - HDS-5 - Third Edition“, kde jsou konzumční křivky sestaveny pro kruhový a eliptický příčný profil propustku z vlnitého plechu	83
Obr. 78 Srovnání naměřených konzumčních křivek s konzumčními křivkami z článku „Culvert inlet efficiency“; graf z kanadského článku není bohužel dokonale oskenován a proto ve svislé ose poněkud „ubíhá“ doprava	84
Obr. 79 Vizualizované proudění v ose žlabu před vtokem propustku pomocí tyče s instalovanými bavlnkami; obrázek vlevo – vtok V, $Q = 6,5 \text{ l/s}$, úroveň hladiny za propustkem 30,5 cm; obrázek vpravo – vtok IV, $Q = 6,5 \text{ l/s}$, úroveň hladiny za propustkem 35,0 cm; u obrázku vlevo je patrná tvorba víru	89



Obr. 80 Vizualizované proudění v ose žlabu za výtokem z propustku pomocí tyče s instalovanými bavlnkami; obrázek vlevo – vtok V, $Q= 6,5$ l/s, úroveň hladiny za propustkem 30,5 cm; obrázek vpravo – vtok IV, $Q= 12,1$ l/s, úroveň hladiny za propustkem 37,0 cm	89
Obr. 81 Víření proudění za výtokem z propustku; vtok IV, $Q= 17,0$ l/s, úroveň hladiny za propustkem 17,0 cm.....	90
Obr. 82 Hodnoty bezrozměrné hloubky před propustkem v závislosti na velikosti součinitele místní ztráty ξ při tlakovém proudění v propustku.....	91
Obr. 83 Srovnání tímto výzkumem určených hodnot součinitele ξ a křivek pro součinitel ξ z kanadského článku „Culvert inlet efficiency“ (viz str. 32); obrázky vtoků z kanadského výzkumu jsou patrné na Obr. 25.....	92
Obr. 84 Boxplot (krabicový diagram) vyhodnocující hodnoty součinitele místní ztráty na vtoku do propustku ξ při tlakovém proudění uvnitř propustku; „vousy“ grafu ukazují minimum a maximum.....	93
Obr. 85 V této tabulce jsou pro částečně plněný kruhový profil sestaveny průtočné plochy, omočené obvody, průtokové moduly, moduly rychlosti a především tzv. kritická funkce. Tabulka je převzata z publikace: <i>Hydraulické výpočty propustků a mostů</i> [8].....	112
Obr. 86 Schémata typů vtoků a hran vtoků s anglickými názvy	114
Obr. 87 Moodyho diagram	114
Obr. 88 Schémata vtoků propustků řešených výzkumem v USA Schillerem; článek <i>Tests on Circular-Pipe-Culvert Inlets</i> (1955).....	115
Obr. 89 Schéma hydraulického žlabu B25 vytvořené Ing. Tomášem Pickem, Ph.D.	116
Obr. 90 Proudění uvnitř propustku (proudění o volné hladině) při průtoku 10 l/s, měřená geometrie – vtok I	117
Obr. 91 „Šípové“ zvlnění hladiny v propustku při průtoku 6 l/s; na obrázku jsou dobře patrné všechny měřicí otvory v rouři propustku	117
Obr. 92 Volný výtok z propustku při průtoku 15,3 l/s, což byla maximální kapacita modelu s vtokem I	118
Obr. 93 Snížení hladiny před vtokem při průtoku 4,5 l/s (vtok I)	118
Obr. 94 Utěsnění měřicích otvorů v rouři modelu pomocí gumové podložky, plastového dílce a gumy	119
Obr. 95 Pohled shora na proudění ve dvou propustcích; geometrie vtoků Ia.....	119
Obr. 96 Fotografie zahlceného vtoku III; autorem fotografie je Ing. Tomáš Píček, PhD.....	120
Obr. 97 Vír u toku IV při průtoku 7,0 l/s při zahlceném vtoku a proudění o volné hladině uvnitř propustku.....	120
Obr. 98 Fotografie fyzikálního z bakalářské práce (vtok BP); model je umístěn v hydraulickém žlabu B50, který je 0,5 m široký	121
Obr. 99 Fotografie fyzikálního modelu z bakalářské práce; průtok v okamžiku fotografování je 9,0 l/s	121



Zdroje fotografií, ilustrací a grafů

- Obr. 1 2-dscn4395 [fotografie]. V: CETINA a KENAUR [online]. [cit. 19. 8. 2016]. Dostupné z: <http://www.cetinaakenaur.cz/media/image/2-dscn4395.jpg>
- Obr. 2 BonhamRdClv01.702_11b [fotografie]. V: BCEO [online]. [cit. 19. 8. 2016]. Dostupné z: http://www.bceo.org/images/projects/BonhamRdClv01.702_11b.jpg
- Obr. 3 Figure 1. 4. Bridge versus culvert at same location [obrázek] V: *Hydraulic Design of Highway Culverts - HDS-5 - Third Edition*. [Online] 2012. [Citace: 18. 8. 2016.]. <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/12026/hif12026.pdf>.
- Obr. 5 rockycreek [fotografie]. V: SPSSEG - South Puget Sound Salmon Enhancement Group [online]. [cit. 19. 8. 2016]. Dostupné z: <http://spsseg.org/wp-content/uploads/2008/09/rockycreek.jpg>
- Obr. 9 5054733880_c81a752bb4 [fotografie]. [online]. [cit. 23. 8. 2016]. Dostupné z: https://i0.wp.com/farm5.static.flickr.com/4105/5054733880_c81a752bb4.jpg
- Obr. 10 rain6 [fotografie]. V: Willow House Chronicles [online]. [cit. 23. 8. 2016]. Dostupné z: <https://willowhousechronicles.files.wordpress.com/2010/01/rain6.jpg>
- Obr. 11 Figure 1. 19. Culvert performance curve [graf] V: *Hydraulic Design of Highway Culverts - HDS-5 - Third Edition*. [Online] 2012. [Citace: 18. 8. 2016.]. <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/12026/hif12026.pdf>.
- Obr. 12 Figure 3. 10. Roadway overtopping [obrázek] V: *Hydraulic Design of Highway Culverts - HDS-5 - Third Edition*. [Online] 2012. [Citace: 18. 8. 2016.]. <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/12026/hif12026.pdf>.
- Obr. 13 Figure 1. 9. Entrance contraction [obrázek] V: *Hydraulic Design of Highway Culverts - HDS-5 - Third Edition*. [Online] 2012. [Citace: 18. 8. 2016.]. <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/12026/hif12026.pdf>.
- Obr. 14 Obr. 17 Vtok do propustku s volnou hladinou [obrázek]. V: *Hydraulické výpočty propustků a mostů* [kniha] na str. 16. Praha: Státní nakladatelství technické literatury n. p., 1956.
- Obr. 15 Figure 3. 8. Full flow energy and hydraulic grade lines [obrázek] V: *Hydraulic Design of Highway Culverts - HDS-5 - Third Edition*. [Online] 2012. [Citace: 18. 8. 2016.]. <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/12026/hif12026.pdf>.
- Obr. 16 Figure 3. 4. Inlet control curves [graf] V: *Hydraulic Design of Highway Culverts - HDS-5 - Third Edition*. [Online] 2012. [Citace: 18. 8. 2016.]. <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/12026/hif12026.pdf>.
- Obr. 17 Hynds_Wingwalls [fotografie]. V: HYNDS [online]. [cit. 3. 9. 2016]. Dostupné z: http://www.hynds.co.nz/wp-content/uploads/Hynds_Wingwalls.jpg
- Obr. 18 Propustek-km-13350-Hulín-105 [fotografie]. V: Chládek a Tintěra, Havlíčkův Brod, a.s. [online]. [cit. 3. 9. 2016]. Dostupné z: <http://www.chladek-tintera.cz/wordpress/wp-content/uploads/Propustek-km-13350-Hulín-105.jpg>
- Obr. 19 Obr. 10.7: Možné úpravy vtokové části propustku [obrázek] V: *Technické podmínky 204: Hydrotechnické posouzení mostních objektů na vodních tocích*. Praha : Ministerstvo dopravy, Odbor infrastruktury, 2009. Dostupné také z: <http://www.pjpk.cz/TP%20204.pdf>.



