

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA HYDROTECHNIKY



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Posouzení ejekčního účinku pomocí CFD metod

Assessment ejection effect using CFD methods

Vedoucí práce: Dr. Ing. Petr Nowak

Květen 2020

Nikola Mrázková

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Mrázková Jméno: Nikola Osobní číslo: 468699
Zadávající katedra: Katedra hydrotechniky
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Posouzení ejekčního účinku pomocí CFD metod

Název bakalářské práce anglicky: Assessment ejection effect using CFD methods

Pokyny pro vypracování:

Vypracování 2D modelu pevného jezu s podjezím, simulace vodního skoku, kontrola parametrů pomocí klasického výpočtu vodního skoku. Doplnění přímé savky do modelu, vyhodnocení změn energie ve výstupním profilu savky vlivem přepadajícího paprsku, stanovení hlavních parametrů ovlivňující ejekční účinek a jejich analýza.

Seznam doporučené literatury:

CFX manuals
obecná hydraulika
rešerše

Jméno vedoucího bakalářské práce: Dr. Ing. Petr Nowak

Datum zadání bakalářské práce: 14.2. 2020 Termín odevzdání bakalářské práce: 17.5 2020

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

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“.

14.2. 2020

Datum převzetí zadání

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením Dr. Ing. Nowaka s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze dne:

.....

Nikola Mrázková

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat panu Dr. Ing Petru Nowakovi a panu Ing. Jiřímu Součkovi za poskytnuté konzultace, rady, ochotu a trpělivost.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce bylo provedení simulace vodního skoku a posouzení vlivů, které zapříčiňují vznik ejekčního účinku pomocí přepadajícího paprsku vody přímo nad savkou. V teoretické části bude představen postup výpočtu pro návrh jezu a podjezí a budou představeny parametry, které ovlivňují tyto výpočty. Dále bude proveden výpočet a následně na to simulace. V další části práce bude představena ejekce a význam ejekčního účinku pro využití vodní energie. Posuzovány budou dva vlivy na vznik ejekčního účinku pomocí přepadajícího paprsku nad savkou. Tyto vlivy budou posuzovány pomocí matematického modelu v programu ANSYS CFX.

Klíčová slova: Vodní skok, CDF, ANSYS CFX, ejekce, ejekční účinek, ejekční účinek pomocí přepadajícího paprsku vody nad savkou

Abstract

The goal of this bachelor thesis is to execute a simulation of a hydraulic jump and to assess the effects, which cause the overflow ejection into the tailrace above the draft tube. In the theoretical part of the thesis, the process of the calculation of the design of a spillway and a stillin basin will be introduced, as well as the parameters, which affect these calculations. Next, the calculations will be done and then the simulation. In the following part of the work, the ejection and the significance of the overflow ejection for the use of water energy will be introduced. Two effects on the overflow ejection into the tailrace above the draft tube will be assessed. These effects will be assessed by a mathematical model in the program ANSYS CFX.

Key words: hydraulic jump, CFD, ANSYS CFX, ejection, overflow ejection into the tailrace above the draf tube

Obsah

1. Úvod a cíl práce.....	1
2. Návrh modelu pevného jezu s podjezím	2
2.1 Jez.....	2
2.2 Přepady.....	2
2.3 Jezové přelivy.....	3
2.3.1 Přelivy s kruhově nebo elipticky zaoblenou korunou.....	3
2.4 Vodní skok a návrh vývaru.....	3
2.5 Výpočty pro simulaci vodního skoku.....	5
2.5.1 Výpočty měrné křivky horní vody.....	5
2.5.2 Přepad přes přelivnou hranu	6
2.6 Výpočet měrné křivky dolní vody	8
2.7 Návrh vývaru	9
3. CFD.....	10
3.1.1 ANSYS CFX.....	11
3.2 Vytvoření geometrie modelu a výpočetní sítě	11
3.3 Okrajové podmínky.....	13
3.4 Řešení úlohy.....	16
4. Ejekční účinek	20
4.1 Stanovení parametrů ovlivňující ejekci.....	22
5. Modely doplněné o savku	22
5.1 Model A	23
5.1.1 Způsob vyhodnocení	26
5.1.2 Výsledky modelu A.....	27
5.2 Model B	29
5.2.1 Výsledky modelu B.....	31
5.3 Porovnání modelů A a B.....	32
5.4 Model C.....	32
5.4.1 Výsledky modelu C.....	34

5.5	Porovnání zakončení přelivné plochy.....	35
6.	Závěr	37
6.1	Náměty pro další postup	37
7.	Použitá literatura a prameny	39
8.	Seznam obrázků.....	40
9.	Seznam tabulek	41
10.	Seznam grafů.....	41
11.	Seznam vzorců	42
12.	Seznam příloh	43

1. Úvod a cíl práce

V úvodu bakalářské práce bude představen teoretický základ k výpočtu a návrhu jezu a podjezí. Tato část se bude zabývat částmi jezu, které jsou důležité pro výpočet a návrh. Dále bude popsán postup výpočtu, díky kterému bude vytvořen návrh a okrajové podmínky pro další výpočty.

