

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra hydrauliky a hydrologie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Modelový výzkum proudění na vtoku do propustku

Modeling research of the inlet flow to the culvert

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby
Vedoucí práce: Doc. Ing. Aleš Havlík, CSc.

Jiří Wildt

Praha 2017



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Wildt

Jméno: Jiří

Osobní číslo: 423797

Zadávací katedra: Katedra hydrauliky a hydrologie

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Modelový výzkum proudění na vtoku do propustku

Název bakalářské práce anglicky: Modelling research on the flow inlet into the culvert

Pokyny pro vypracování:

Zpracování přehledu stávajících poznatků o charakteru proudění na vtoku do propustku při proudění s volnou hladinou. Zpracování 3D matematického modelu propustku s různými typy konstrukčního provedení vtoku. Kalibrace modelu na základě výstupů z fyzikálního modelu, analýza součinitele ztráty na vtoku a velikosti a umístění zúžené hloubky za vtokem..

Seznam doporučené literatury:

Jméno vedoucího bakalářské práce: Doc. Ing. Aleš Havlík, CSc.

Datum zadání bakalářské práce: 2. 3. 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 28. 5. 2017

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

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

2. 3. 2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně pod vedením Doc. Ing. Aleše Havlíka, CSc. a použil jsem k tomu pouze literaturu, která je uvedena na konci této práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne Jiří Wildt

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou součinitele místní ztráty vtokem do propustku při současném posouzení velikosti zúžené hloubky a její vzdálenosti od vtoku. Analýza byla provedena na propustku s šikmým čelem a na propustku s předsazeným vtokem za použití 3D matematického modelování. V práci jsou popsány propustky a současně používaná metodika výpočtu jejich kapacity, nastavení použitého matematického modelu a vyhodnocení výsledků.

Klíčová slova

Kruhový propustek, místní ztráta na vtoku do propustku, zúžená hloubka, matematické modelování, CFD, Ansys CFX.

Annotation

This bachelor thesis is focused on analysis of a loss of energy coefficient by the inlet to the culvert while evaluating the size of decreased depth past the inlet and its distance from it. The analysis was performed by mathematical 3D modelling on the culvert with oblique head and the inlet placed in front of the head. The thesis describes culverts and their current methodology of calculation, setting of the used mathematical model and the evaluation of results.

Keywords

Circular culvert, loss of energy by the inlet to the culvert, decreased depth, mathematical modelling, CFD, Ansys CFX.

Poděkování

Zde bych rád poděkoval Doc. Ing. Aleši Havlíkovi, CSc. za vedení a konzultování této bakalářské práce. Velké poděkování patří Ing. Evě Škařupové za pomoc a rady při nastavení matematického modelu a také za konzultaci části práce zabývající se matematickým modelováním. Také děkuji Lucii Vodrážkové za poskytnutí podkladů pro zpracování analýzy propustku s předsazeným vtokem. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Tomáši Pickovi, Ph.D. za poskytnutá data z fyzikálních modelů a Dr. Ing. Petru Nowakovi za užitečné připomínky.

Výstupy z této práce jsou součástí grantového úkolu TAČR TA04030373 „Zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti propustků s ohledem na převádění povodňových průtoků“ řešeného na katedře hydrauliky a hydrologie – České vysoké učení technické v Praze – Fakulta stavební.

Obsah

Anotace	1
Poděkování.....	2
Obsah	3
1. Úvod	5
2. Propustky	6
2.1. Části propustků	6
2.2. Světlost a sklon propustků	6
2.3. Režim proudění v propustcích (kruhového profilu) a současná metodika řešení	7
2.3.1. Proudění o volné hladině	7
2.3.2. Proudění o volné hladině se zahlceným vtokem	9
2.3.3. Tlakové proudění.....	10
2.4. Typy vtokových částí trubních propustků	11
3. Zjištěné nepřesnosti v současné metodice řešení vtoku do propustku.....	12
4. Matematické modelování proudění tekutin (CFD)	14
4.1. Výchozí rovnice pro matematické modelování proudění tekutin.....	14
4.2. RANS simulace turbulentního proudění	14
4.3. Program Ansys CFX.....	15
4.3.1. Metoda konečných objemů	15
5. Postup modelování	16
5.1. Řešené typy vtoků do propustků	16
5.2. Řešené vodní stavy.....	16
5.3. Geometrie	16
5.4. Výpočetní síť.....	18
5.5. Okrajové podmínky	19
5.5.1. Vtok do modelu – INLET	19
5.5.2. Výtok z modelu - OPENNING.....	20
5.5.3. Zavzdušnění - OPENNING	20
5.5.4. Volná hladina v nátokovém žlabu – OPENNING	21
5.5.5. Pevné stěny modelu - WALL.....	21
5.6. Počáteční podmínka.....	22
5.7. Výpočet a jeho konvergence.....	22
5.8. Kalibrace modelu	23

6.	Vyhodnocení	26
6.1.	Propustek s šikmým čelem.....	27
6.2.	Propustek s předsazeným vtokem	31
6.3.	Propustek s kolmým čelem při změně směru před propustkem	35
6.4.	Porovnání řešených propustků	36
6.5.	Porovnání výšky hladiny před propustkem.....	38
7.	Závěr.....	39
8.	Seznam použité literatury	40
9.	Přílohy	41

1. Úvod

Cílem této bakalářské práce je analýza součinitele ztráty na vtoku do kruhového propustku, zjištění velikosti zúžené hloubky a jejího umístění za vtokem do propustku. V práci jsou řešeny propustky při proudění s volnou hladinou a při proudění se zahlceným vtokem bez tlakového proudění, v obou případech bez ovlivnění dolní vodou.

Analýza byla provedena pomocí 3D matematického modelování, kde jako kalibrační model posloužil kruhový propustek s kolmým čelem. Analýza propustku s kolmým čelem byla řešena již dříve pomocí fyzikálního modelování. Tato práce se zabývá propustky kruhového profilu s šikmým čelem, s předsazeným vtokem a s kolmým čelem při změně směru před propustkem.

Téma vzniklo na základě výzkumu na fyzikálním modelu propustku s kolmým čelem. Zde bylo zjištěno, že stávající hodnoty ztrátových součinitelů odvozených z teorie, které bývají uvedeny v každé literatuře zaměřené na hydrauliku propustků, jsou pravděpodobně nadhodnocené. Další rozpory s používanou literaturou se objevily při určování zúžené hloubky. Cílem této práce je zjistit, jak se chovají ostatní typy vtokových úprav propustků, které je obtížné nebo nemožné posoudit pomocí fyzikálního modelování.

Úvodní část práce se zabývá popisem propustků, jejich rozdělením, popisem proudění vody v nich, aktuálně používanou metodikou výpočtu jejich kapacity a již zjištěnými výsledky na fyzikálním modelu. V této části je řešeno hlavně proudění o volné hladině a o volné hladině se zahlceným vtokem na propustcích kruhového příčného profilu.

Následuje kapitola věnující se matematickému modelování proudění tekutin. Zde jsou popsány rovnice, ze kterých matematické modelování vychází, použita simulace turbulentního proudění, program Ansys CFX a metoda konečných objemů.

Další část pojednává o vlastním nastavení modelu a výpočtu, kde je nastíněný celý postup tohoto výzkumu. K hlavním podkapitolám patří popis geometrie, popis výpočetní sítě, použité okrajové podmínky a kalibrace modelu.

V poslední části je vyhodnocení výsledků a závěr. Výsledky jsou vyhodnoceny pro každý řešený typ propustku samostatně a po té jsou mezi sebou porovnány v přehledných grafech. V závěru práce je zhodnocení celého výzkumu a shrnutí výsledků.

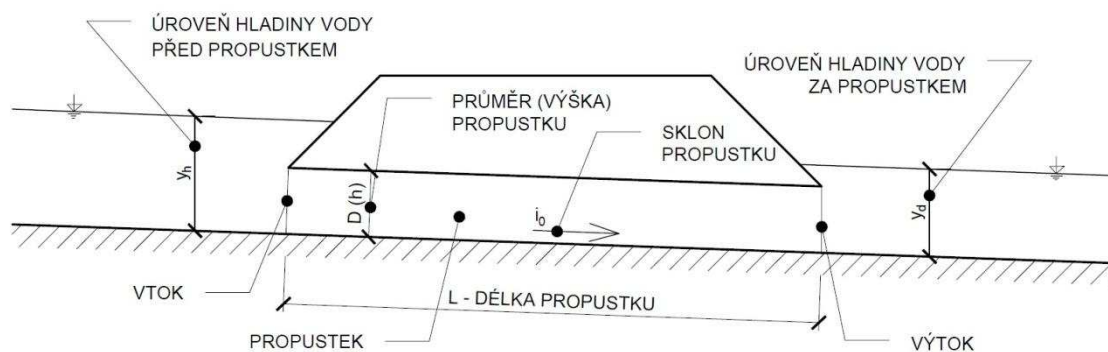
Zpřesnění součinitele vtokové místní ztráty může být přínosem pro navrhování propustků při proudění o volné hladině.

2. Propustky

Za propustek je považován mostní objekt o šířce, resp. průměru mostního otvoru od 0,4 m do 2 m včetně, kdežto objekt s mostním otvorem nad touto hranicí se nazývá most[1]. Propustek je objekt, který se vyznačuje stálým průřezem a stálým sklonem dna po celé své délce[2]. Nejčastěji slouží pro převedení stálých nebo občasných vod příčně pod zemním tělesem komunikace popřípadě železnice[3]. Oproti mostu, kde se počítá jen s energetickými ztrátami vtokem a výtokem, se u propustku musí počítat i se ztrátami třením, jelikož jeho délka je vzhledem k jeho ostatním rozměrům významná[4]. Příčný průřez propustků je nejčastěji kruhový nebo obdélníkový. Lze ho ale také řešit jako parabolický, vejčitý nebo tlamový. Z hydraulického hlediska a z hlediska migrace živočichů je nejméně výhodnější obdélníkový profil, ovšem v praxi se nejvíce využívá kruhových profilů[3],[5].

2.1. Části propustků

Propustek je tvořen třemi hlavními částmi, a ty jsou vtok do propustku, propustek a výtok z propustku. Ve vtokové části propustku nejčastěji dochází k přechodu z otevřeného příčného profilu koryta do uzavřeného profilu propustku. Tento přechod je doprovázen významnými energetickými ztrátami v důsledku náhlého zúžení proudu. Ve vlastním tělese propustku dochází ke ztrátám třením. Nakonec ve výtokové části nastává přechod z uzavřeného profilu propustku do otevřeného koryta a dochází zde k místní ztrátě náhlým rozšířením proudu.[4]



Obrázek 1 Podélný profil propustku

2.2. Světlost a sklon propustků

Rozměry otvorů se odvíjejí od hydrotechnického výpočtu. Norma ČSN 73 6201 uvádí jako minimální světlost vnitřního otvoru 600 mm a to jen v případech, kdy délka propustku nepřekročí 15 m. Rozhodující pro volbu vhodné velikosti otvoru jsou sklon, délka a také požadavky na čištění a revize.[6](Tabulka 1)

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

Tabulka 1 Doporučené rozměry otvoru [6]

Sklon propustku by se měl pohybovat v rozmezí od 0,5 do 5,0 %. Pokud je potřeba větší podélný sklon, tak je nutné jej opatřit konstrukčním tlumením kinetické energie proudu.[6]

2.3. Režim proudění v propustcích (kruhového profilu) a současná metodika řešení

Režim proudění vody v propustku a v jeho blízkosti je velmi složitá záležitost. Převážně je doprovázeno přechodem mezi bystřinným a říčním prouděním, nebo mezi prouděním o volné hladině a tlakovým prouděním. Režim proudění je závislý na sklonu dna propustku, na délce propustku, na tvaru a na velikosti příčného profilu. Dále také závisí na tvarovém řešení vtoku a výtoku z propustku.[3]

Podle režimu proudění lze propustky rozdělit do 3 hlavních skupin:

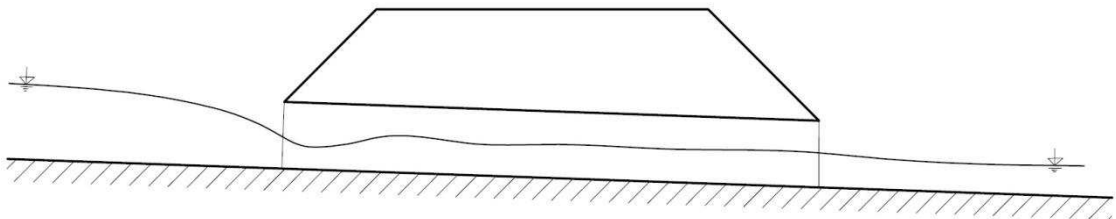
- s prouděním o volné hladině,
- s prouděním o volné hladině se zahlceným vtokem,
- s tlakovým prouděním.[7]

2.3.1. Proudění o volné hladině

Celým propustkem, včetně vtoku a výtoku, protéká voda beztlakově o volné hladině. Jinými slovy plocha příčného průřezu propustku není v žádném místě vyplněna vodou. Proudění vody může být v říčním, bystřinném nebo přechodném kritickém režimu.[8]

Proudění o volné hladině se dá ještě rozdělit na propustky:

- s volným vtokem neovlivněným dolní vodou,
- s volným vtokem ovlivněným dolní vodou.[8]



Obrázek 2 Proudění o volné hladině

Nahlížíme-li do literatury zabývající se současným řešením proudění vody v propustcích [4], nalezneme toto. Hranici mezi zahlceným a nezahlceným vtokem udává následující nerovnice (Rce 2.1). Nerovnice říká, že pokud je součin součinitele zatopení vtoku β a průměru propustku D větší než výška hladiny před propustkem y_h , pak se jedná o nezahlcený vtok do propustku. V opačném případě jde o vtok zahlcený. Hodnoty součinitele β závisí na použitém typu vtokové úpravy a nalezneme je v tabulkách (Tabulka 2). [4]

$$y_h < \beta \cdot D \quad (2.1)$$

Kde y_h – výška hladiny vody v profilu před propustkem [m]
 β – součinitel zatopení vtoku [-]
 D – průměr propustku [m]

Změnou průřezu ve vtoku do propustku, pokud proudění není ovlivněno dolní vodou, se hladina snižuje na zúženou hloubku y_c . Tuto hodnotu stačí jednoduše vyčíslit rovnicí (Rce 2.2). y_k je kritická hloubka, která odpovídá v daném profilu propustku danému průtočnému množství vody. κ je součinitel výškového zúžení a nabývá hodnot od 0,86 do 0,97 podle použitého typu vtokové úpravy. Součinitel κ se dá dohledat v tabulkách (Tabulka 2), které obsahují současně používané hodnoty součinitelů. U propustků ovlivněných dolní vodou tato rovnice neplatí a došlo by k zatopení zúžené hloubky.[3],[4],[9]

$$y_c = \kappa \cdot y_k \quad (2.2)$$

Kde y_c – výška hladiny vody v profilu zúžené hloubky v propustku [m]
 κ – součinitel výškového zúžení [-]
 y_k – kritická hloubka v propustku [m]

Pro určení kritické hloubky v kruhovém průřezu lze využít tabulky (Příloha 1), kde pomocí kritické funkce (Rce 2.3) nalezneme poměr kritické hloubky a průměru. Další možností je využít empirické vzorce např. podle Diskina (Rce 2.4) nebo Abbotta (Rce 2.5).[4],[9]

$$\frac{\alpha \cdot Q^2}{g \cdot D^5} \quad (2.3)$$

$$y_k = D \left[\frac{\alpha \cdot Q}{\sqrt{g \cdot D^5}} \right]^{0,513} \quad (2.4)$$

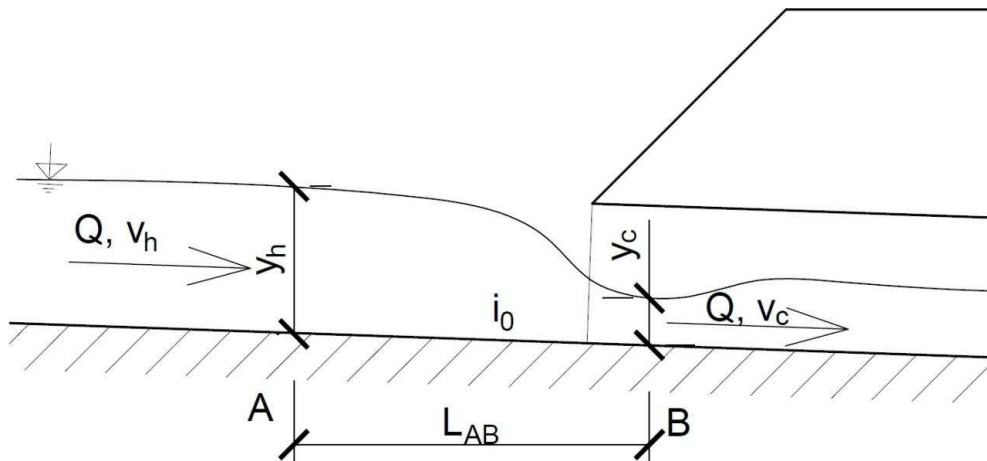
$$y_k = \frac{\sqrt{0,32 \cdot Q}}{D^{1/4}} \quad (2.5)$$

Kde α – Coriolisovo číslo [-]
 Q – průtok [m^3/s]
 g – gravitační zrychlení [m/s^2]
 D – průměr propustku [m]
 y_k – kritická hloubka v propustku [m]

Při použití současné metodiky se přechod mezi profily před propustkem a v propustku v místě zúžené hloubky řeší pomocí rovnice Bernoulliho (Rce 2.6, Obrázek 3). Energie před propustkem se musí rovnat rozdílu výšek řešených profilů, energii v propustku a místní ztrátě na vtoku.[4]

$$i_0 \cdot L_{AB} + y_h + \frac{\alpha \cdot v_h^2}{2g} = y_c + \frac{\alpha \cdot v_c^2}{2g} + \xi \cdot \frac{v_c^2}{2g} = y_c + \frac{Q^2}{2g \cdot \varphi^2 \cdot S_c^2} \quad (2.6)$$