- Obr. 20 1081 [fotografie]. V: Kamenné zdi Rousek [online]. [cit. 3. 9. 2016]. Dostupné z: <http://files.kammenne-zdi.webnode.cz/200004062-4dbfd4f31b-public/1081.JPG>
- Obr. 21 gatesclv0.111_99 [fotografie]. V: BCEO [online]. [cit. 3. 9. 2016]. Dostupné z: http://www.bceo.org/annrpt9900/images/gatesclv0.111_99.jpg
- Obr. 22 Plate V. Testing concrete box culverts B. [fotografie]. V: *The flow of water through culverts* [publikace] na str. 135. *University of Iowa Studies in Engineering*. Bulletin 1, 1926.
- Obr. 23 Fig. 2 – Flush Headwall at Inlet to 36-in Concrete Culvert [fotografie]. V: *Hydraulic Data Comparison of Concrete and Corrugated Metal Culvert Pipes*. Minneapolis : University of Minnesota, St. Anthony Falls hydraulic laboratory, 1950. Dostupné také z: http://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/107907/1/tp_003b.pdf.
- Obr. 24 Figure 7. Comparison of Head Discharge Curves [graf]. V: *Tests on Circular-Pipe-Culvert Inlets* 1955. Dostupné také z: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbulletin/126/126-002.pdf>.
- Obr. 25 Fig. 1. Culvert inlet types: (a) projecting; (b) flush headwall; (c) tapered; (d) stepped taper; (e) Armtec; (f) cylinder [obrázek]. V: *Culvert inlet efficiency*. [Online] na str. 612. *Can. J. Civ. Eng.* Vol, 22; 1995. [Citace: 3. srpen 2016.]. <http://thirdworld.nl/culvert-inlet-efficiency>.
- Obr. 26 Fig. 2. Inlet control curves for various inlets [graf]. V: *Culvert inlet efficiency*. [Online] na str. 614. *Can. J. Civ. Eng.* Vol, 22; 1995. [Citace: 3. srpen 2016.]. <http://thirdworld.nl/culvert-inlet-efficiency>.
- Obr. 27 Fig. 3. Inlet loss coefficients for various inlets [graf]. V: *Culvert inlet efficiency*. [Online] na str. 615. *Can. J. Civ. Eng.* Vol, 22; 1995. [Citace: 3. srpen 2016.]. <http://thirdworld.nl/culvert-inlet-efficiency>.
- Obr. 28 FIG. 1. Culvert with Free Outlet, Notation [obrázek]. V: *Generalized Culvert Design Diagram*. na str. 1. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Vol. 124, 1998, No. 5.
- Obr. 29 FIG. 2. Generalized Culvert Diagram [graf]. V: *Generalized Culvert Design Diagram*. na str. 2. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Vol. 124, 1998, No. 5.
- Obr. 30 FIG. 3. Discharge-Head Equation [graf]. V: *Generalized Culvert Design Diagram*. na str. 2. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Vol. 124, 1998, No. 5.
- Obr. 31 Výtok zatopen dolní vodou [obrázek]. V: *Proudění mostními objekty a propustky* [online prezentace]. [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/prednasky/HY2V_08_Mosty_propustky.pdf
- Obr. 32 Obr. 10. 7 Kruhové propustky s volnou hladinou, volným vtokem a výtokem 1a) [obrázek]. V: *Hydraulika 11, Příklady* [kniha] na str. 276. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-01586-6.
- Obr. 33 Obr. 10. 7 Kruhové propustky s volnou hladinou, volným vtokem a výtokem 1b) [obrázek]. V: *Hydraulika 11, Příklady* [kniha] na str. 276. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-01586-6.
- Obr. 34 Obr. 10. 8 Propustek s volnou hladinou, ale vtokem zatopeným dolní vodou [obrázek]. V: *Hydraulika 11, Příklady* [kniha] na str. 277. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-01586-6.



- Obr. 35 Obr. 10. 9 Kruhové propustky s volnou hladinou, zatopeným vtokem a volným výtokem [obrázek]. V: *Hydraulika 11, Příklady* [kniha] na str. 278. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-01586-6.
- Obr. 36 Obr. 10. 10 Ovlivnění zatopeného vtoku kruhového propustku dolní vodou [obrázek]. V: *Hydraulika 11, Příklady* [kniha] na str. 279. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-01586-6.
- Obr. 37 Obr. 13 Vniknutí vzduchu do vtoku při tlakovém průtoku [obrázek]. V: *Hydraulické výpočty propustků a mostů* [kniha] na str. 11. Praha: Státní nakladatelství technické literatury n. p., 1956.
- Obr. 38 Obr. 9 Jedna z forem přechodu k zahlcení celého propustku [obrázek]. V: *Hydraulické výpočty propustků a mostů* [kniha] na str. 10. Praha: Státní nakladatelství technické literatury n. p., 1956.
- Obr. 39 Obr. 10. 11 Výtok z propustku není zatopen dolní vodou [obrázek]. V: *Hydraulika 11, Příklady* [kniha] na str. 279. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-01586-6.
- Obr. 40 Obr. 10. 12 Tlakový propustek se zatopeným výtokem [obrázek]. V: *Hydraulika 11, Příklady* [kniha] na str. 280. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-01586-6.
- Obr. 41 Obr. 5. Nikuradseho graf [graf]. V: *Matematické s fyzikální modelování v hydrotechnice [1] Výzkum na hydraulických modelech a ve skutečnosti* [kniha] na str. 61. Praha : Academia, 1987.
- Obr. 73 *k podložení obrázku je použit:* Fig. 3. Inlet loss coefficients for various inlets [graf]. V: *Culvert inlet efficiency*. [Online] na str. 615. Can. J. Civ. Eng. Vol, 22; 1995. [Citace: 3. srpen 2016.]. <http://thirdworld.nl/culvert-inlet-efficiency>.
- Obr. 77 *k podložení obrázku je použit:* CHART 51A; Inlet Control-Headwater Depth for Circular or Elliptical Structural Plate [graf] V: *Hydraulic Design of Highway Culverts - HDS-5 - Third Edition*. [Online] 2012 na str. 248. [Citace: 18. 8. 2016.]. <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/12026/hif12026.pdf>.
- Obr. 78 *k podložení obrázku je použit:* Fig. 3. Inlet loss coefficients for various inlets [graf]. V: *Culvert inlet efficiency*. [Online] na str. 615. Can. J. Civ. Eng. Vol, 22; 1995. [Citace: 3. srpen 2016.]. <http://thirdworld.nl/culvert-inlet-efficiency>.
- Obr. 83 *k podložení obrázku je použit:* Fig. 3. Inlet loss coefficients for various inlets [graf]. V: *Culvert inlet efficiency*. [Online] na str. 615. Can. J. Civ. Eng. Vol, 22; 1995. [Citace: 3. srpen 2016.]. <http://thirdworld.nl/culvert-inlet-efficiency>.
- Obr. 85 Tab. 1 Kruhový profil částečně plněný [obrázek - tabulka]. V: *Hydraulické výpočty propustků a mostů* [kniha] na str. 15. Praha: Státní nakladatelství technické literatury n. p., 1956.
- Obr. 86 Figure A1.1 Sketches of inlet types and edge types [obrázek]. V: *Culvert design operation guide*. London : CIRIA, 2010. na str. 262. Dostupné také z: http://www.ciria.org/Resources/Free_publications/C689.aspx. ISBN: 978-0-86017-689-3.
- Obr. 87 Moodyho diagram [graf]. V: *Hydraulika 141 HYA – tabulky* [online]. Na str. 2. [Citace: 29. listopad 2016]. Dostupné také z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/Hya/ke_stazeni/cviceni/tabulky_1.pdf.



Obr. 88 Figure 6. Inlet Details. Side Elevations [obrázek]. V: *Tests on Circular-Pipe-Culvert Inlets* 1955. Dostupné také z: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbulletin/126/126-002.pdf>.

Obr. 89 Příloha 3: Schéma malého hydraulického žlabu [obrázek]. *Ovlivnění průchodu velkých vod mostními objekty na malých vodních tocích* [dizertační práce]. [Online] na str. 114. [Citace 29. listopad 2016]. Dostupné také z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/vyzkum/nejistoty/mostni_objekty_soubory/picek-disertace.pdf.



Seznam tabulek

<i>Tab. 1 ČSN 73 6201 doporučené rozměry otvoru propustku</i>	<i>14</i>
<i>Tab. 2 Uplatňující se vlivy při návrhu propustku; pozn. pro situaci, kdy má hlavní vliv vtok se vlivy plochy a tvaru příčného profilu vztahují ke vtoku do propustku, v případě že je hlavní vliv výtoku tak, se tyto vlivy vztahují k celé délce propustku</i>	<i>18</i>
<i>Tab. 3 Hodnoty součinitelů: místní ztráty, rychlosti, výškového zúžení a zatopení; jedná se o bezrozměrné součinitele; příslušející geometrie vtoku jsou znázorněny na Obr. 19.....</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 4 Doporučené návrhové hodnoty součinitelů pro vlnitý plech a beton.....</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 5 Zjednodušené výpočtové vztahy pro kruhový propustek s drsností $n=0,013$; úpravy toku lze nalézt na Obr. 19</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 6 Zjednodušené výpočtové vztahy pro kruhový propustek s drsností $n=0,013$; úpravy toku lze nalézt na Obr. 19</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 7 Přehled provedených experimentů na fyzikálních modelech vtoků do propustku</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 8 V tabulce je přibližný rozsah poměru y_h (hladina horní vody) a D (průměr propustku), pro který se při experimentech objevovaly víry; vyhodnocení bylo provedeno jen pro základní typy vtoků</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 9 Vyhodnocení a srovnání experimentem určených hodnot součinitele κ s hodnotami současně používanými; srovnání vtoku II je provedeno s vtokem, který je podobný, leč bohužel ne úplně stejný, neboť v dostupné literatuře není stejná geometrie, jako má vtok II</i>	<i>74</i>
<i>Tab. 10 Experimentem určené hodnoty součinitele zatopení vtoku β srovnávané s hodnotami používanými současnou metodikou; vtoky II a III jsou srovnány pouze s geometricky podobným vtokem, ale ne stejným vtokem, protože pro stejná geometrie nebyla v žádném nalezeném zdroji měřena</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 11 Srovnání hodnot součinitele ξ (vztaženého k profilu zúžené hloubky) získaných z experimentů s hodnotami z dostupné literatury; pro vtok BP jsou uvedeny hodnoty pro hodnoty s neupraveným a upraveným průtokem.....</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 12 Prezentační příklad výsledků výpočtu podle naměřených konzumčních křivek - propustek o průměru $D=1,0$ m zatěžován různými průtoky; výsledkem výška hladiny před propustkem; pomocí barevných škál zvýrazněno maximum (červeně = nejhorší výsledek) a minimum (zeleně = nejlepší výsledek) a hodnoty mezi těmito extrémy; zvýraznění bylo provedeno také pomocí barevných pruhů</i>	<i>86</i>
<i>Tab. 13 Základní statistický popis výsledných hodnot součinitele ξ pro tlakový režim proudění uvnitř propustku s kruhovým příčným profilem.....</i>	<i>94</i>
<i>Tab. 14 Hodnoty součinitele ξ pro kruhový profil podle dostupné literatury.....</i>	<i>94</i>
<i>Tab. 15 Souhrn dosahovaných Reynoldsových čísel pro modely v tlakovém režimu proudění.....</i>	<i>95</i>
<i>Tab. 16 Hodnoty relativní drsnosti pro modely v tlakovém režimu proudění; předpokládaná drsnost $\Delta=0,00001$ m</i>	<i>95</i>



Zdroje tabulek

- Tab. 1 Tab. 13.1 – Doporučené rozměry otvorů propustků [tabulka]. V: ČSN 73 6200. *Mosty – Terminologii a třídění*. [Norma] na str. 48. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, červenec 2011.
- Tab. 2 Table 1. 1 Factors Influencing Culvert Design [tabulka] V: *Hydraulic Design of Highway Culverts - HDS-5 - Third Edition*. [Online] 2012. [Citace: 18. 8. 2016.]. <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/12026/hif12026.pdf>.
- Tab. 3 Tabulka 10.1 Hodnoty součinitelů ztrát ζ , rychlosti φ , výškového zúžení κ a zatopení β [tabulka] na str. 66. V: *Technické podmínky 204: Hydrotechnické posouzení mostních objektů na vodních tocích*. Praha : Ministerstvo dopravy, Odbor infrastruktury, 2009. Dostupné také z: <http://www.pjpk.cz/TP%20204.pdf>.
- Tab. 4 Table III Recommended design coefficients for corrugated metal and concrete culverts [tabulka]. V: *Hydraulic Data Comparison of Concrete and Corrugated Metal Culvert Pipes*. Minneapolis : University of Minnesota, St. Anthony Falls hydraulic laboratory, 1950. Dostupné také z: http://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/107907/1/tp_003b.pdf.
- Tab. 5 Tab. 10.3 Zjednodušené výpočtové vztahy kruhových propustků s volnou hladinou, volným vtokem a výtokem / $n=0,013$ /. [tabulka] na str. 277. V: *Hydraulika 11, Příklady* [kniha]. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-01586-6.
- Tab. 6 Tab. 10.4 Zjednodušené výpočtové vztahy kruhových propustků s volnou hladinou, zatopeným vtokem a volným výtokem /beton, $n=0,013$ /. [tabulka] na str. 278. V: *Hydraulika 11, Příklady* [kniha]. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-01586-6.