- kde
- i_0 – sklon dna mezi profily A a B [-]
 - L_{AB} – vzdálenost mezi profily A a B [m]
 - y_h – výška hladiny vody v profilu před propustkem [m]
 - $\frac{\alpha \cdot v_h^2}{2g}$ – rychlostní výška v profilu před propustkem [m]
 - y_c – výška hladiny vody v profilu zúžené hloubky v propustku [m]
 - $\frac{\alpha \cdot v_c^2}{2g}$ – rychlostní výška v profilu zúžené hloubky v propustku [m]
 - $\xi \cdot \frac{v_c^2}{2g}$ – místní vtoková ztráta [m]
 - Q – průtok [m^3/s]
 - g – gravitační zrychlení [m/s^2]
 - φ – rychlostní součinitel [-], $\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi}}$
 - S_c – průtočná plocha v profilu zúžené hloubky v propustku [m^2]



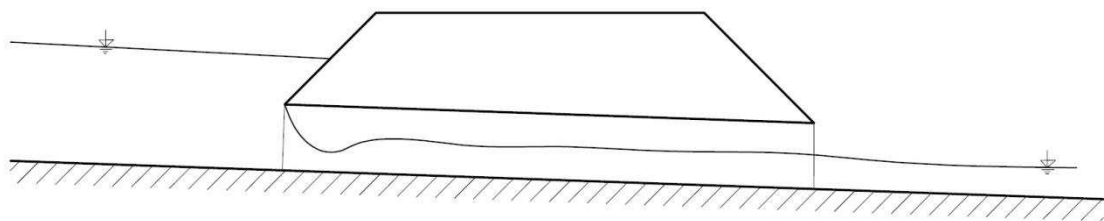
Obrázek 3 Aplikace rovnice Bernoulliho na propustek o volné hladině

2.3.2. Proudění o volné hladině se zahlceným vtokem

Hladina vody ve vtokové části sahá až nad strop propustku, přičemž vtokový otvor je plný vody. Nicméně ve zbývající části propustku se proudění chová jako v případě proudění o volné hladině. [8]

Proudění se zahlceným vtokem lze také rozdělit na propustky:

- a) se zahlceným vtokem neovlivněným dolní vodou,
- b) se zahlceným vtokem ovlivněným dolní vodou. [8]



Obrázek 4 Proudění o volné hladině se zahlceným vtokem

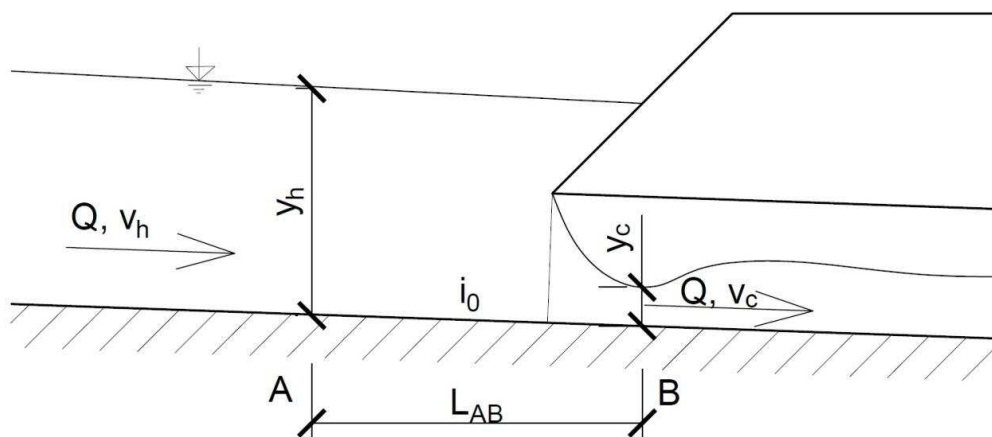
Jak již bylo řečeno v kapitole 2.3.1, tak pokud $R_{ce} > 2.1$ neplatí, jedná se o zahlcený vtok. U propustků neovlivněných dolní vodou dochází opět za vtokem do propustku ke snížení hladiny. Stává se tak vlivem změny průřezu a podle citované literatury [4] lze míru zúžení stanovit dvěma způsoby. První možnost je přes plochu příčného řezu ($R_{ce} > 2.7$) a druhá možnost je přes průměr propustku ($R_{ce} > 2.8$). Pokud je vtok ovlivněný dolní vodou, stejně jako v kapitole 2.3.1, dojde k zatopení zúžené hloubky.[4]

$$S_c = 0,62 \cdot S_D \quad (2.7)$$

$$y_c = 0,60 \cdot D \quad (2.8)$$

kde S_c – průtočná plocha v profilu zúžené hloubky v propustku [m²]
 S_D – průtočná plocha propustku [m²]
 y_c – výška hladiny vody v profilu zúžené hloubky v propustku [m]
 D – průměr propustku [m]

Analogicky jako u nezahlceného vtoku se pro výpočet přechodu mezi profily před propustkem a v propustku v místě zúžené hloubky použije rovnice Bernoulliho ($R_{ce} > 2.6$, Obrázek 5).[4]

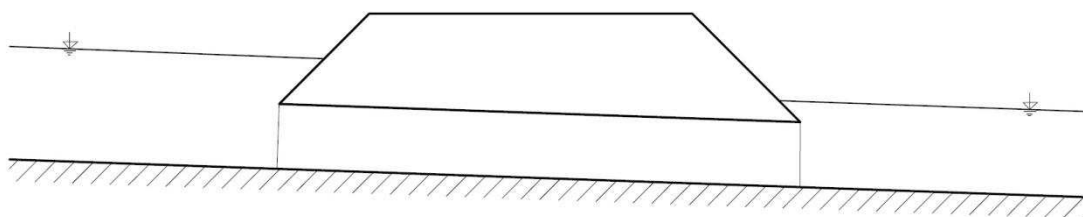


Obrázek 5 Aplikace rovnice Bernoulliho na propustek o volné hladině se zahlceným vtokem

2.3.3. Tlakové proudění

V tlakovém režimu je celý příčný průřez od vtoku až po výtok zcela zaplněn vodou[8]. Opět lze proudění rozdělit na propustky:

- s tlakovým prouděním neovlivněným dolní vodou - natlakování vzniká od horní vody před propustkem,
- s tlakovým prouděním ovlivněným dolní vodou – natlakování vzniká vysokou hladinou pod propustkem.[4]



Obrázek 6 Tlakové proudění v propustku

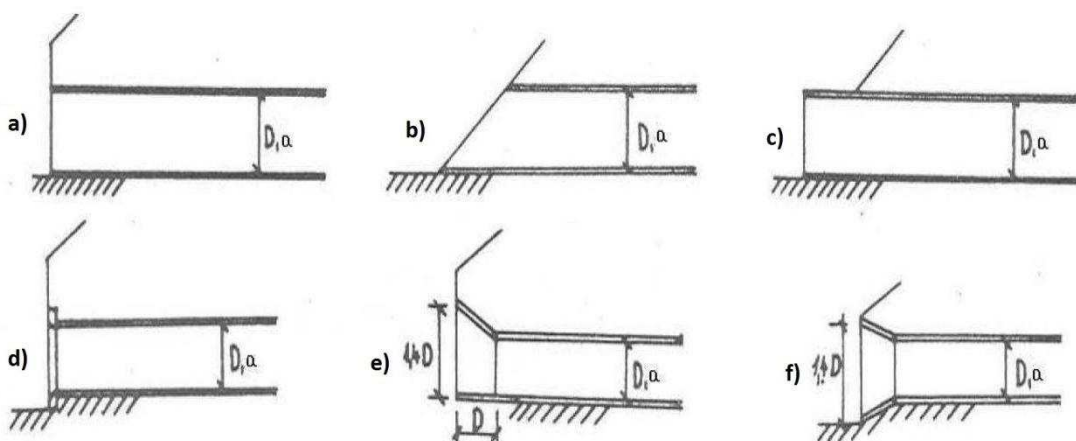
Tlakové proudění není předmětem této bakalářské práce, tudíž není potřeba zde detailně rozebírat postup výpočtu. I v tomto případě se využívá rovnice Bernoulliho, ale aplikuje se na jiné příčné profily než u proudění s volnou hladinou.[4]

2.4. Typy vtokových částí trubních propustků

Ve vtokové části propustku vznikají velké energetické ztráty. Je více možností řešení úpravy vtokové části propustku. Buď ho lze vyřešit stavebně jednoduchý a počítat s velkými ztrátami, nebo lze navrhnout stavebně složitější variantu s příznivým omezením ztrát. Ovšem hydraulické výhody nedosahují takového účinku, aby se konstrukčně složitější vtok vyplatil.[8]

Typy vtokových úprav:

- vtok s kolmým čelem,
- vtok s šikmým čelem,
- předsazený vtok,
- vtok se zaoblenými hranami,
- vtok s kónickým rozšířením v horní části,
- vtok s kónickým rozšířením.



Obrázek 7 Typy vtokových částí trubních propustků [8]

Každé zde uvedenému typu vtokové úpravy náleží součinitelé, které slouží k výpočtu proudění v propustkách (Tabulka 2). Jsou to součinitelé na výpočet vtokové ztráty, rychlosti, výškového zúžení a zatopení vtoku.[4]

typ vtoku	součinitel ztráty vtokem ξ	součinitel rychlosti φ	součinitel výškového zúžení κ	součinitel zatopení vtoku β
A	0,40 - 0,50	0,85 - 0,82	0,90	1,20 - 1,16
B	0,70 - 0,80	0,77 - 0,75	0,87	1,10 - 1,09
C	0,80 - 0,90	0,75 - 0,73	0,86	1,09 - 1,08
D	0,05 - 0,10	0,98 - 0,95	0,97	1,45 - 1,40
E	0,10 - 0,15	0,95 - 0,93	0,95	1,40 - 1,33
F	0,30 - 0,40	0,88 - 0,85	0,94	1,40 - 1,36

Tabulka 2 Hodnoty součinitelů pro řešení proudění vtokem do propustku[4]

3. Zjištěné nepřesnosti v současné metodice řešení vtoku do propustku

V roce 2015 byl proveden výzkum na fyzikálním modelu ve vodohospodářské laboratoři na propustku s kolmým čelem (*Obrázek 8*). Na vtokovou část se zaměřil Daniel Sedláček a pod vedením doc. Ing. Aleše Havlíka, Csc. vypracoval bakalářskou práci. Cílem jeho bakalářské práce bylo nalezení zúžené hloubky a stanovení součinitele místní ztráty na vtoku do kruhového propustku s ostrým kolmým čelem. Na modelu byly nasimulovány průtoky od 1,5 l/s až po téměř 30 l/s. Po vyhodnocení bylo zjištěno, že současně používané hodnoty součinitelů jsou dosti nadhodnocené.[10]

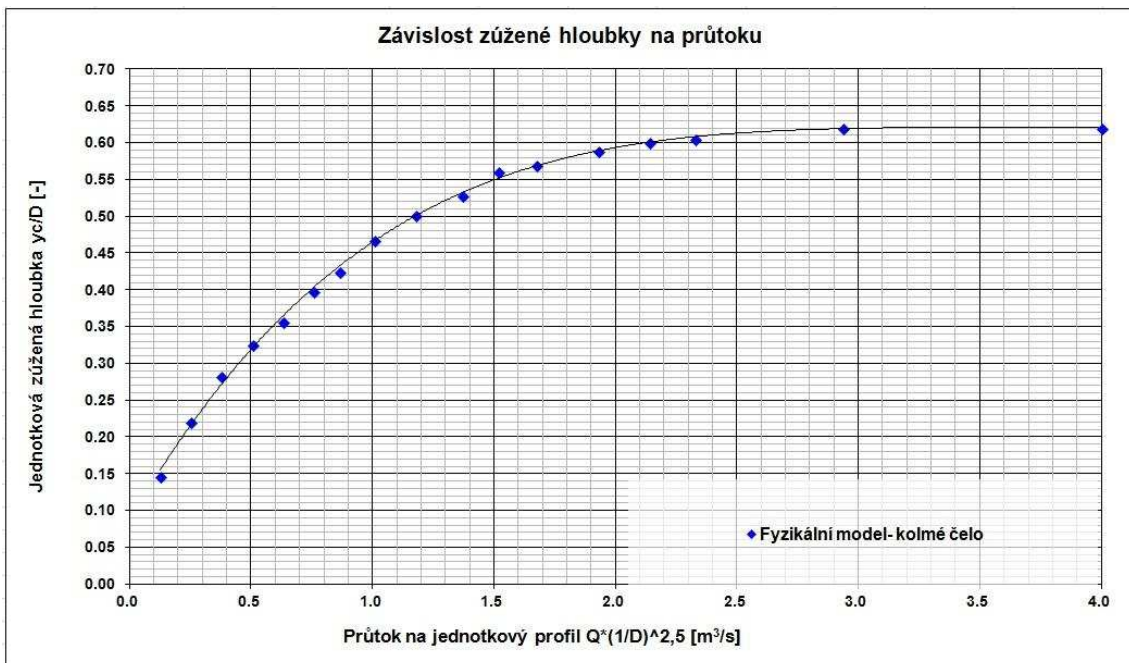
Největší rozdíl byl zaznamenán u součinitele místní ztráty ξ , který se v tabulkách pro daný typ vtokové úpravy pohybuje od hodnoty 0,4 až po 0,5 (*Tabulka 2*). Po vyhodnocení výzkumu se ukázalo, že hodnoty součinitele ξ se pohybují spíše kolem 0,04. Domněnka je taková, že v současně používané metodice je součinitel ξ součtem místní ztráty zúžením profilu a ztráty náhlým rozšířením proudu. Ovšem to by se tento součinitel dal použít pouze pro tlakové proudění v propustcích, ale pro proudění o volné hladině by byl nepoužitelný.[10]

Další nepřesnosti byly zaznamenány při určování zúžené hloubky y_k . Současná metodika nám říká, že při volném vtoku se používá součinitel kontrakce κ (*Rce 2.2*). Pro tento typ vtoku je jeho tabulková hodnota $\kappa = 0,9$ (*Tabulka 2*). Ovšem při zahlceném vtoku se zúžená hloubka počítá za pomoci poměru y_c/D a jeho hodnota má být rovna 0,6 (*Rce 2.8*). Při výzkumných pokusech bylo zjištěno, že zúžená hloubka se ve skutečnosti nemění skokově mezi režimy o volném vtoku a zahlceném vtoku, jak tato metodika naznačuje, nýbrž je závislá na průtoku a velikosti průměru propustku (*Graf 1*).[10]

Součinitel zatopení β , který určuje výšku hladiny před propustkem, při které dochází právě k zahlcení vtoku do propustku, byl přibližně stanoven na hodnotu $\beta = 1,05$. Současně se používá pro tento typ vtoku hodnota z tabulek $\beta = 1,20$ až 1,16 (*Tabulka 2*). A nakonec střední hodnota pro rychlostní součinitel φ byla stanovena na $\varphi = 0,98$. Pro rychlostní součinitel φ můžeme opět vyčíst z tabulek hodnotu $\varphi = 0,85$ až 0,82 (*Tabulka 2*).[10]



Obrázek 8 Hrotová měřítka, pomocí nichž byl zjišťován průběh a úroveň hladin ve fyzikálním modelu [10]



Graf 1 Závislost velikosti zúžené hloubky na průtoku - fyzikální modelování

4. Matematické modelování proudění tekutin (CFD)

Propustek s kolmým čelem nebyl problém analyzovat pomocí fyzikálního modelu. Ovšem analýza propustku s šikmým čelem a propustku s předsazeným vtokem by se kvůli nedostatečnému přístupu ke vtoku do propustku na fyzikálním modelu obtížně prováděla. Proto bylo rozhodnuto, že problematika těchto typů propustků bude řešena pomocí matematického modelování proudění tekutin. K jeho označení se často využívá anglické zkratky CFD – Computational fluid dynamics. Pro tuto práci bylo využito programu Ansys CFX.

4.1. Výchozí rovnice pro matematické modelování proudění tekutin

Laminární i turbulentní režim proudění se dá popsat matematicky Navier-Stokesovými rovnicemi spolu s rovnicí kontinuity. Jedná se o matematické vyjádření základních fyzikálních zákonů, a to zákonu zachování hmotnosti a hybnosti.[11]

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(wu)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} + \frac{\partial(ww)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z \quad (4.4)$$

Kde: u, v, w – složky rychlosti
 p – tlak
 ρ – hustota kapaliny
 ν – kinematická viskozita
 $f_{x,y,z}$ – složky vnější objemové síly (gravitační a odstředivé)

Matematické modelování využívá ještě zákon zachování energie, ale pro tento případ nebyl využit. Přenos tepla, chemické reakce a tepelné záření není uvažováno, jelikož tyto veličiny nemají pro danou problematiku význam.

4.2. RANS simulace turbulentního proudění

Matematické modelování je omezeno výkonností výpočetní techniky, která je použita k výpočtu. Proto je pro řešení turbulentního proudění nejpoužívanějším nástrojem metoda RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) neboli metoda časového Reynoldsova středování veličin turbulentního proudění.[11]

Okamžitá hodnota veličin popisující turbulentní proudění se skládá z časově středované (střední) složky a flukuační složky, přičemž do Navier-Stokesových rovnic (Rce 4.2 až Rce 4.4) je dosazena pouze střední složka, což výpočet značně usnadní a sníží se požadavky na výpočetní

techniku. Ovšem tak by došlo k zanedbání tření mezi jednotlivými částicemi, a proto je potřeba zjednodušený model doplnit modelem turbulence, kde se uplatní flukтуаční složky turbulentního proudění.[11] Při tomto modelování bylo použito modelu turbulence Shear stress transport SST $k - \epsilon$.