Přílohy

Příloha 1 – tabulka: kruhový profil částečně plněný

Poměr plnění $\frac{h}{d}$	Poměrné hodnoty			Kritická funkce $\frac{\alpha Q^2}{g d^5}$	Poměrné moduly	
	průtočné plochy $\frac{F}{\frac{1}{4}\pi d^2}$	omoč. obvodu $\frac{0}{\pi d}$	hydraul. poloměru $\frac{R}{d}$		průtoku $\frac{K_h}{K_d}$	rychlosti $\frac{W_h}{W_d}$
	0,05	0,0191	0,1445		0,033	—
0,10	0,0525	0,2055	0,0638	—	0,017	0,333
0,15	0,0935	0,253	0,0922	—	0,043	0,457
0,20	0,1427	0,2955	0,121	0,001	0,080	0,565
0,25	0,1954	0,333	0,147	0,005	0,129	0,661
0,30	0,253	0,3695	0,171	0,009	0,188	0,748
0,35	0,3115	0,403	0,193	0,016	0,256	0,821
0,40	0,374	0,437	0,214	0,025	0,332	0,889
0,45	0,436	0,468	0,233	0,040	0,414	0,948
0,50	0,500	0,500	0,250	0,060	0,500	1,000
0,55	0,564	0,532	0,265	0,088	0,589	1,045
0,60	0,626	0,563	0,277	0,121	0,678	1,083
0,65	0,689	0,597	0,288	0,166	0,766	1,113
0,70	0,747	0,631	0,296	0,220	0,850	1,137
0,75	0,805	0,667	0,301	0,294	0,927	1,152
0,80	0,857	0,705	0,304	0,382	0,994	1,159
0,85	0,906	0,747	0,303	0,500	1,048	1,157
0,90	0,948	0,795	0,298	0,685	1,082	1,142
0,95	0,981	0,856	0,287	1,035	1,087	1,108
1,00	1,000	1,000	0,250	∞	1,000	1,000

Obr. 85 V této tabulce jsou pro částečně plněný kruhový profil sestaveny průtočné plochy, omočené obvody, průtokové moduly, moduly rychlosti a především tzv. kritická funkce. Tabulka je převzata z publikace: Hydraulické výpočty propustků a mostů [8]



Příloha 2 – hodnoty součinitele místní ztráty ξ užívané v USA a schémata vtoků

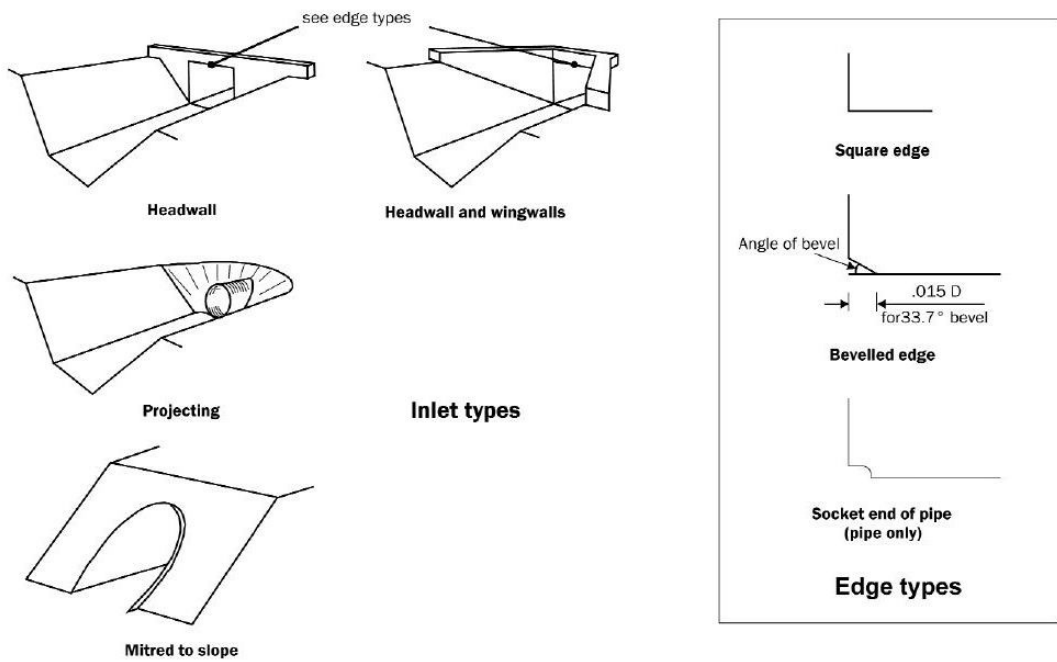
Outlet Control, Full or Partly Full Entrance Head Loss

Type of Structure and Design of Entrance	Coefficient K_e
<u>-Pipe, Concrete</u>	
Projecting from fill, socket end (groove-end)	0.2
Projecting from fill, sq. cut end	0.5
Headwall or headwall and wingwalls:	
Socket end of pipe (groove-end)	0.2
Square-edge	0.5
Rounded (radius = $D/12$)	0.2
Mitered to conform to fill slope	0.7
*End-Section conforming to fill slope	0.5
Beveled edges, 33.7o or 45o bevels	0.2
Side -or slope- tapered inlet	0.2
<u>- Pipe or Pipe-Arch. Corrugated Metal</u>	
Projecting from fill (no headwall)	0.9
Headwall or headwall and wingwalls square edge	0.5
Mitered to conform to fill slope, paved or unpaved slope	0.7
*End-Section conforming to fill slope	0.5
Beveled edges, 33.7o or 45o bevels	0.2
Side -or slope- tapered inlet	0.2
<u>- Box, Reinforced Concrete</u>	
Headwall parallel to embankment (no wingwalls)	0.5
Square-edged on 3 edges	0.2
Rounded on 3 edges to radius of $D/12$ or $B/12$ or beveled edges on 3 sides	
Wingwalls at 30o to 75o to barrel:	0.4
Square-edged at crown	0.2
Crown edge rounded to radius of $D/12$: or beveled top edge	
Wingwalls at 10o to 25o to barrel:	0.5
Square-edged at crown	
Wingwalls parallel (extension of sides):	
Square-edged at crown	0.7
Side-or slope- tapered inlet	0.2

*Note: "End Sections conforming to fill slope," made of either metal or concrete, are the sections commonly available from manufacturers. From limited hydraulic tests they are equivalent in operation to a headwall in both inlet and outlet control. Some end sections, incorporating a closed taper in their design have a superior hydraulic performance. These latter sections can be designed using the information given for the beveled inlet.