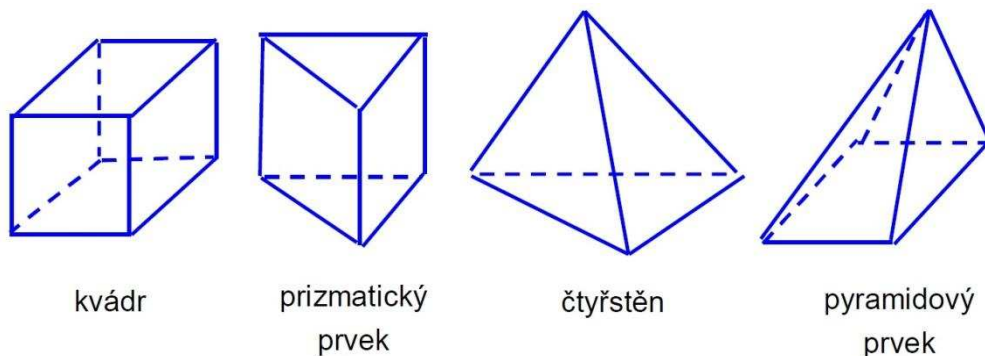
Existují ještě další dva přístupy, a to metoda přímé simulace a metoda velkých vírů. Tyto metody jsou ve srovnání s metodou RANS mnohem náročnější na výpočetní techniku. Na tento výzkum jich nebylo využito.[11]

4.3. Program Ansys CFX

CFX je solver (řešič), který je součástí komerčního balíku výpočetních programů Ansys. Tento program dokáže modelovat proudění tekutin, tepelnou výměnu a chemické reakce na základě metody konečných objemů (4.3.1).[12]

4.3.1. Metoda konečných objemů

Obecně tato metoda využívá síť prvků, které se nepřekrývají a mají svůj konečný objem. Dříve využívala tzv. strukturovanou síť, která se skládá z obdélníků a z křivočarých čtyřúhelníků ve dvourozměrných úlohách a kvádrů nebo obecných šestistěnů ve 3D úlohách. Její nevýhodou je, že síť nelze libovolně zhušťovat. Dnes se prosazuje nestruturovaná síť využívající kvádrů, čtyřstěnů, prizmatických a pyramidových prvků (Obrázek 9). Elementy se mohou kombinovat a tím je dosaženo lepšího popisu členité geometrie.[11]



Obrázek 9 Tvar elementů při použití nestruturované sítě[11]

5. Postup modelování

V této kapitole bude rozebrán podrobně postup řešení této analýzy od zadaných parametrů propustků a vodních stavů, přes tvorbu geometrie a výpočetní sítě, až po samotný výpočet.

5.1. Řešené typy vtoků do propustků

Jelikož hodnoty veličin u propustku s kolmým čelem se dají bez větších obtíží naměřit na fyzikálním modelu, posloužil právě tento typ vtokové úpravy jako kalibrační model k řešenému matematickému modelování (5.8).

Předmětem této analýzy je prozkoumat hlavně propustek s šikmým čelem skloněným 1:1 a propustek s vtokem předsazeným o průměr propustku (2.4). Hlavním důvodem, proč se zrovna tyto dva typy vtokových úprav zkoumali pomocí matematického modelování, byl nedostatek prostoru nad vtokem u fyzikálního modelu, kde by bylo nemožné měřit veličiny důležité ke zjištění potřebných součinitelů.

5.2. Řešené vodní stavy

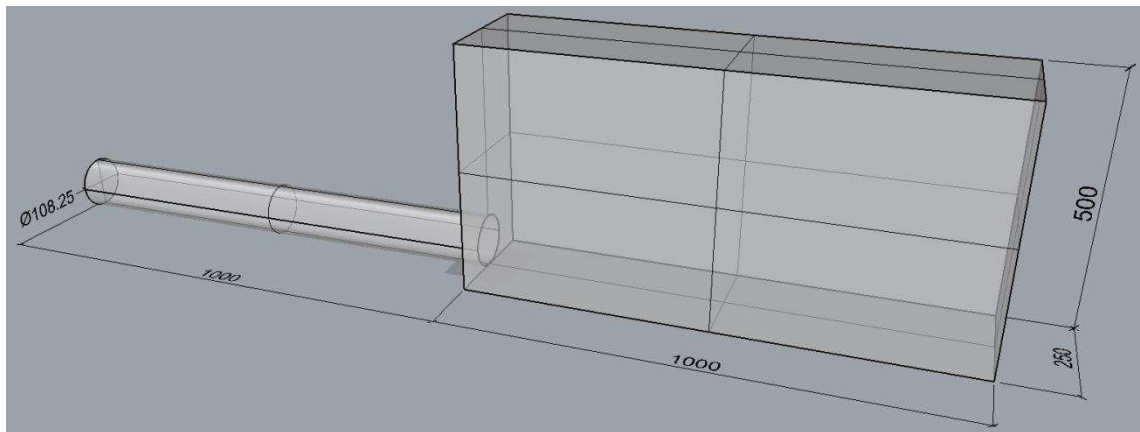
Posuzované průtoky byly zadány s ohledem na rozměry propustků tak, aby bylo posouzeno proudění s volným vtokem i proudění se zahlceným vtokem. Výška hladiny vody před propustky se pohybovala od 6 cm až do téměř 40 cm, což je při průměru propustku 10,825 resp. 10,975 cm dostatečný rozptyl hladin. Při posuzovaných stavech se průtok pohyboval v rozmezí od 2 l/s do 15 l/s.

5.3. Geometrie

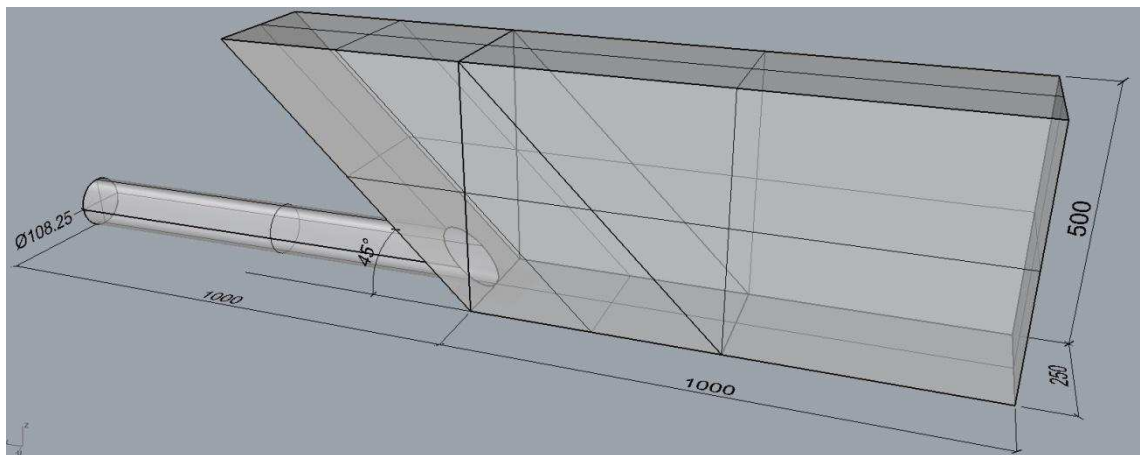
Pro vytvoření trojrozměrné geometrie byl využit program Rhinoceros 5.0, opět vypůjčený od katedry hydrotechniky. Rhinoceros 5.0 je software, který umožňuje vymodelovat trojrozměrné objekty.

Geometrie se ve všech případech skládala z nátokového žlabu a z odtokového potrubí. Aby mohly naměřené hodnoty a vypočtené výsledky být porovnány s fyzikálním modelováním bez přepočítávání, byly získány přesné rozměry fyzikálních modelů. Podle nich pak byla vytvořena geometrie pro matematický model (Obrázek 10, Obrázek 11, Obrázek 12). Na obrázcích jsou uvedeny kóty v milimetrech.

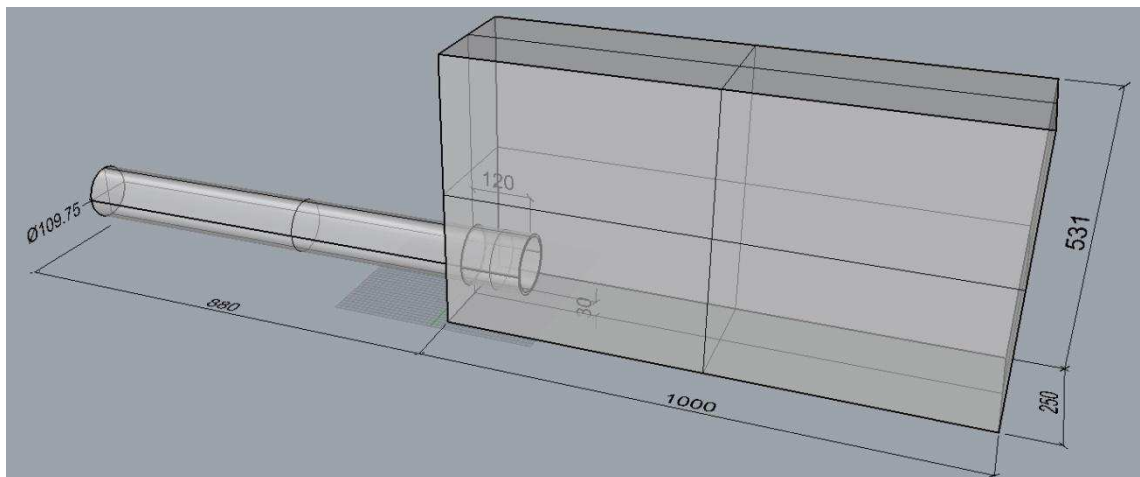
Podélný sklon nátokového žlabu byl ve všech případech nulový. Sklon propustku byl v každém z řešených modelů jiný, ale byly určeny tak, aby vtok a jeho doprovázející jevy nebyly ovlivněny dolní vodou. Propustek s kolmým čelem měl sklon 5,2 ‰, propustek s šikmým čelem pak 7,0 ‰ a propustek s předsazeným vtokem 6,1 ‰.



Obrázek 10 Geometrie pro matematický model (kolmé čelo)



Obrázek 11 Geometrie pro matematický model (šikmé čelo)

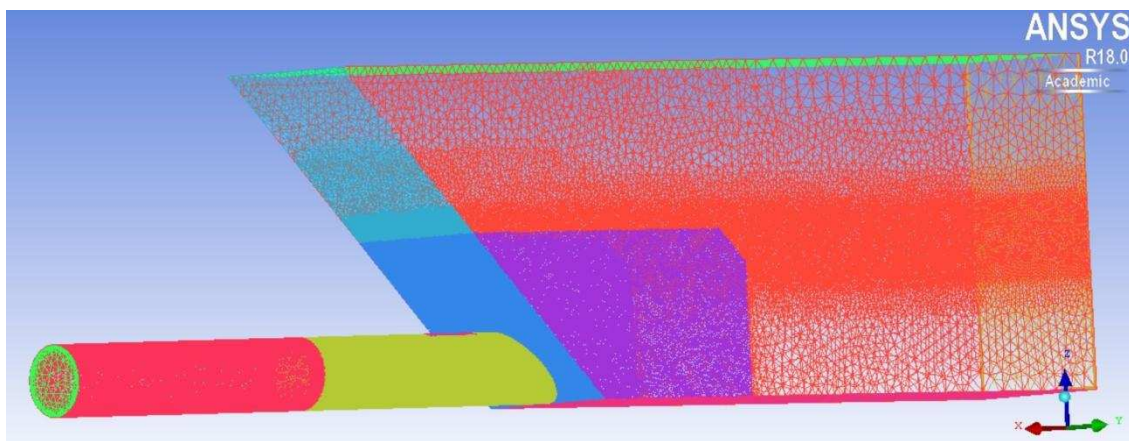


Obrázek 12 Geometrie pro matematický model (předsazený vtok)

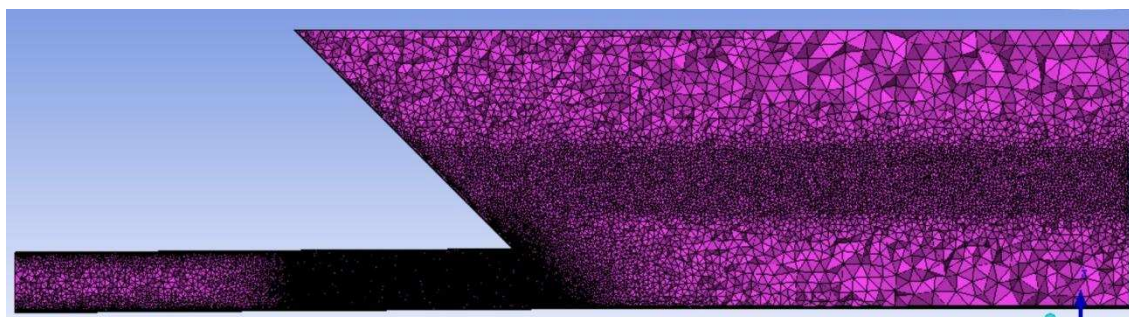
5.4. Výpočetní síť

Vypracování výpočetních sítí byla jednou z nejvíce časově náročných věcí na celém projektu. Program ICEM CFD 18.0, který byl použit pro tvorbu výpočetních sítí, je součástí komerčního balíku výpočetních programů společnosti Ansys. Cílem bylo vytvořit síť s co nejmenším počtem elementů, protože s počtem elementů roste výpočetní náročnost modelu. Zároveň ale bylo cílem dostávat správné výsledky, kde je úplně opačný požadavek na počet elementů. To znamená čím více elementů, tím lépe. Čili byla snaha najít vyhovující kompromis, což hodně zjednodušila funkce zhuštění sítě.

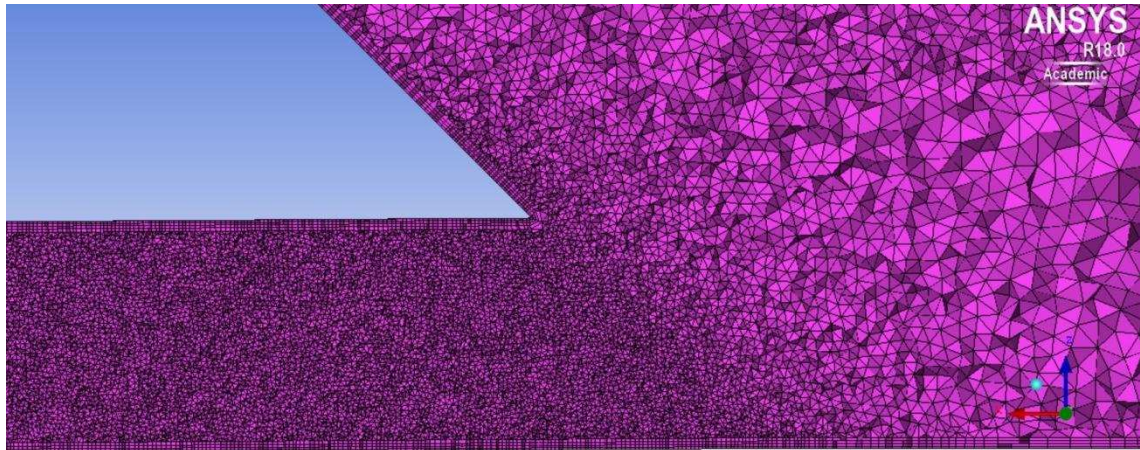
Postup vytváření sítě byl následující, nejprve byla již připravená geometrie vložena do programu ICEM CFD 18.0. Dalším krokem bylo nastavit zhuštění budoucí sítě v místech, kde to bylo potřeba (Obrázek 13, Obrázek 14), což bylo okolí hladiny vody v nátokovém žlabu, vtoková oblast do propustku a celá přední část propustku, kde se dal očekávat výskyt zúžené hloubky. Následně byla vygenerována povrchová síť (Obrázek 13), které byla po kontrole ještě vylepšena kvalita funkcí smooth (vyhladit). Po té byla vygenerována objemová síť (Obrázek 14, Obrázek 15), na kterou byla také použita funkce smooth. Nakonec byla generována prizmatická vrstva sítě s exponenciálním nárůstem velikosti elementů (Obrázek 15), která byla umístěna u stěn, kvůli přesnějšímu popisu proudění v blízkosti stěny.



Obrázek 13 Povrchová síť



Obrázek 14 Objemová síť



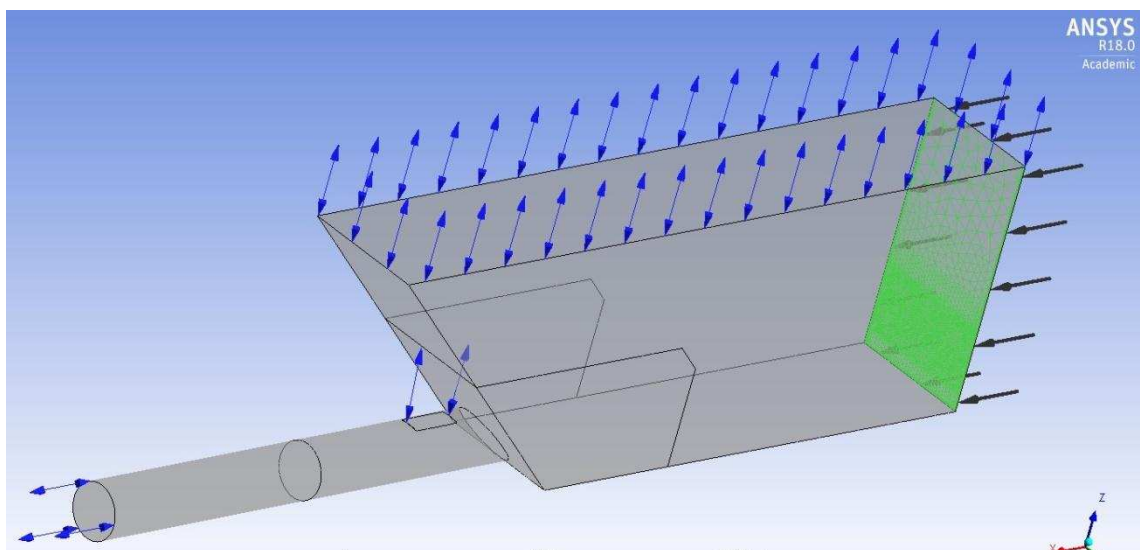
Obrázek 15 Detail objemové a prizmatické sítě v místě vtoku do propustku

5.5. Okrajové podmínky

Byl použit model ustáleného dvoufázového proudění (voda, vzduch). Na stěnách modelu musejí být zadány okrajové podmínky, aby byla zřejmá interakce systému s okolním prostředím[13]. Proto byly plochy modelu rozděleny do skupin s ohledem na to, kde byl požadavek mít shodné okrajové podmínky. Bylo použito pět typů okrajových podmínek, které jsou podrobněji popsány níže. Plocha, kde je definována uvedená okrajová podmínka, je v každém případě na obrázku označena zelenou barvou.

5.5.1. Vtok do modelu – INLET

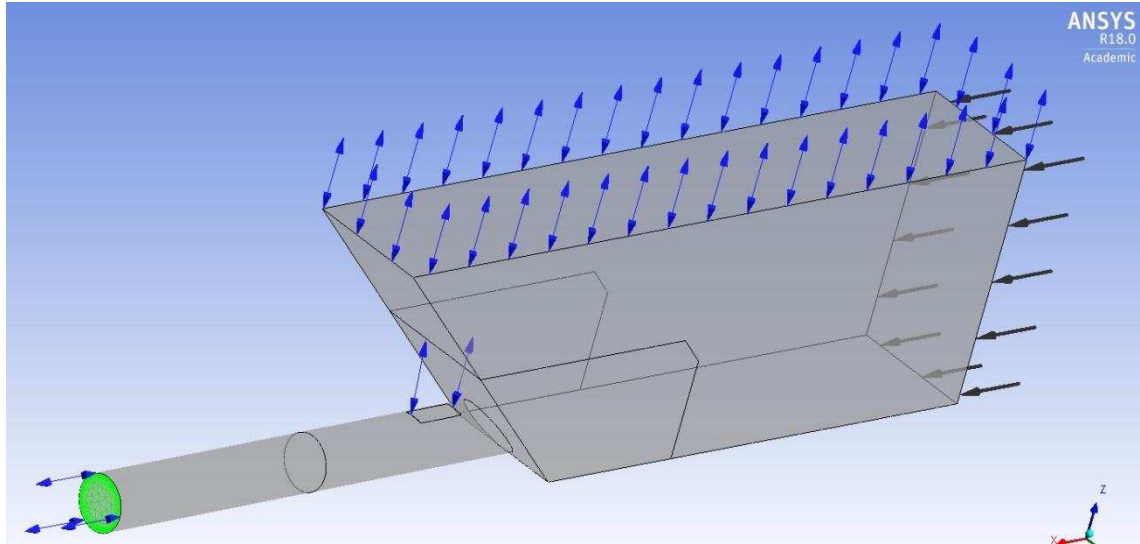
Prostřednictvím této okrajové podmínky se voda a vzduch dostávají do modelu (Obrázek 16). Rozhraní mezi vodou a vzduchem bylo určeno pomocí podmínky Total pressure a definovaného rozdělení vody a vzduchu (Volume fraction). Total pressure je celková energie vody, ta se skládá z polohové energie a rychlostní výšky. Jinými slovy byla zadána konstantní výška hladiny vody na počátku nátokového žlabu. Jelikož ale nebyla rychlost na vstupu do modelu zanedbatelná, muselo být také počítáno s rychlostní výškou. Pod zadanou souřadnicí bylo definováno, aby do modelu vstupovala voda a nad ní, aby do modelu vstupoval vzduch.



Obrázek 16 Okrajová podmínka INLET – VSTUP DO MODELU

5.5.2. Výtok z modelu - OPENNING

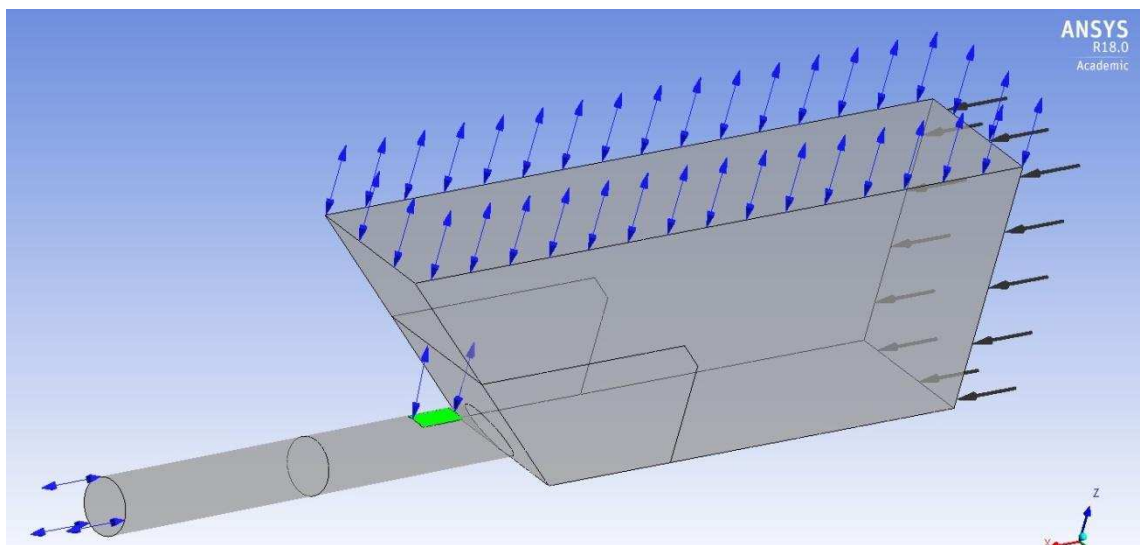
Umístění této podmínky je na výtoku z propustku (Obrázek 17). Aby bylo umožněno i přisávání vzduchu proti směru proudění vody, což podmínka Outlet neumožňuje, byla na výtoku z modelu použita podmínka Openning (otevření). Podmínka Openning umožňuje, aby se látky mohly pohybovat stěnou, kde je podmínka definována, ven i dovnitř do modelu. Výtok vody do volna byl nasimulován podmínkou Openning pressure s definovaným průměrným relativním tlakem 0 kPa. Tím nedochází k ovlivnění hladinou v odpadním korytě.



Obrázek 17 Okrajová podmínka OPENNING – VÝTOK Z MODELU

5.5.3. Zavzdušnění - OPENNING

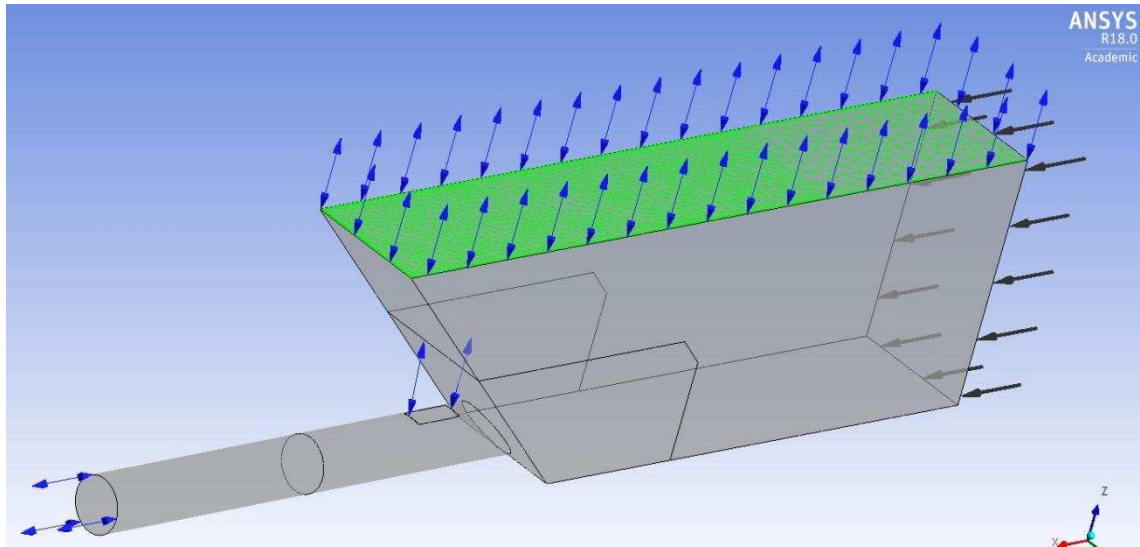
Umístění tohoto prvku bylo z důvodu podobnosti s fyzikálním modelem, kde za vtokem do propustku byly otvory, které sloužily k zaměření hladiny a umožňovali tak přisávání vzduchu. I zde byla použita okrajová podmínka Openning. Ale vstup a výstup byl umožněn pouze vzduchu, voda se skrz tuto plochu nemohla pohybovat. Opět byla zadána podmínka Openning pressure s relativním tlakem 0 kPa. Umístění prvku je u vtoku do propustku na jeho stropní části (Obrázek 18).



Obrázek 18 Okrajová podmínka OPENNING – ZAVZDUŠNĚNÍ

5.5.4. Volná hladina v nátokovém žlabu – OPENNING

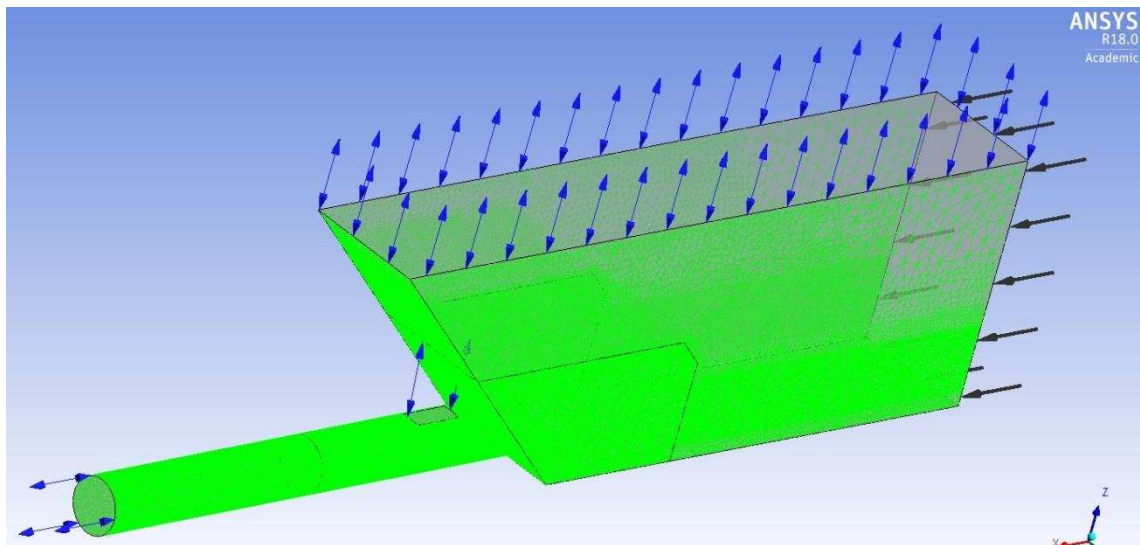
Touto okrajovou podmínkou bylo definováno, že před propustkem je volná hladina. Nastavení této okrajové podmínky je totožné jako u podmínky pro zavzdušnění (5.5.3). Podmínka umožňuje volný vstup a výstup vzduchu z modelu při atmosférickém tlaku a tím i kolísání hladiny vody. Okrajová podmínka pro volnou hladinu byla umístěna na stropní části nátokového žlabu (Obrázek 19).



Obrázek 19 Okrajová podmínka OPENNING – VOLNÁ HLADINA V NÁTOKOVÉM ŽLABU

5.5.5. Pevné stěny modelu - WALL

Podmínka WALL simuluje jevy, které se dějí při proudění v blízkosti stěny (Obrázek 20). Při zadání podmínky NO SLIP WALL se počítá s drsností stěny a s tím, že rychlost proudění vody na styku se stěnou je nulová. U stěn modelu se tak vytvoří přechodová vrstva proudění. Kvůli přesnějšímu popisu tohoto proudění byla generována prizmatická výpočetní síť, jak je naznačeno v kapitole 5.4.



Obrázek 20 Okrajová podmínka WALL – PEVNÉ STĚNY MODELU

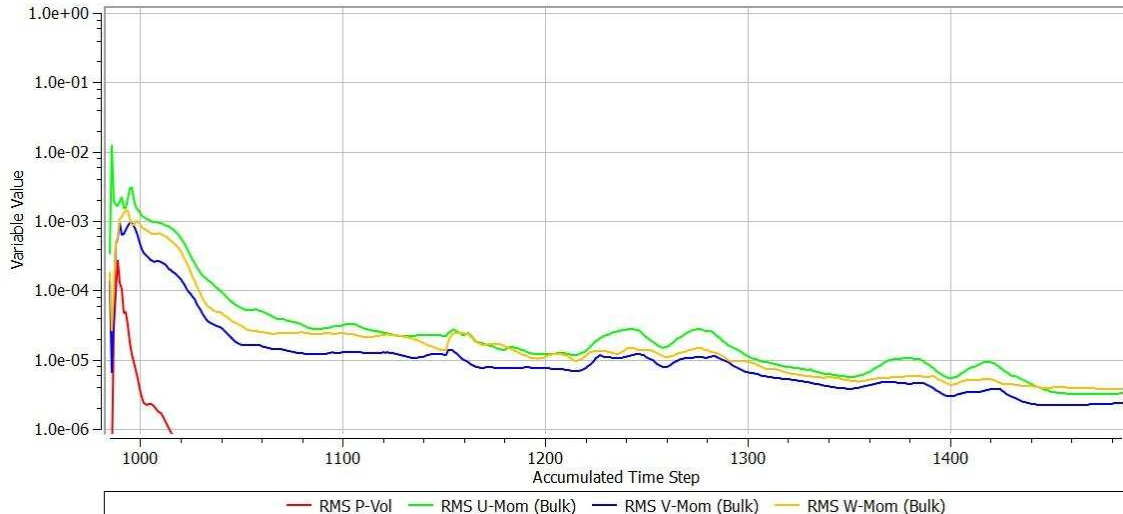
5.6. Počáteční podmínka

Počáteční podmínka slouží k určení stavu, ze kterého model bude vycházet při prvním kroku výpočtu. Při definování počáteční podmínky by mělo být přihlíženo k tomu, aby byla co nejbližší předpokládanému výsledku. Pokud tomu tak nebude, ustálení výpočtu by trvalo mnohem déle. Pro výpočet bylo použito ruční zadání hladiny vody před a za propustkem pro první řešený vodní stav. Pro další vodní stavy jako počáteční podmínka sloužil ustálený výpočet předchozího vodního stavu.

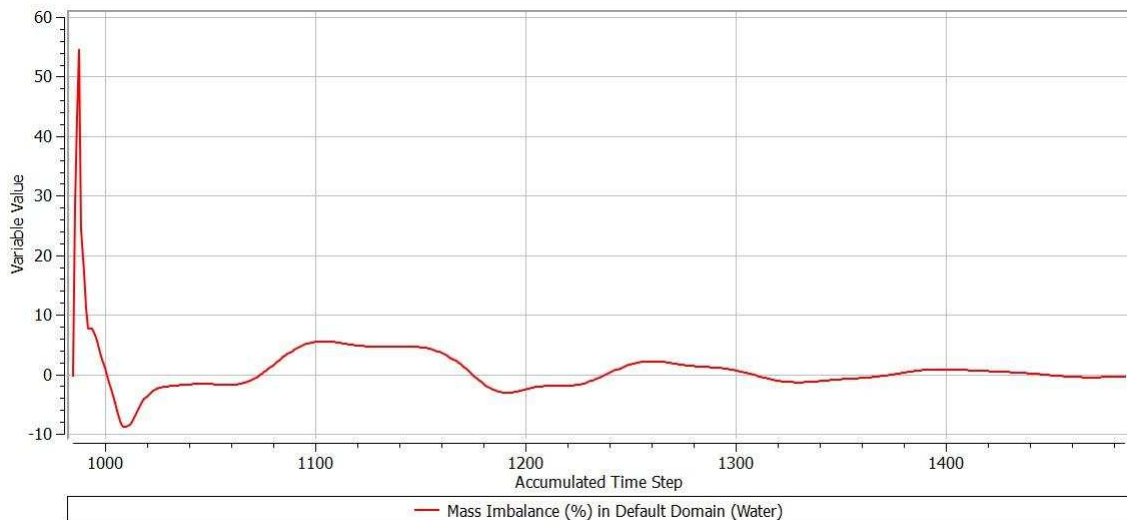
5.7. Výpočet a jeho konvergence

Výpočet byla časově nejméně náročná činnost, při které byla využita výpočetní technika. Úloha byla řešena jako dvoufázové proudění vody a vzduchu s vlastnostmi odpovídajícími konstantní teplotě. K tomuto výpočtu byl použit řešič Ansys CFX (4.3). Nyní bylo důležité sledovat konvergenci, aby měla požadovaný průběh. Průběh konvergence může být řízen změnou délky výpočetního kroku.

Míra ustálení výpočtu neboli jeho konvergence, byla hodnocena podle dvou parametrů. První z parametrů jsou hodnoty průměrných reziduí (Obrázek 21), u kterých bývá požadavek, že aby byl výpočet ustálený, musí hodnoty všech sledovaných reziduí klesnout pod $1,0e - 04$. Druhým parametrem je změna průtoku modelem v průběhu výpočtu (Obrázek 22). Hlavní z těchto dvou parametrů je změna průtoku v modelu. Je snaha, aby rozdíl mezi přítokem a odtokem z modelu byl snížen pod 1 % aktuálního průtoku, pokud je toto splněno, je tento model považován za ustálený.