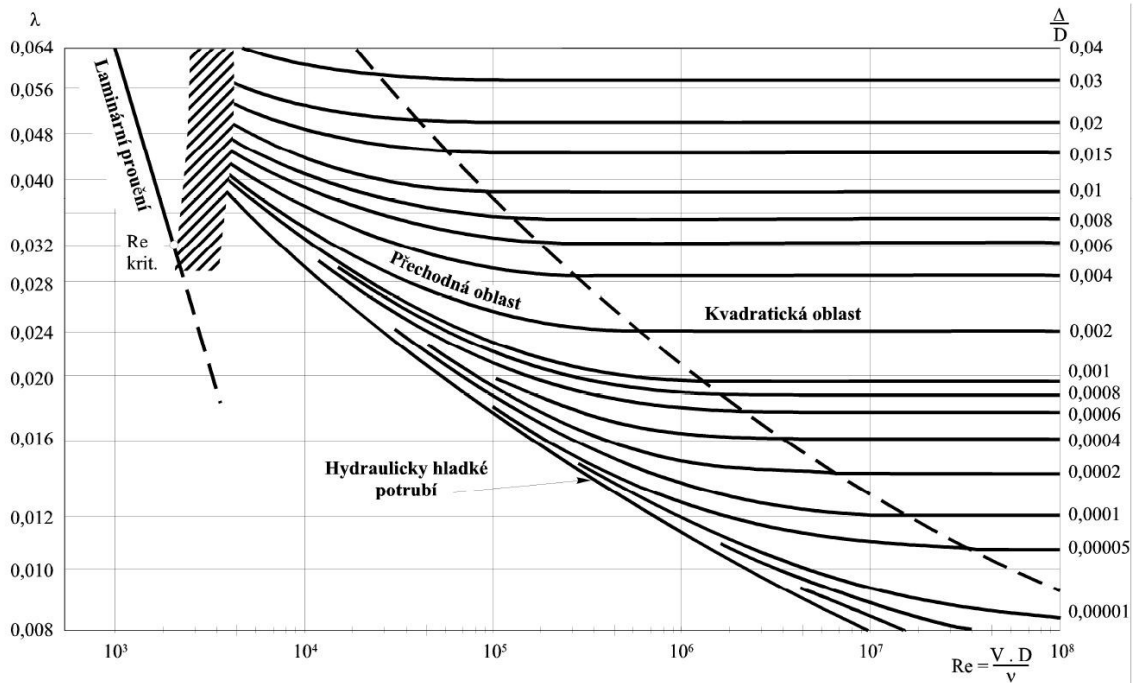


Sketches of inlet types and edge types



Obr. 86 Schémata typů vtoků a hran vtoků s anglickými názvy

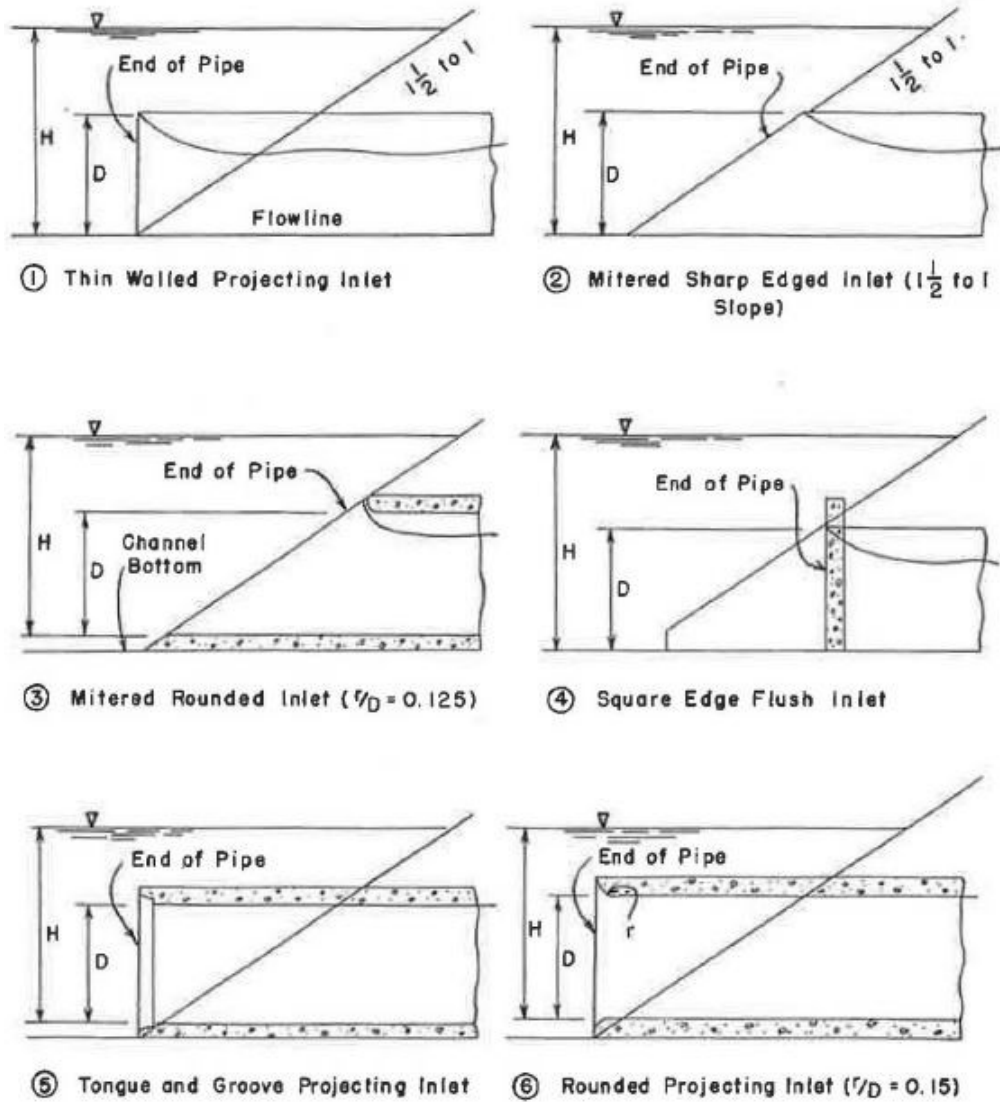
Příloha 3 – Moodyho diagram



Obr. 87 Moodyho diagram

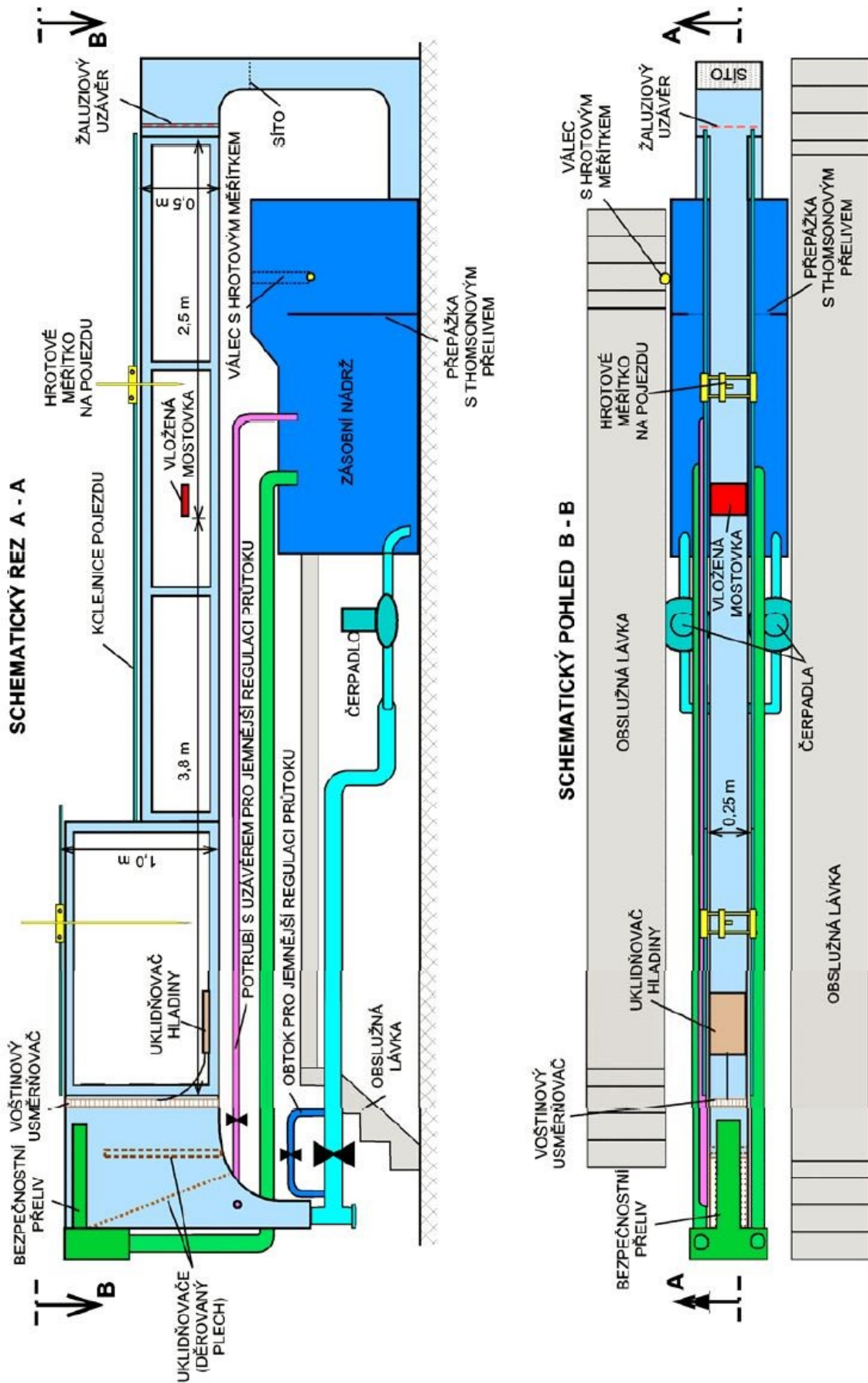