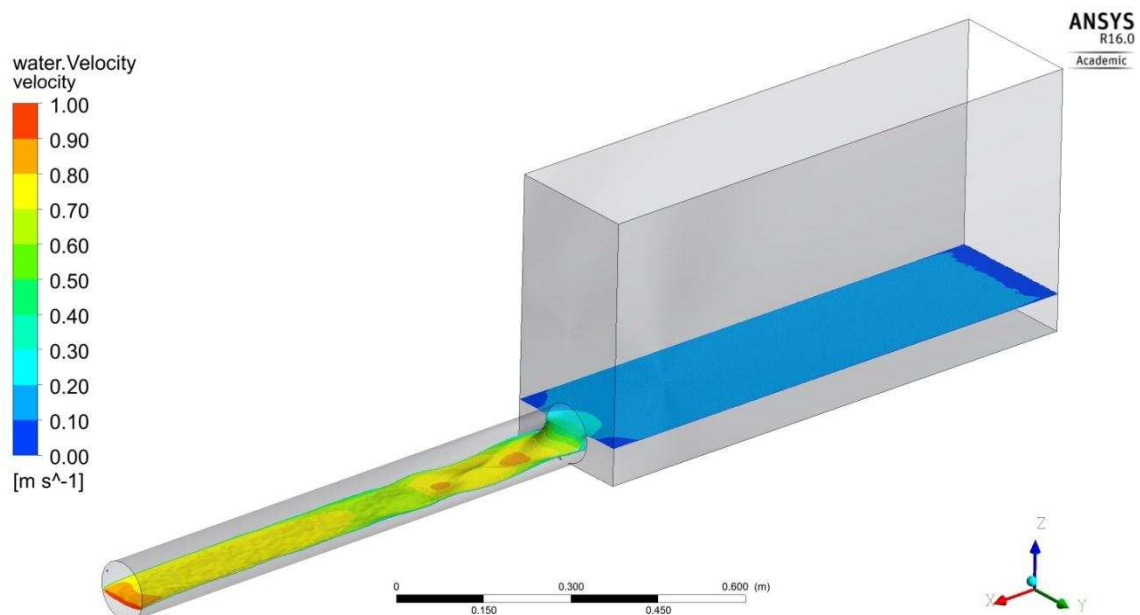
Obrázek 21 Průběh průměrných reziduí



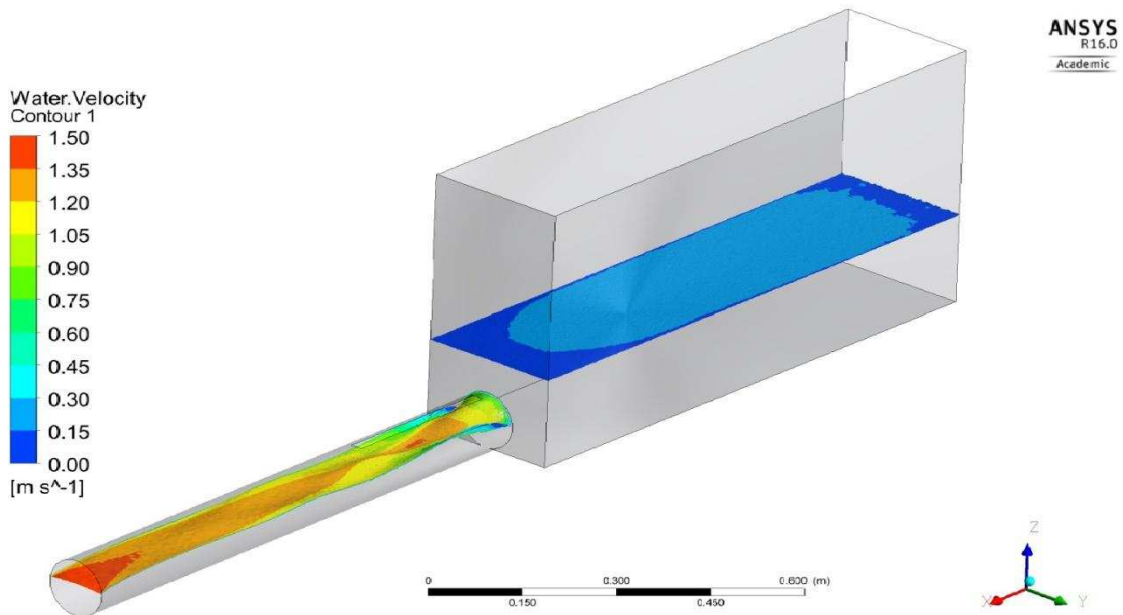
Obrázek 22 Průběh rozdílu mezi přítokem a odtokem v %

5.8. Kalibrace modelu

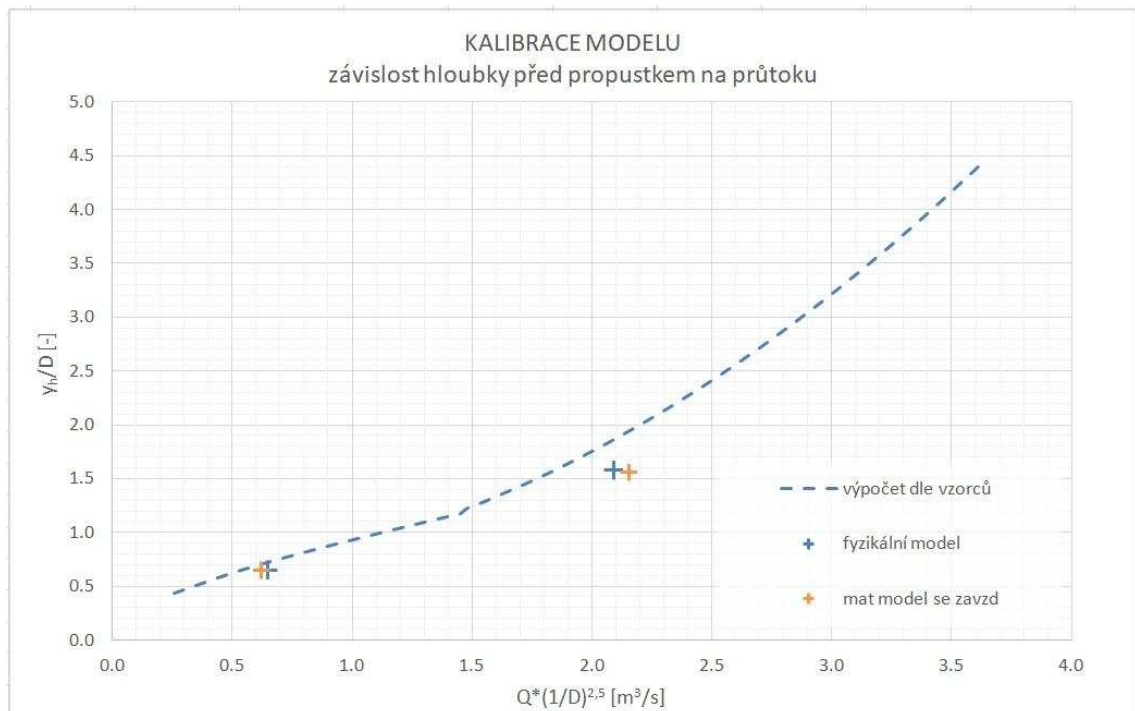
Jako kalibrační model posloužil propustek s kolným čelem. Pro tuto vtokovou variantu byly řešeny 2 charakteristické vodní stavy a to při volném vtoku (Obrázek 23) a zahlceném vtoku (Obrázek 24). Zmíněné stavy byly zadávány do výpočetního modelu s několika typy výpočetních sítí, které se lišily počtem elementů. Nakonec byla vybrána taková výpočetní síť, která při minimálním počtu elementů stále vykazovala výsledky požadované přesnosti. Podle konzumpčních křivek před vtokem do propustku (Graf 2) a v místě zúžené hloubky za vtokem do propustku (Graf 3) byla ověřena správnost výpočtů a po té byly výsledky porovnány s výsledky na fyzikálním modelu, které byly k dispozici od katedry hydrauliky.



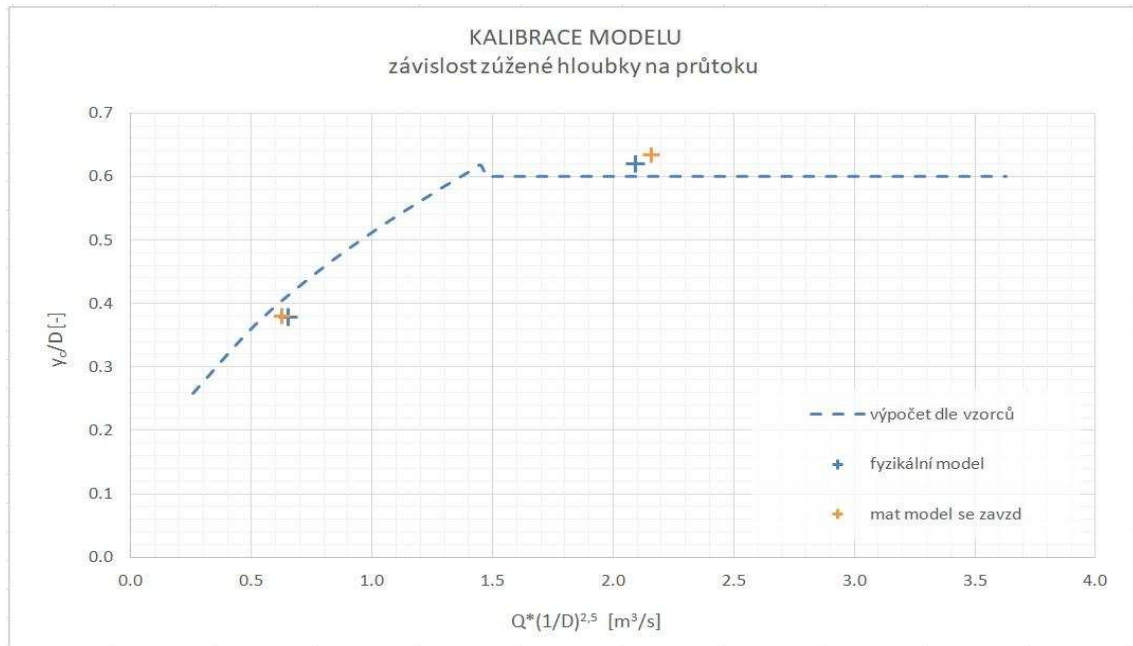
Obrázek 23 Průběh hladiny v propustku s kolným čelem při volném vtoku



Obrázek 24 Průběh hladiny v propustku s kolmým čelem při zahlceném vtoku



Graf 2 Konzumpční křivka před vtokem do propustku - porovnání teorie, fyzikálního modelu a matematického modelu



Graf 3 Konzumpční křivka v místě zúžené hloubky za vtokem do propustku - porovnání teorie, fyzikálního modelu a matematického modelu

Podle konzumpčních křivek (Graf 2 a Graf 3) je vidět, že výstupy z matematického modelu se nepatrně liší od výstupů z fyzikálního modelu. To může být zapříčiněno nepatrnou nepřesností měření pomocí hrotových měřitek na fyzikálním modelu, ale v rámci přesnosti obou modelů je rozdíl zanedbatelný. Rovnice Bernoulliho (Rce 2.6), ze které bylo při zjišťování ztrátového součinitele vycházeno, je velmi citlivá na nepatrné změny hladiny. Vzhledem k tomu bylo rozhodnuto, že model vykazuje dostatečnou přesnost. V přehledné tabulce (Tabulka 3) je vidět porovnání výsledků fyzikálního a matematického kalibračního modelu.

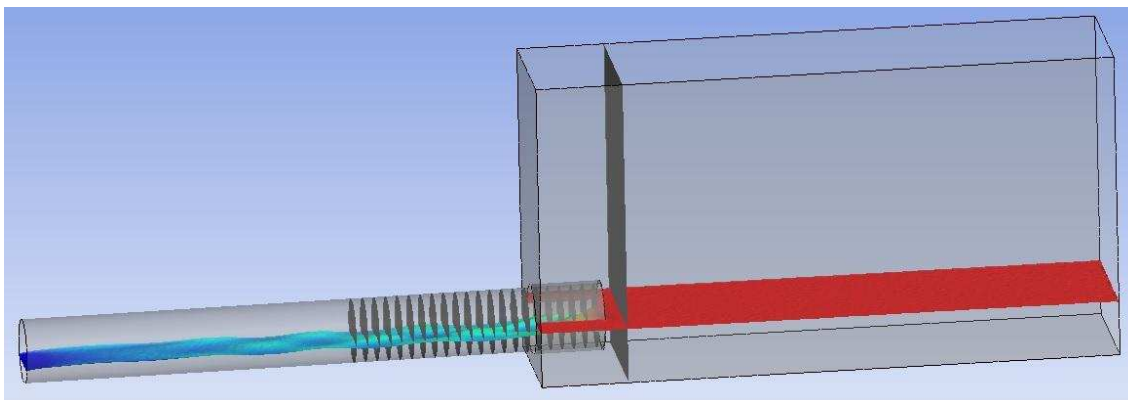
Propustek s kolmým čelem													
č. stavu	Q [l/s]	y _h [cm]	y _h /D [-]	S _c [cm ²]	S _c /S _D [-]	y _c [cm]	y _c /D [-]	κ [-]	x _c [cm]	x _c /D [-]	ξ [-]	Q*(1/D) ^{2,5} [m ³ /s]	volný/zahlcený vtok
Fyzikální model													
K1	2.50	7.11	0.66	31.9	0.35	4.09	0.38	0.83	21	1.9	0.10	0.65	volný
K2	8.05	17.14	1.58	60.0	0.65	6.72	0.62	0.75	21	1.9	0.16	2.09	zahlcený
Matematický model													
K11	2.41	7.10	0.66	32.2	0.35	4.13	0.38	0.85	20	1.8	0.11	0.63	volný
K12	8.30	16.95	1.57	61.6	0.67	6.87	0.63	0.76	29	2.7	0.12	2.15	zahlcený

Tabulka 3 Přehledná tabulka výsledků kalibračního modelu

Kde: Q – průtok při řešeném stavu
y_h – výška hladiny vody před propustkem
D – průměr propustku
S_c – průtočná plocha v profilu zúžené hloubky v propustku
S_D – maximální průtočná plocha propustku
y_c – výška hladiny vody v místě zúžené hloubky
κ – součinitel určující zúženou hloubku
x_c – vzdálenost výskytu zúžené hloubky od vtoku do propustku
ξ – součinitel místní ztráty vtokem do propustku
Q*(1/D)^{2,5} – průtok na jednotkový průměr propustku

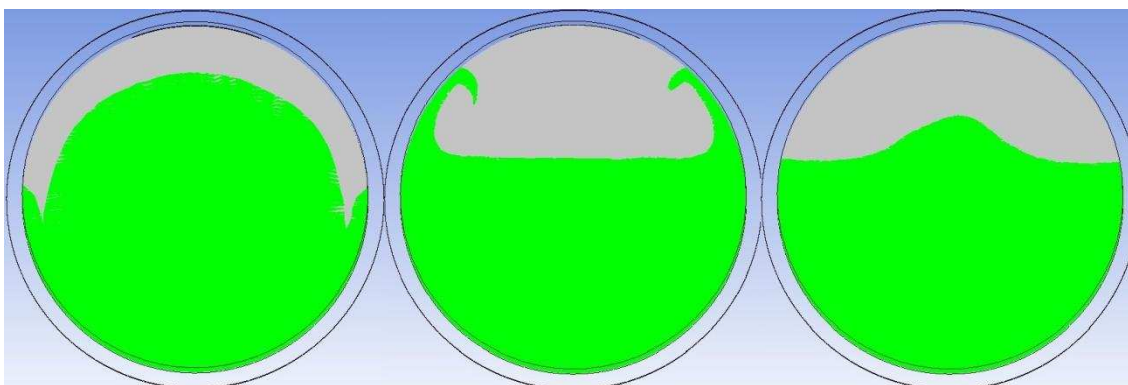
6. Vyhodnocení

Matematické modelování umožňuje prezentaci výsledků jak v grafické, tak i v číselné formě. V editoru na vyhodnocování výsledků, který je opět součástí balíčku programu Ansys, byly nadefinovány řezy (Obrázek 25). Tyto řezy byly v místech, která byla nejvíce zajímavá a to především na vtoku do propustku. Řezy na vtoku do propustku byly po 20 mm, aby byl co nejpřesněji určen profil se zúženou hloubkou. V těchto řezech byly zjišťovány číselné hodnoty průtočné plochy, průměrné rychlosti a rychlostní výšky. Tyto číselné hodnoty byly po té zpracovávány v tabulkovém editoru Excel.



Obrázek 25 Nadefinované řezy ve výsledkovém editoru

Problém bylo určit profil se zúženou hladinou, protože hladina se za vtokem do propustku značně vlní. Za vtokem do propustku dochází ke střídání stavů, kde v jednom stavu dochází ke snížení hladiny uprostřed profilu a k vyvýšení hladiny u stěn propustku a ve druhém stavu dochází k přesně opačnému jevu (Obrázek 26). Po zvážení bylo rozhodnuto použít přepočít z rozvlněné průtočné plochy na plochu o vodorovné hladině, ze které byla následně vypočtena výšková kóta této hladiny (Rce 6.1)[14]. Čili v tom profilu, ve kterém byla nejmenší průtočná plocha, byla situována zúženou hloubka. Tak to bylo řešeno i při fyzikálním modelování [10]. Při známé průtočné ploše S a známému poloměru propustku r byla pomocí řešitele nalezena požadovaná výška vodorovné hladiny h .