Příloha 4 – schémata vtoků řešených v publikaci *Tests on Circular-Pipe-Culvert Inlets* (1955)



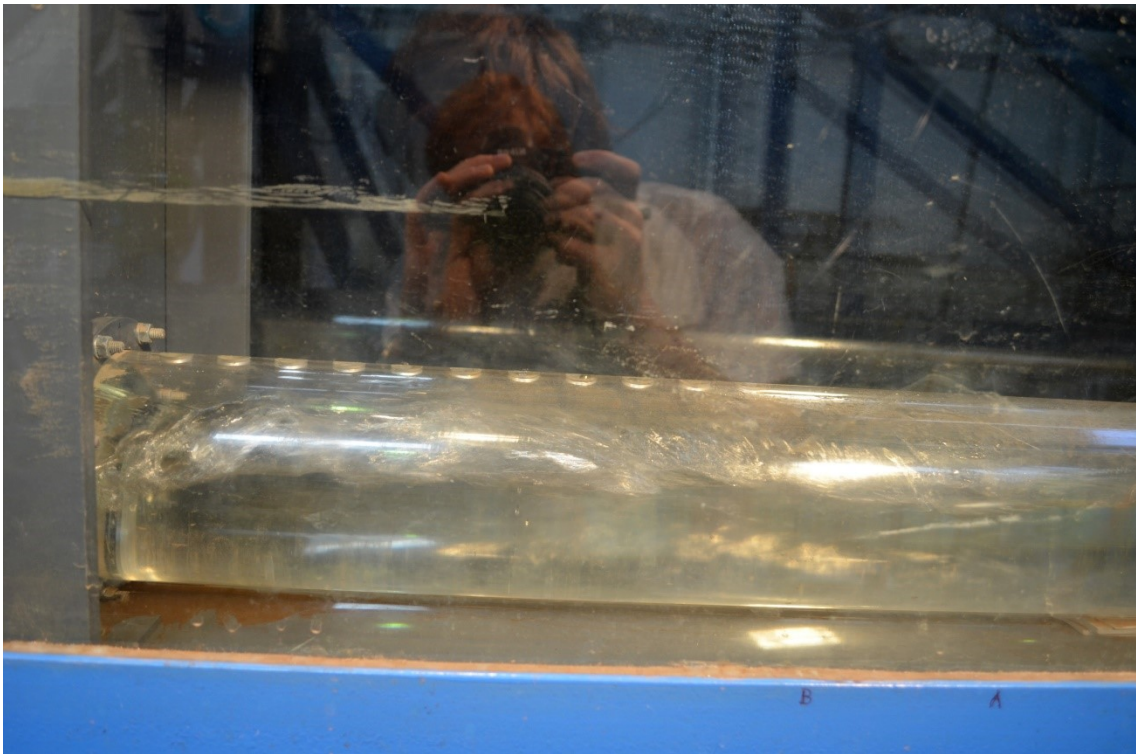
Obr. 88 Schémata vtoků propustků řešených výzkumem v USA Schillerem; článek *Tests on Circular-Pipe-Culvert Inlets* (1955)

Příloha 5 – schéma hydraulického žlabu B25

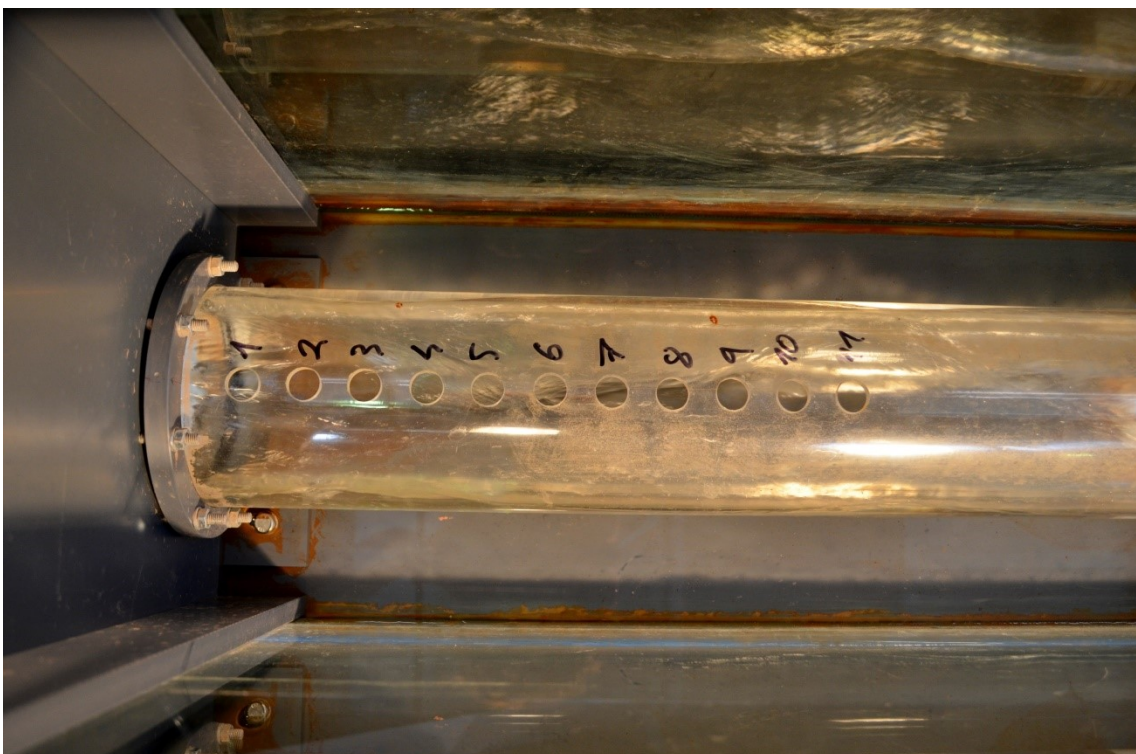


Obr. 89 Schéma hydraulického žlabu B25 vytvořené Ing. Tomášem Pickem, Ph.D.

Příloha 6 – doplňující fotografie z experimentů



Obr. 90 Proudění uvnitř propustku (proudění o volné hladině) při průtoku 10 l/s, měřená geometrie – vtok I



Obr. 91 „Šípkové“ zvlnění hladiny v propustku při průtoku 6 l/s; na obrázku jsou dobře patrné všechny měřicí otvory v rouři propustku



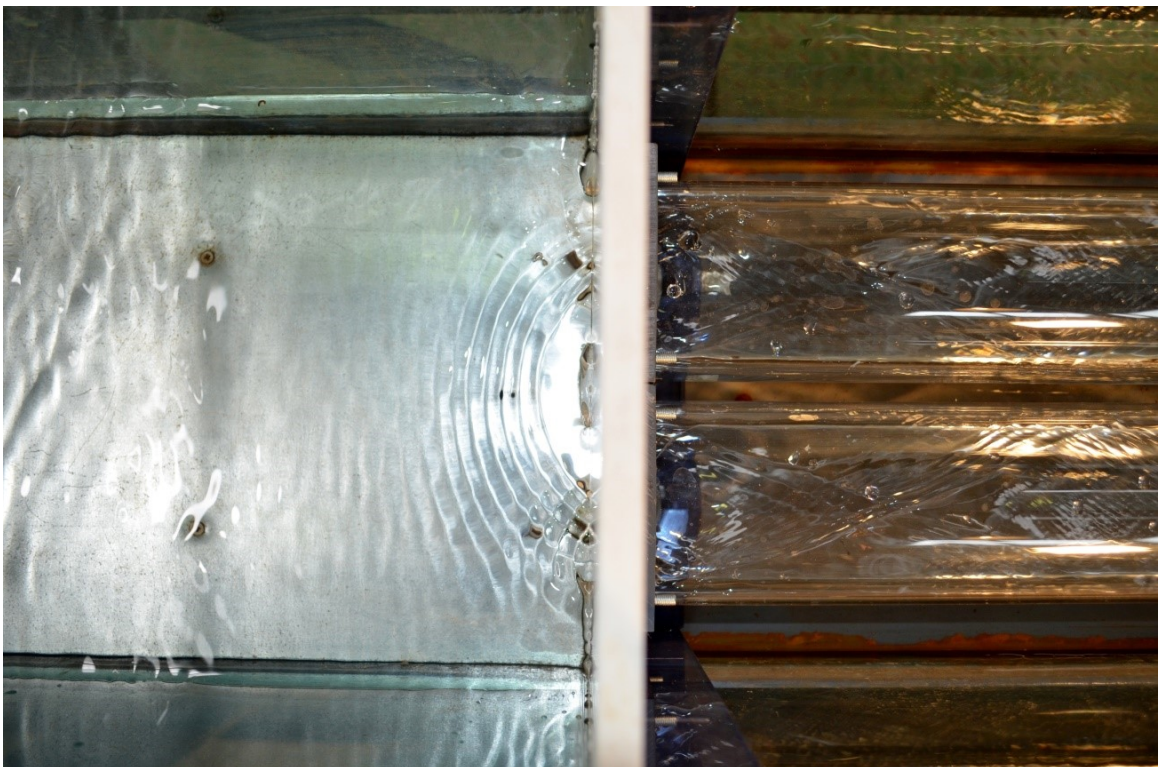
Obr. 92 Volný výtok z propustku při průtoku 15,3 l/s, což byla maximální kapacita modelu s vtokem I



Obr. 93 Snížení hladiny před vtokem při průtoku 4,5 l/s (vtok I)



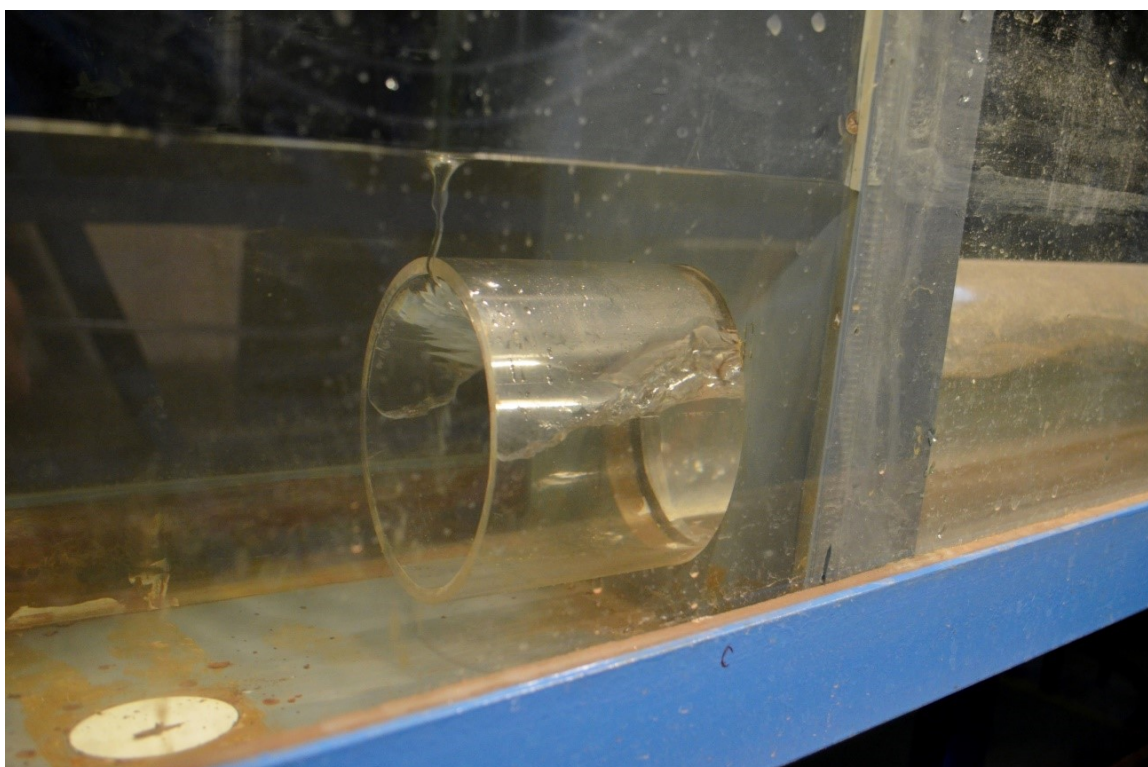
Obr. 94 Utěsnění měřících otvorů v rouře modelu pomocí gumové podložky, plastového dílce a gumy