Obrázek 26 Střídání stavů hladin za vtokem do propustku

$$S = r^2 \cdot \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right) - (r-h) \cdot \sqrt{2hr - h^2} \quad (6.1)$$

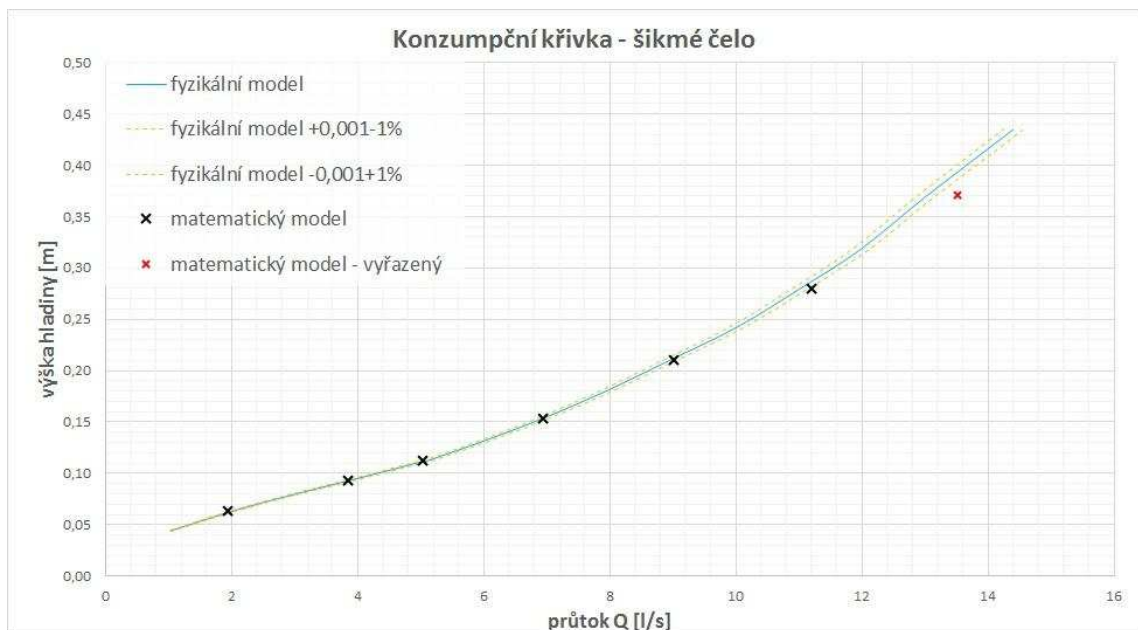
Po nalezení profilu s nejmenší zúženou plochou S_c mohla být odečtena příslušná průměrná rychlost a rychlostní výška včetně Coriolisova čísla. Po té se mohlo přistoupit k výpočtu součinitele místní ztráty. Součinitel místní ztráty se vyjadřuje z rovnice Bernoulliho (Rce 2.6, Rce 6.2).

$$\xi = \frac{i_0 \cdot L_{AB} + y_h + \frac{\alpha \cdot v_h^2}{2g} - y_c - \frac{\alpha \cdot v_c^2}{2g}}{\frac{v_c^2}{2g}} \quad (6.2)$$

6.1. Propustek s šikmým čelem

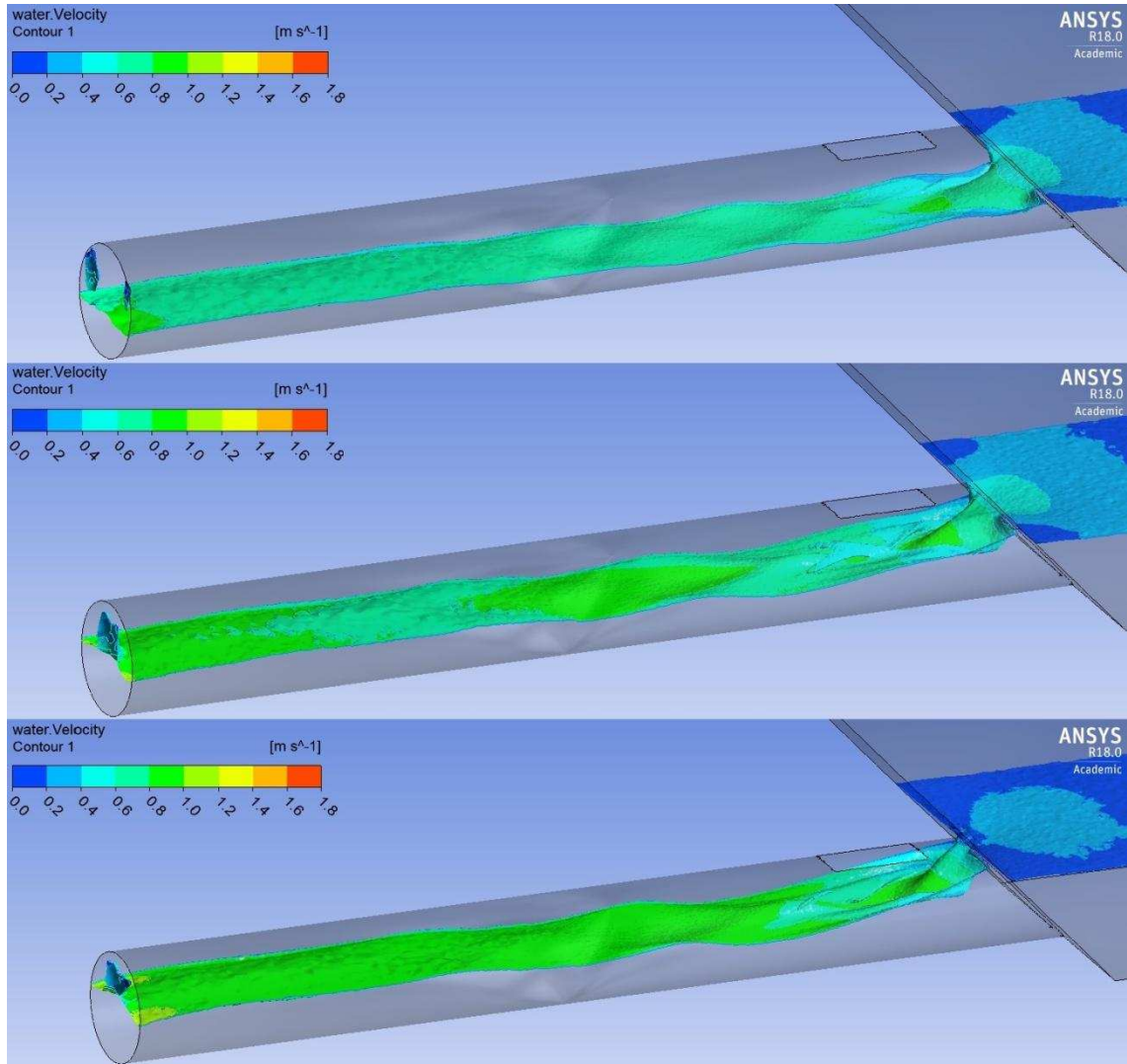
Pro typ propustku s čelem skloněným 1:1 proti vodě byl předpoklad vyhodnocení pro 7 vodních stavů. Avšak nejvyšší vodní stav vykazoval nereálné vykreslení hladiny, které neodpovídalo fyzikálnímu modelu, a proto byl z této analýzy vyloučen. Domněnka je taková, že model vykazoval nepřesnosti kvůli nedostatečnému přístupu vzduchu, ale i po zvětšení otvoru pro zavzdušnění nebyl model vizuálně podobný reálnému stavu. Byly řešeny průtoky od $Q = 1,9$ l/s až po $Q = 11,2$ l/s, průtok $Q = 13,5$ l/s, jak již bylo zmíněno, byl z řady vyloučen.

Stejně jako na kalibračním modelu byla ověřena správnost výpočtu pomocí konzumpční křivky nátokového žlabu těsně před vtokem do propustku (Graf 4).



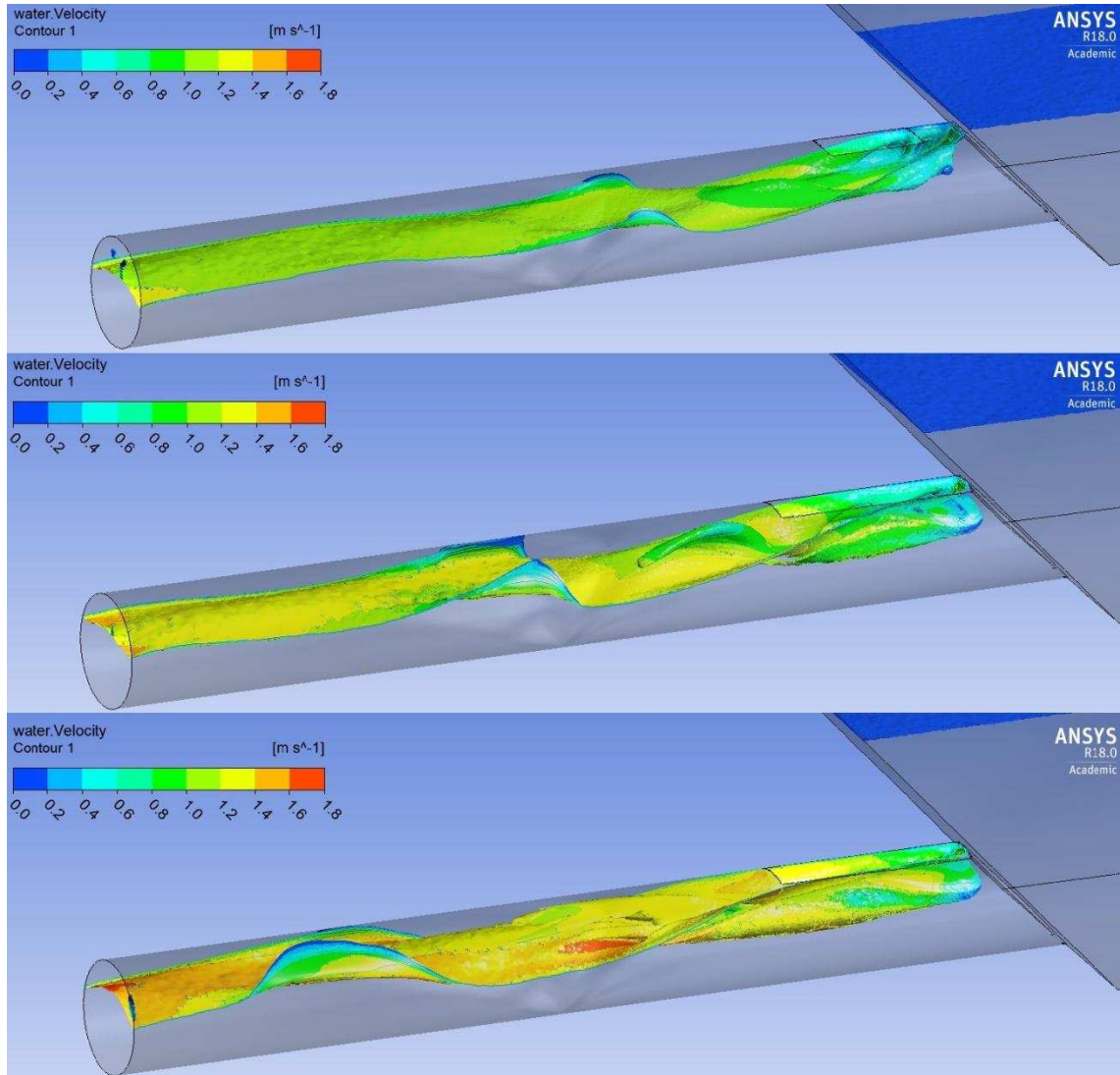
Graf 4 Konzumpční křivka nátokového žlabu před vtokem do propustku s šikmým čelem

Průtokové stavy G1 a G2 simulují vtok o volné hladině, průtokový stav G3 je přechodový stav mezi vtokem o volné hladině a zahlceným vtokem (Obrázek 27). Z těchto stavů je patrné, že čím nižší hladina, tím je proudění v propustku klidnější. Hladina před propustkem je ve všech případech klidná a nerozvlněná, změna nastává až těsně před vtokem do propustku, kde je vidět snížení hladiny. Po vtoku do propustku se hladina mírně rozvlíne systémem, jaký tu již byl popsán a je patrný z obrázku (Obrázek 26). Rychlost proudění vody v propustku se zvyšuje s rostoucí hladinou před propustkem.



Obrázek 27 Stavů G1, G2 a G3 - vykreslení hladinové rychlosti

Průtokové stavy G4, G5 a G6 jsou mnohem zajímavější z hlediska vlnění v propustku (Obrázek 28). Jsou to všechno stavy se zahlceným vtokem. Opět je zde vidět, že čím je hladina před propustkem vyšší, tím je proudění v propustku rychlejší, rozvlněnější a vlnění se s rostoucí hladinou propaguje dále po proudu. Před propustkem je hladina rovněž v klidu. Na ostré hraně šikmého čela dochází k odtržení vodního paprsku, který pokračuje dále o volné hladině.



Obrázek 28 Stav G4, G5 a G6 - vykreslení hladinové rychlosti

V následující přehledné tabulce výsledků (Tabulka 4) jsou vidět naměřené a vypočtené hodnoty vystupující z modelu propustku s šikmým čelem. První věc, které si můžeme všimnout, je průtokový stav G3, který byl vyhodnocen jako hraniční mezi volným a zahlceným vtokem. Při rozlišení volného a zatopeného vtoku ve výpočtech je rozhodující hodnota poměru hladiny před propustkem k průměru propustku. V literatuře zaměřené na proudění vody v propustcích můžeme dohledat v tabulkách (Tabulka 2) hraniční hodnotu tohoto poměru od 1,09 až po 1,10. Pro stav G3 vyšla hodnota 1,04, ovšem jedná pouze o jediný průtok kolem této hranice. Tento výzkum nebyl zaměřen na zpřesnění součinitele zatopení vtoku a tak tato jediná hodnota příliš nevyovídá o určení hranice mezi volným vtokem a jeho zahlcením. Jestliže by bylo potřeba zpřesnění, byl by na místě další modelový výzkum.

Jedním z cílů tohoto výzkumu bylo určit velikost zúžené hloubky. Podle současně používané metodiky se pro výpočet velikosti zúžené hloubky při volném vtoku používá součinitel κ (Rce 2.2), který se dá dohledat v tabulkách (Tabulka 2). Jiný případ nastává, pokud je vtok zahlcený. Po té součinitel κ nemá význam a používá se poměru velikosti průtočné plochy v místě zúžené hloubky k velikosti plochy příčného průřezu propustku (Rce 2.7) nebo poměru velikosti zúžené hloubky k průměru propustku (Rce 2.8). Výsledky ale ukazují, že lze vykreslit funkční závislost poměru zúžené hloubky a průměru y_c/D na průtoku jednotkovým profilem $Q^*(1/D)^{2,5}$ (Graf 6).

Dalším zjišťovaným parametrem byla vzdálenost zúžené hloubky od vtoku do propustku. U tohoto typu vtokové úpravy není jednoznačné, odkud by se vzdálenost měla měřit, jestli ve dně propustku nebo u stropu propustku, kde bude vzdálenost kratší o vzdálenost závisající na sklonu šikmého čela. Vzdálenost udávána v této práci byla uvažována ve dně. Hodnota vzdálenosti byla 2,2 krát až 3,1 krát větší než průměr propustku. U tohoto parametru se nepodařilo nalézt žádnou funkční závislost na velikosti průtoku. Vzhledem k tomu, že tento parametr není z praktického hlediska nijak využitelný, tak není nutné se jím dále zabírat.

Nejdůležitější věcí, kvůli které vznikl tento výzkum, je součinitel ξ , který určuje místní ztrátu vtokem. Ten, jak bylo očekáváno, vyšel s velkou odchylkou oproti tabulkovým hodnotám, podle nichž by se měl pohybovat v rozmezí 0,70 až 0,80 (Tabulka 2). Vypočtené hodnoty tohoto součinitele vyšly u volného vtoku $\xi = 0,08$, u hraničního stavu $\xi = 0,09$ a u zahlceného vtoku $\xi = 0,12$ resp. 0,13. Tato odchylka je opravdu výrazná. V případě návrhu podle tabulek se člověk může dopustit až desetinásobně větší ztráty, čímž dochází k předimenzování rozměru propustku. Je to sice lepší varianta než jeho poddimenzování, na druhou stranu je to velmi neekonomické.