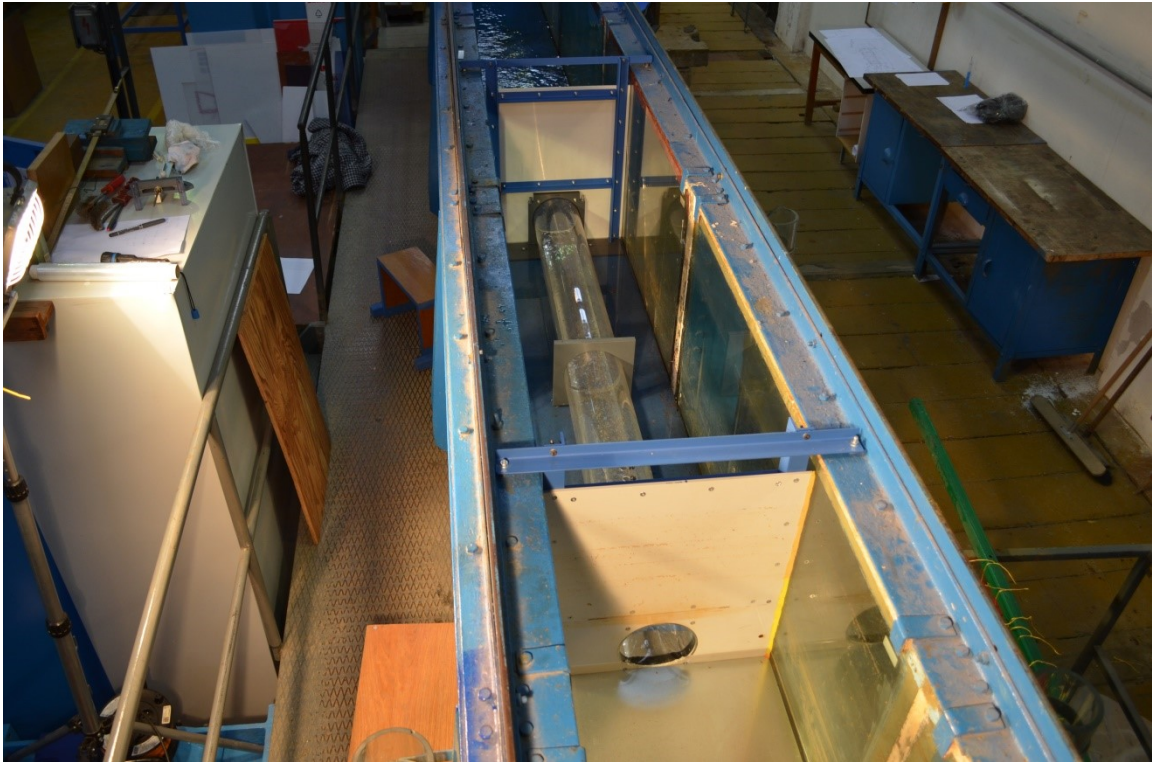
Obr. 95 Pohled shora na proudění ve dvou propustcích; geometrie vtoku la



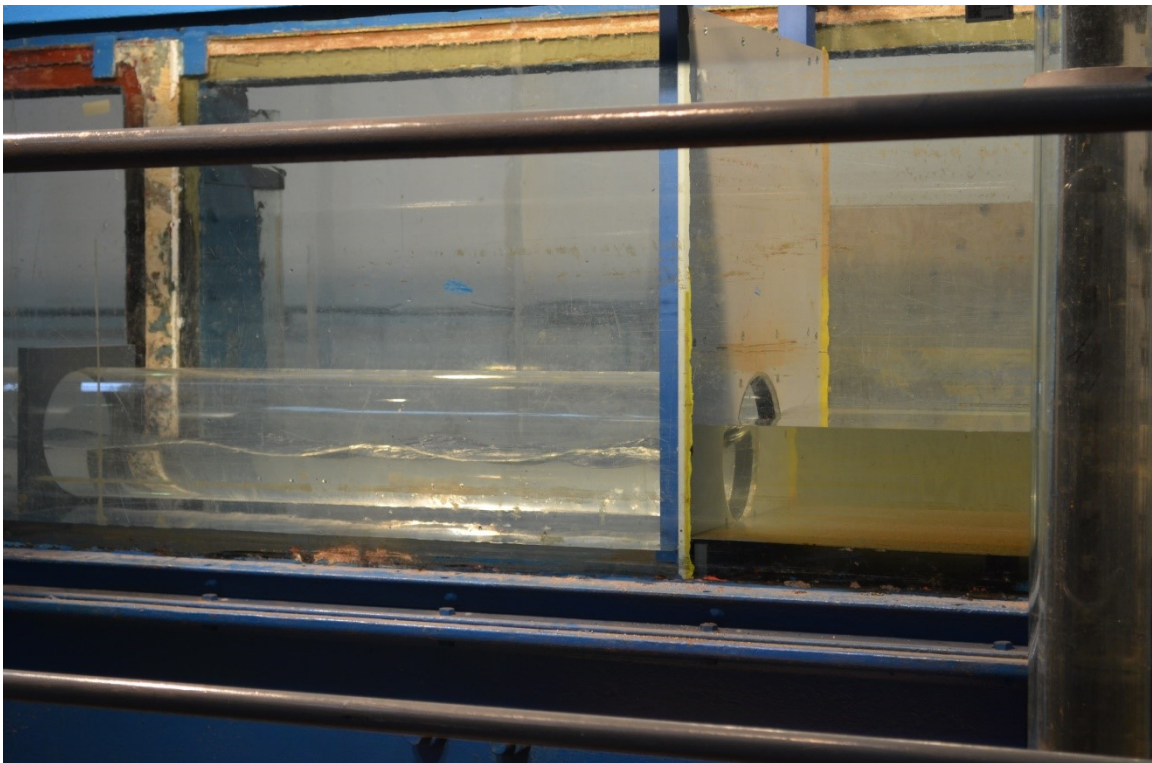
Obr. 96 Fotografie zahlčeného vtoku III; autorem fotografie je Ing. Tomáš Pícek, PhD.



Obr. 97 Vír u toku IV při průtoku 7,0 l/s při zahlčeném vtoku a proudění o volné hladině uvnitř propustku



Obr. 98 Fotografie fyzikálního z bakalářské práce (vtok BP); model je umístěn v hydraulickém žlabu B50, který je 0,5 m široký



Obr. 99 Fotografie fyzikálního modelu z bakalářské práce; průtok v okamžiku fotografování je 9,0 l/s