Propustek s šikmým čelem													
č. stavu	Q [l/s]	y_h [cm]	y_h/D [-]	S_c [cm ²]	S_c/S_D [-]	y_c [cm]	y_c/D [-]	κ [-]	x_c [cm]	x_c/D [-]	ξ [-]	$Q^*(1/D)^{2,5}$ [m ³ /s]	volný/zahlcený vtok
G1	1.95	6.32	0.58	27.3	0.30	3.65	0.34	0.84	34	3.1	0.08	0.51	volný
G2	3.85	9.35	0.86	43.3	0.47	5.16	0.48	0.84	28	2.6	0.08	1.00	volný
G3	5.04	11.3	1.04	49.6	0.54	5.75	0.53	0.82	32	3.0	0.09	1.31	hraniční
G4	6.94	15.3	1.42	54.9	0.60	6.24	0.58	0.75	34	3.1	0.13	1.80	zahlcený
G5	9.01	21.1	1.95	55.6	0.60	6.30	0.58	0.67	24	2.2	0.12	2.34	zahlcený
G6	11.21	28	2.58	56.6	0.61	6.39	0.59	0.61	28	2.6	0.13	2.91	zahlcený

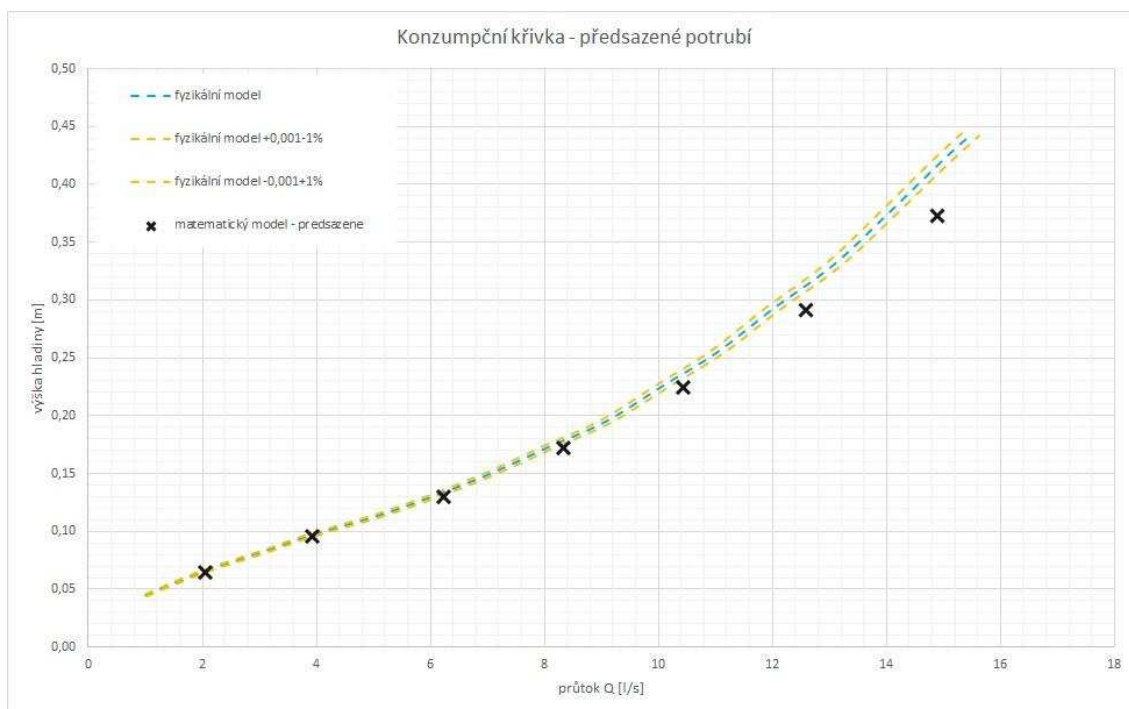
Tabulka 4 Přehledná tabulka výsledků pro propustek s šikmým čelem

Kde: Q – průtok při řešeném stavu
 y_h – výška hladiny vody před propustkem
D – průměr propustku
 S_c – průtočná plocha v profilu zúžené hloubky v propustku
 S_D – maximální průtočná plocha propustku
 y_c – výška hladiny vody v místě zúžené hloubky
 κ – součinitel určující zúženou hloubku
 x_c – vzdálenost výskytu zúžené hloubky od vtoku do propustku
 ξ – součinitel místní ztráty vtokem do propustku
 $Q^*(1/D)^{2,5}$ – průtok na jednotkový průměr propustku

6.2. Propustek s předsazeným vtokem

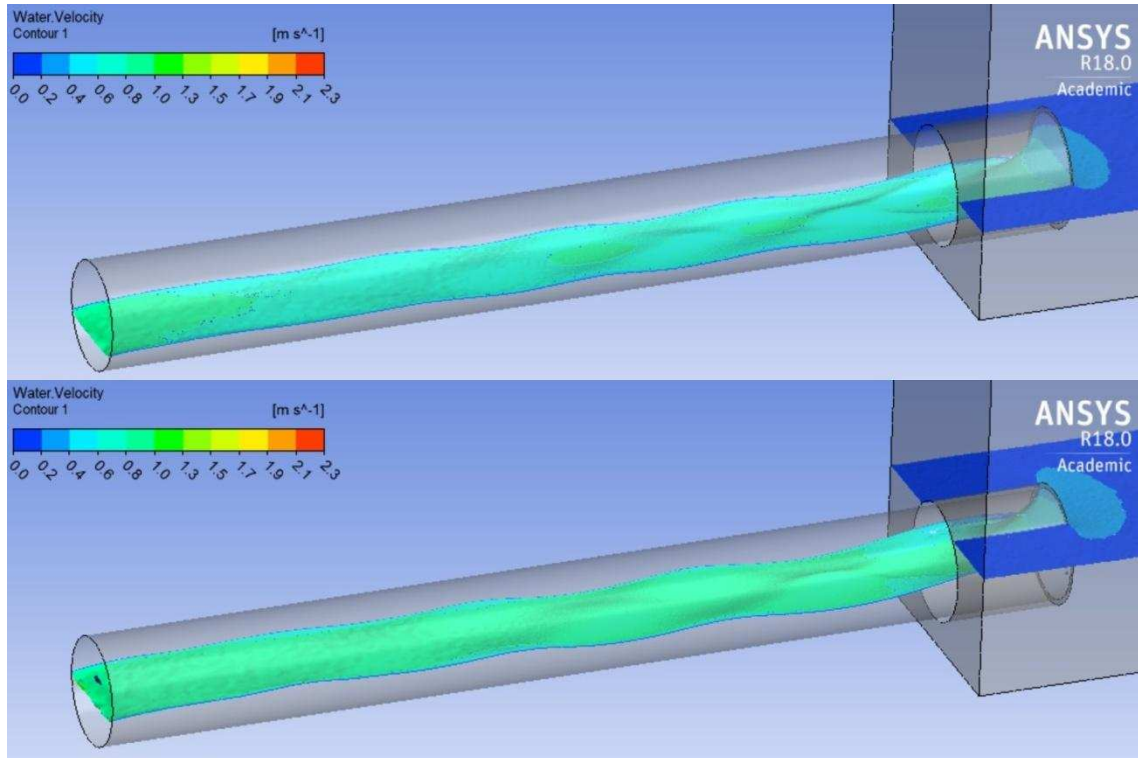
Pro propustek s předsazeným vtokem bylo naměřeno 7 vodních stavů. Vtok byl předsazen před čelo propustku o 120 mm a jeho dno bylo oproti dnu nátokového žlabu o 30 mm výše. Byly řešeny průtoky od $Q = 2,0$ l/s až po $Q = 14,9$ l/s. U tohoto typu se neprojevil žádný problém a všechny stavy byly vizuálně velice podobné fyzikálnímu modelování.

Opět byla na počátku ověřena správnost výpočtu pomocí konzumpční křivky nátokového žlabu těsně před vtokem (Graf 5). Je zde vidět, že čím větší průtok, tím se matematický model více odchyluje od fyzikálního modelování. Ovšem tuto odchylku můžeme považovat jako nepřesnost měření pomocí hrotového měřítka na fyzikálním modelu, protože při větších průtocích je měření obtížnější. Je patrné, že hodnoty z matematického modelu vykazují hladší průběh trendu.



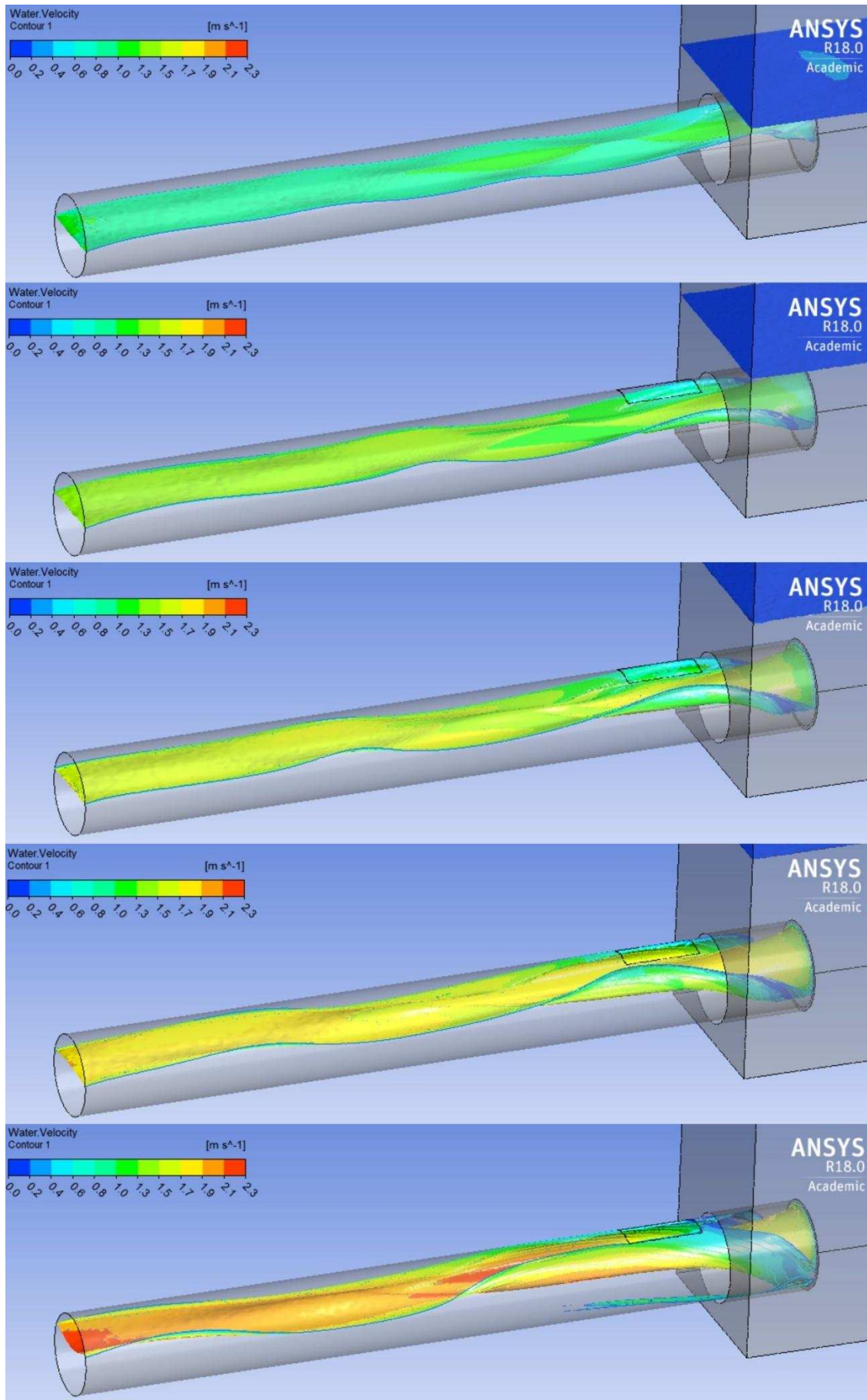
Graf 5 Konzumpční křivka nátokového žlabu před propustkem s předsazeným potrubím

Vtok o volné hladině je nasimulován pouze na průtokových stavech F1 a F2 (Obrázek 29). Proudění vody se zdá být ještě klidnější než v propustku s šikmým čelem. Charakter proudění vody v propustku a před propustkem je srovnatelný. Snížení hladiny nastává až těsně před propustkem a v něm se hladina rozvlní střídavým systémem vlnění (Obrázek 26). Se zvyšující se hladinou roste i rychlost proudění vody v propustku.



Obrázek 29 Stav F1 a F2 - vykreslení hladinové rychlosti

Proudění vody v propustku se stává zajímavějším až při průtokových stavech F3 až F7, což jsou stavy se zahlceným vtokem (Obrázek 30). Zde je vidět rozdíl mezi prouděním v propustku s šikmým čelem a prouděním s předsazeným vtokem. Zatímco u šikmého čela docházelo se zvyšující se hladinou ke zvětšování a oddálení hlavní vlny, tak u předsazeného vtoku pokud dochází ke zvyšování hladiny, tak hlavní vlna začíná stále na stejném místě, pouze dochází k jejímu prodloužení a zvětšování. Hladina před propustkem je klidná, až při vtoku do potrubí dochází k odtržení vodního paprsku a nastává proudění o volné hladině.



Obrázek 30 Stav F3, F4, F5, F6 a F7 - vykreslení hladinové rychlosti

V následující přehledné tabulce výsledků (*Tabulka 5*) si můžeme prohlédnout naměřené a vypočtené hodnoty vystupující z modelu propustku s předsazeným vtokem. U tohoto typu vtokové úpravy nebyl žádný průtok vyhodnocen jako hraniční stav mezi volným a zahlceným vtokem. Ovšem může být porovnáno, jestli je tato hranice alespoň mezi průtokovými stavy F2 a F3. V literatuře dohledáme v tabulkách (*Tabulka 2*) součinitel β od 1,08 po 1,09. Pro volný vtok při stavu F2 vyšla hodnota 0,86 a pro zahlcený vtok při stavu F3 hodnota 1,19. Čili tabulky jsou v souladu s tímto výsledkem, ale samozřejmě pokud by se žádalo přesnější ověření, je na místě další modelový výzkum zaměřený přímo na tuto problematiku.

K výpočtu velikosti zúžené hloubky u předsazeného vtoku se používá stejných vzorců a součinitelů jako v předchozím případě (6.1). I tady výstupy popírají současně používanou metodiku, která řeší velikost zúžené hloubky při volném vtoku a zahlceném vtoku odlišným způsobem. Opět zde vyšla funkční závislost poměru zúžené hloubky a průměru y_c/D na průtoku jednotkovým profilem $Q^*(1/D)^{2,5}$ (*Graf 6*).

U této vtokové úpravy není problém s nejednoznačností měření vzdálenosti výskytu zúžené hloubky od vtoku. Hodnoty vzdáleností se pohybovaly od 1,9 po 3,5 násobku průměru propustku. Opět se nepodařilo nalézt žádnou souvislost mezi vzdáleností zúžené hloubky od vtoku a velikostí průtoku.

Součinitel místní ztráty vtokem je i u této úpravy v současné metodice velmi nadhodnocen. Tabulky uvádějí hodnotu $\xi = 0,80$ až $0,90$ (*Tabulka 2*). U obou případů v modelování s volným vtokem vyšly hodnoty $\xi = 0,10$ a u všech zbývajících stavů se zahlceným vtokem vyšly hodnoty $\xi = 0,11$. Odchylka je u tohoto typu vtoku ještě výraznější než u předchozího.

Propustek s předsazeným vtokem														
č. stavu	Q [l/s]	y_h [cm]	y_h/D [-]	S_c [cm ²]	S_c/S_D [-]	y_c [cm]	y_c/D [-]	κ [-]	x_c [cm]	x_c/D [-]	ξ [-]	$Q^*(1/D)^{2,5}$ [m ³ /s]	volný/zahlčený vtok	
F1	2.04	6.37	0.58	30.1	0.32	3.82	0.35	0.86	21	1.9	0.10	0.51	volný	
F2	3.93	9.47	0.86	45.4	0.48	5.23	0.48	0.84	27	2.5	0.10	0.99	volný	
F3	6.23	13	1.19	58.4	0.62	6.44	0.59	0.82	27	2.5	0.11	1.56	zahlčený	
F4	8.34	17.2	1.57	63.3	0.67	6.89	0.63	0.76	35	3.2	0.11	2.09	zahlčený	
F5	10.44	22.5	2.05	64.4	0.68	7.07	0.64	0.70	23	2.1	0.11	2.62	zahlčený	
F6	12.57	29.2	2.66	64.8	0.69	7.11	0.65	0.64	29	2.6	0.11	3.15	zahlčený	
F7	14.89	37.4	3.40	65.4	0.69	7.17	0.65	0.59	38	3.5	0.11	3.73	zahlčený	

Tabulka 5 Přehledná tabulka výsledků pro propustek s předsazeným vtokem

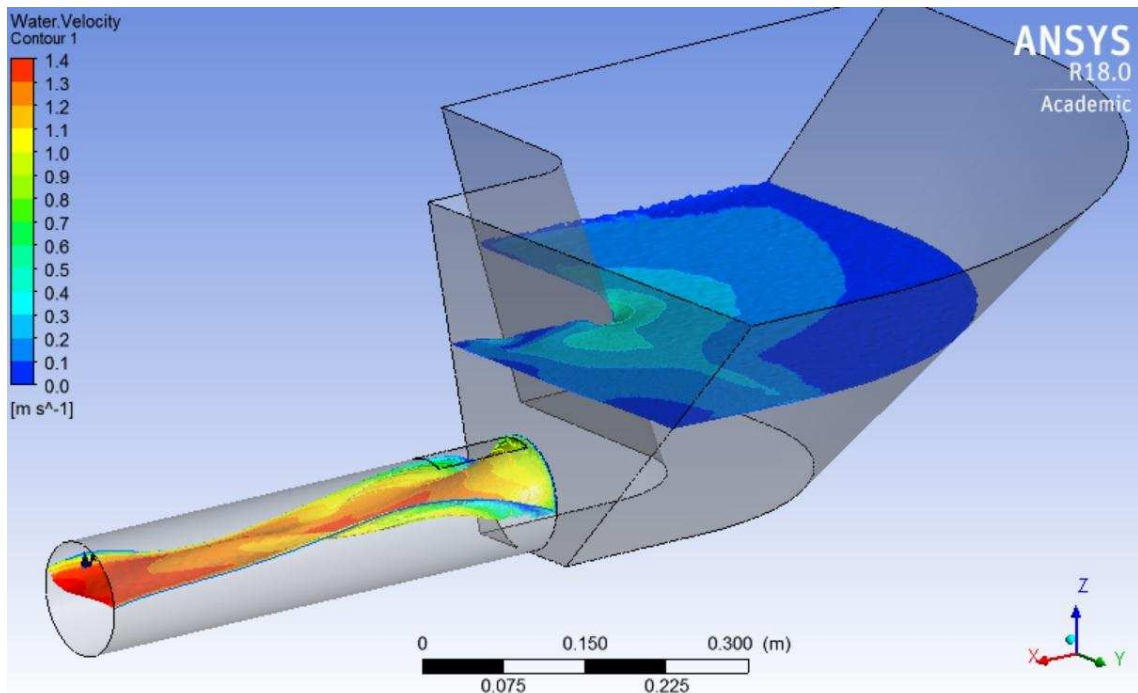
- Kde:
- Q – průtok při řešeném stavu
 - y_h – výška hladiny vody před propustkem
 - D – průměr propustku
 - S_c – průtočná plocha v profilu zúžené hloubky v propustku
 - S_D – maximální průtočná plocha propustku
 - y_c – výška hladiny vody v místě zúžené hloubky
 - κ – součinitel určující zúženou hloubku
 - x_c – vzdálenost výskytu zúžené hloubky od vtoku do propustku
 - ξ – součinitel místní ztráty vtokem do propustku
 - $Q^*(1/D)^{2,5}$ – průtok na jednotkový průměr propustku

6.3. Propustek s kolmým čelem při změně směru před propustkem

Dalším požadavkem bylo zjistit, co se stane s prouděním v propustku, pokud těsně před vtokem dojde ke změně směru proudění vody. Pro tento případ byl nasimulován jeden stav pouze pro ověření, zda v proudění nastane podstatná změna či nikoliv.

Průměr propustku byl zachován totožný jako u propustku s kolmým resp. s šikmým čelem. Sklon dna propustku činil 2 %. Poloměr oblouku byl 160 mm a jeho úhel 90°. Konkávní břeh nátokového žlabu dosahoval sklonitosti 1:1, kdežto konvexní 1:0,25. Důležité bylo také určit délku přímého úseku před propustkem, nakonec byla zvolena totožná jako poloměr oblouku čili 160 mm.

Žádná podstatná změna se neobjevila. Na modelu bylo vyzorováno naznačení propagujícího se šroubovicového proudění za obloukem, což vyvolá mírnou asymetrii vlnění na počátku propustku. Dále se za obloukem tvoří úplav, který by mohl vytvořit vír (Obrázek 31). Jinak bylo proudění v propustku velice podobné předcházejícím modelovým stavům.

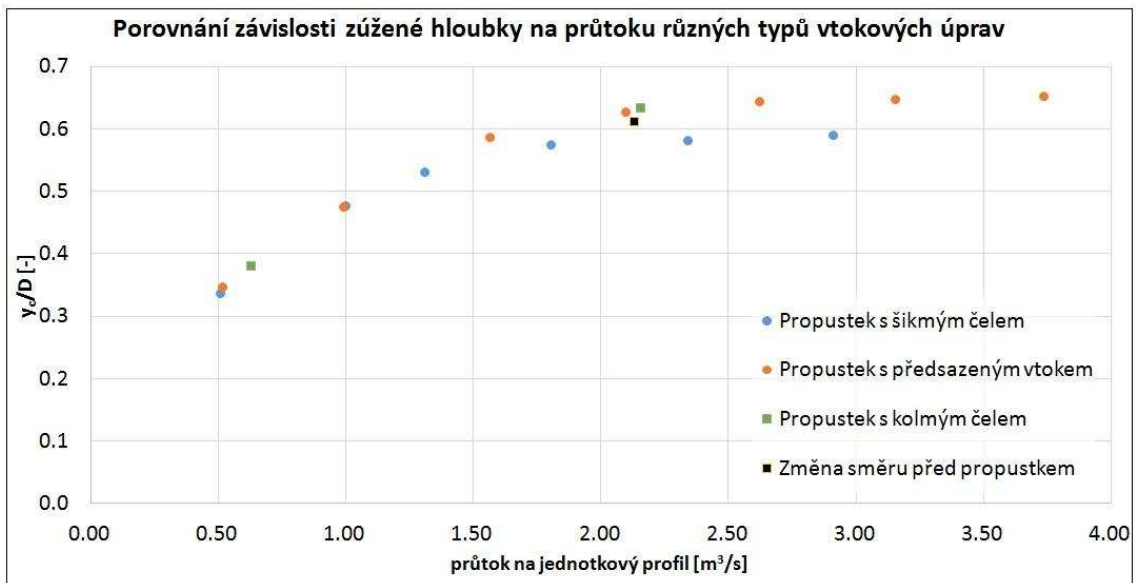


Obrázek 31 vykreslení hladinové rychlosti – změna směru před propustkem

6.4. Porovnání řešených propustků

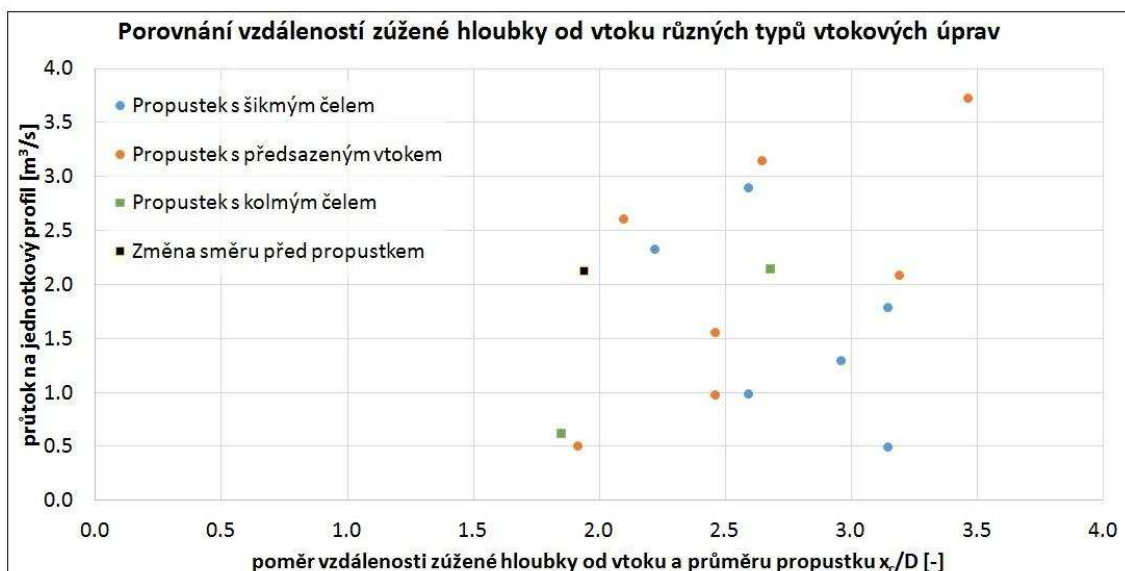
V této kapitole jsou porovnány některé výstupy ze všech řešených vtokových úprav pomocí grafů vytvořených v tabulkovém editoru Excel.

Při porovnání závislosti poměru zúžené hloubky a průměru propustku y_c/D na průtoku jednotkovým profilem vyšly graficky pěkné funkce u všech typů vtoků (Graf 6). U propustku s šikmým čelem vychází při větších průtocích nižší hodnoty y_c/D než u ostatních variant. Jinak propustky s kolmým čelem kopírují stejnou křivku jako propustek s předsazeným vtokem.



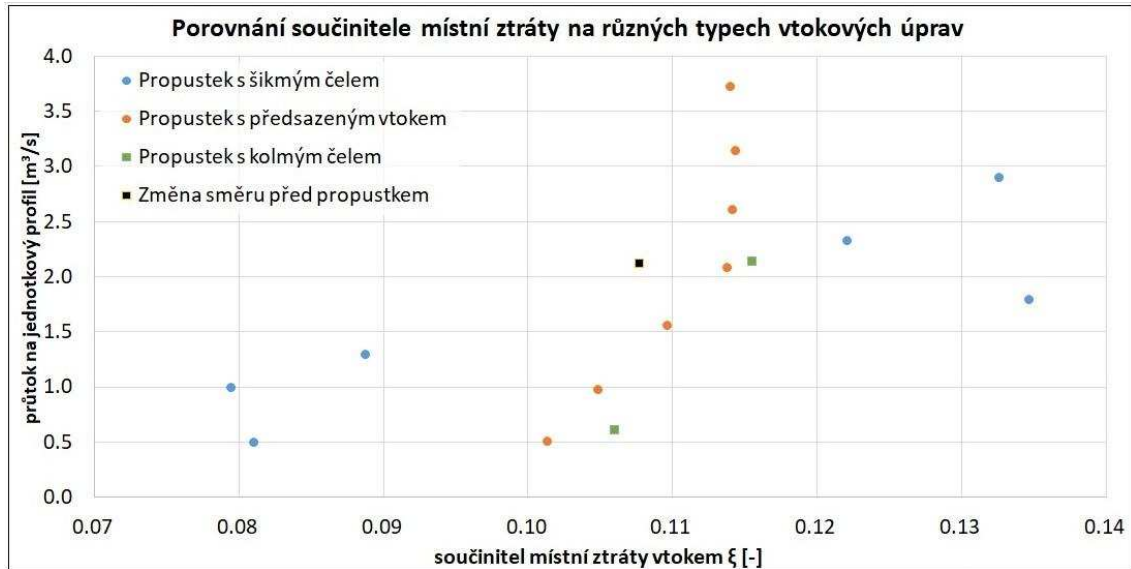
Graf 6 Porovnání závislosti zúžené hloubky na průtoku všech řešených typů vtokových úprav propustků

U vzdálenosti zúžených hloubek od vtoku propustku se nepodařilo nalézt žádnou funkční závislost a grafické posouzení vypadá spíše jako mračno náhodných bodů (Graf 7).



Graf 7 Porovnání vzdálenosti zúžené hloubky od vtoku všech řešených typů vtokových úprav

Poslední porovnání, které bylo vyhodnoceno, je porovnání součinitele místní ztráty (*Graf 8*). Při zvyšující se hladině před propustkem roste i součinitel místní ztráty. V grafu můžeme vidět pěknou závislost součinitele místní ztráty propustku s předsazeným vtokem. Hodnoty součinitele ξ propustku s šikmým čelem se rozdělily na 2 skupiny, a to skupina s volným vtokem a hraničním stavem a skupina se zahlceným vtokem. U dalších typů vtoku nemáme dostatečně mnoho stavů, abychom mohli určit, jestli jsou funkčně závislé či nikoliv. I když hodnoty z propustků s kolmým čelem korespondují s hodnotami propustku předsazeného.



Graf 8 Porovnání součinitele místní ztráty na všech řešených typech vtokových úprav

6.5. Porovnání výšky hladiny před propustkem

Nakonec bylo provedeno porovnání, o kolik se změní hladina vody před propustkem při použití aktuálně užívané metodiky a metodiky, která vyplývá z této analýzy. Do porovnání byly zahrnuty všechny typy řešených vtokových úprav, čili propustek s kolmým čelem, s šikmým čelem a propustek s předsazeným vtokem.

Byl zvolen propustek o průměru 1 m. Průtok byl zadán takový, aby způsobil zahlcený vtok. Výpočet byl postaven tak, aby nedošlo k ovlivnění zúžené hloubky dolní vodou, čili propustek má takový sklon, který zatopení neumožní. Zadané parametry pro všechny typy propustků jsou k vidění v následující tabulce (*Tabulka 6*).

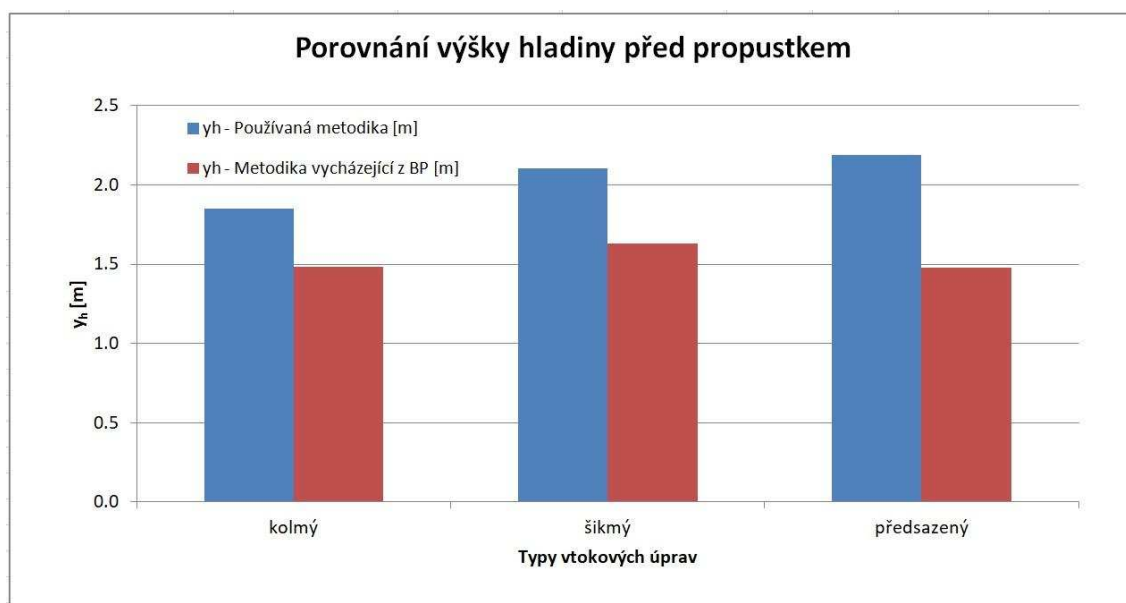
Q	2 m ³ /s
Q*(1/D) ^{2.5}	2 m ³ /s
D	1 m
α	1.05

Tabulka 6 Zadané parametry pro porovnání

U varianty, která byla počítána současnou metodikou, bylo využito vzorců a součinitelů z tabulek uvedených v kapitolách 2.3 a 2.4. Kdežto metodika vycházející z bakalářské práce byla řešena převážně pomocí tabulkových hodnot uvedených v kapitole 6. Z následující tabulky (*Tabulka 7*) a grafu (*Graf 9*) je patrné, že rozdíly mezi součiniteli místní ztráty vtokem hrají poměrně velkou roli v určování hladiny před propustky. Rozdíly jsou tak velké především proto, že v propustku, který není ovlivněný dolní vodou, dosahuje voda vysokých rychlostí a rychlostní výška tudíž není zanedbatelná.

Typ Vtoku	y _h - Používaná metodika [m]	Používaný součinitel ξ	y _h - Metodika vycházející z BP [m]	Součinitel ξ vycházející z BP	y _h - rozdíl [m]
kolmý	1.85	0.45	1.48	0.12	0.36
šikmý	2.10	0.75	1.63	0.12	0.47
předsazený	2.19	0.85	1.48	0.11	0.71

Tabulka 7 Porovnání výšky hladiny před propustkem



Graf 9 Porovnání výšky hladiny před propustkem

7. Závěr

Před započítáním této analýzy bylo kladeno za cíl určení součinitele místní ztráty vtokem do propustku a zjištění umístění a velikosti zúžené hloubky. Práce byla prováděna na modelech propustků s šikmým čelem, s předsazeným vtokem a s kolmým čelem při změně směru před ním. Byly vygenerovány výpočetní sítě na každý typ propustku, byl nastaven model a proveden samotný výpočet. Nakonec byly za pomoci tabulkového procesoru vyhodnoceny výstupy z matematického modelu.

Vyhodnocení velikosti zúžené hloubky dopadlo následovně. Hodnoty z modelů se příliš neodchylovaly od používaných vzorců a součinitelů. Pouze jedna věc nekoresponduje s tímto výzkumem. V používané metodice se počítá a uvažuje o skokovém přechodu mezi volným vtokem a zahlceným vtokem. Ovšem na základě tohoto modelování se může usuzovat, že k tomuto přechodu dochází postupně. Tedy že nedochází ke skokové změně zúžené hloubky při přechodu z volného do zahlceného vtoku, což ukazuje i graf (*Graf 6*).

Určení umístění zúžené hloubky nedopadlo zrovna podle představy. Byl předpoklad, že její vzdálenost od vtoku bude záviset na průtoku. Žádná funkční závislost na průtoku propustkem však nebyla nalezena. Na základě výstupů z modelu se dá očekávat, že zúžená hloubka se vyskytuje od vzdálenosti 1,9 po 3,5 násobku průměru propustku.

Nejdůležitější parametr v této práci je součinitel místní ztráty ξ . U toho bylo ve srovnání s tabulkovými hodnotami dosaženo až desetinásobné odchylky. Byla potvrzena domněnka, která vznikla již při fyzikálním modelování, že současně používané tabulkové hodnoty jsou velmi nadhodnocené a je třeba jejich zpřesnění. Bylo popsáno chování součinitele hlavně u propustků s šikmým čelem a s předsazeným vtokem, u kterých se povedlo zachytit závislost součinitele místní ztráty na průtoku.

8. Seznam použité literatury

- [1] **VOLEK, Jan, a další.** ČSN 73 6200, *Mosty - Terminologie a třídění*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, 2011.
- [2] **JANDORA, Jan a ŠULC, Jan.** *Hydraulika*. Brno : Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2007.
- [3] **BALVÍN, Pavel, a další.** *Technické podmínky 204 - Hydrotechnické posouzení mostních objektů na vodních tocích*. Praha : Ministerstvo dopravy - obor infrastruktury, 2009.
- [4] **HAVLÍK, Aleš a PICEK, Tomáš.** HY2V_08_Mosty_propustky - přednášky (naposledy navštíveno 16.4.2017).
<http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/prednasky.htm>.
- [5] **HLAVÁČ, Václav a ANDĚL, Petr.** *Mosty přes vodní toky, ekologické aspekty a požadavky - Metodická příručka*. Praha : Krajský úřad kraje Vysočina, 2008.
- [6] **ŠIMLEROVÁ, Dagmar, a další.** ČSN 73 6201 - *Projektování mostních objektů*. Praha : Český normalizační institut, 2008.
- [7] **TESAŘÍK, Igor.** *Základy hydrauliky, hydrologie a vodohospodářských staveb v dopravním inženýrství*. Bratislava : Nakladatelství ALFA, 1979.
- [8] **TOMEK, Jan, a další.** *Technické podmínky 232 - Propustky a mostky malých rozpětí*. Brno : Ministerstvo dopravy - obor pozemních komunikací, 2012.
- [9] **KUNŠTÁTSKÝ, Jiří.** *Hydraulické výpočty propustků a mostů*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1956.
- [10] **SEDLÁČEK, Daniel.** *Modelový výzkum proudění na vtoku do propustku - Bakalářská práce*. Praha 2015.
- [11] **KOZUBKOVÁ, Milada.** *Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX*. Ostrava : VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA, 2008.
- [12] ANSYS, Inc.: ANSYS-CFX Product page (naposledy navštíveno 20.4.2017).
<http://www.ansys.com/products/cfx.asp>.
- [13] **ŠKAŘUPOVÁ, Eva.** *Modelování plnění plavební komory České Vrbné - Diplomová práce*. Praha 2012.
- [14] **MIKULČÁK, Jiří.** *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. Praha : Prometheus, 1988.

9. Přílohy

Kruhový profil částečně plněný

Poměr plnění $\frac{h}{d}$	Poměrné hodnoty			Kritická funkce $\frac{\alpha Q^3}{g d^5}$	Poměrné moduly	
	průtočné plochy $\frac{F}{\frac{1}{4}\pi d^2}$	omoč. obvodu $\frac{0}{\pi d}$	hydraul. poloměru $\frac{R}{d}$		prátoku $\frac{K_h}{K_d}$	rychlosti $\frac{W_h}{W_d}$
0,05	0,0191	0,1445	0,033	—	0,004	0,184
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

Příloha 1 Tabulka mimo jiné pro odečtení kritické výšky v kruhovém profilu [9]