V další části bude popsána metoda CFD a program ANSYS CFX. Postup v tomto programu bude vysvětlen právě na simulaci vodního skoku. Bude vysvětlena volba okrajových podmínek, jejich nastavení a popsán průběh řešení. U tohoto modelu bude poukázáno na chyby, kterých se bude nutné v dalších výpočtech vyvarovat.

Poslední část bakalářské práce se bude zabývat ejekčním účinkem. Zde bude popsána ejekce jako jev, její význam ve využití vodní energie a představena prostorová uspořádání, jak ejekce docílit. Z těchto uspořádání bude vybráno jedno, které bude posuzováno. Vybraným typem bude ejekce pomocí přepadajícího paprsku přímo nad savkou.

Jako kritéria, které mají vliv na vznik ejekčního účinku, byly vybrány – tvar zakončení přelivné plochy a množství přepadajícího průtoku v poměru ku průtoku savkou.

Byly vytvořeny tři různé geometrie zakončení přelivné plochy. Z hlediska průtoků se jednalo o čtyři průtokové stavy. Celkem tedy na třech modelech byly spočteny čtyři průtokové stavy. Pro první model byly tyto průtokové stavy spočítány ve dvou variantách, pro zbylé jen v jedné variantě. Bylo tedy provedeno šestnáct výpočtů.

Každý model bude z hlediska poměru průtoků vyhodnocen zvlášť a na závěr budou vzájemně porovnány všechny modely.

V závěru práce budou shrnuty výsledky, bude poukázáno na úskalí řešení a bude navržen další postup při posuzování vzniku ejekčního účinku.

2. Návrh modelu pevného jezu s podjezím

V této kapitole bude popsán postup výpočtů pro návrh jezu a podjezí. Nejdříve ale bude uveden teoretický základ, na který se v následujících výpočtech bude navazovat.

2.1 Jez

Jez je vzdouvací objekt, který přehrazuje koryto toku. Tato konstrukce vzdouvá vodní hladinu a umožňuje efektivně vodu využívat a hospodařit s ní. Jez se liší od přehrady tím, že neakumuluje takové množství vody, aby se předpokládalo, že zvládne vyrovnat přirozené časově nerovnoměrné rozložení průtoku. V nádržích přehrad se může stát, že hladina vody kolísá někdy až několik metrů i dokonce desítek metrů. U jezů je kolísání hladiny minimální. V případě povodňových průtoků jez nefunguje jako ochrana před těmito vodami, ale zároveň škody možných katastrof jsou daleko menší než u přehrad.

Mezi účely jezu patří zmenšení příliš velkého sklonu dna toku, soustředění spádu pro využití vodní energie, trvalé zajištění hloubek vody nad jezem, zajištění potřebných plavebních hloubek v jezu, stabilizace hladiny podzemní vody, vytváření vhodných podmínek pro rekreaci a dotváření harmonického a urbanistického rázu. (1)

Jezy se dělí do dvou hlavních skupin dle konstrukčního řešení a funkce, a to na pevné a pohyblivé jezy. Zaměřením této práce budou pevné jezy včetně jejich návrhu.

Pevné jezy byly vystavovány hlavně v minulosti. Nyní se upřednostňují jezy pohyblivé, které jsou schopné udržet potřebnou hladinu vody. Pevné jezy se vystavují stále, ale nyní jde hlavně o stabilizaci a úpravu toků, avšak můžeme jejich výstavbu pozorovat i při rekonstrukcích malých vodních elektráren.

2.2 Přepady

Jedná se o pohyb vody s volnou hladinou přes objekt, pro který platí rozdíl horní hladiny a dolní hladiny. V korytech toků se tím rozumí přepad přes stupně ve dně. Objekt, přes který přepadá přepadový průtok, nazýváme přeliv. Nejvyšší část přelivu označujeme za přelivnou hranu.

Pro hydraulický výpočet lze tuto úlohu zjednodušit na rovinnou úlohu, která je kolmá k přelivné hraně. Na výpočet přepadajícího průtoku má hlavní vliv pět činitelů. Jedná se o tíhové zrychlení g , šířku přelivné hrany neboli efektivní šířku b , která počítá s bočními kontrakcemi, energetická výška přepadu h_0 , což je výška přepadového paprsku společně s rychlostní výškou, součinitel zatopení σ , který zahrnuje vliv dolní vody, a součinitel přepadu m , který zahrnuje například tvar přelivu.

$$Q = \frac{2}{3} \mu_p b \sqrt{2g} h_0^{\frac{3}{2}}$$

$$Q = m b \sqrt{2g} h_0^{\frac{3}{2}}$$

Rovnice 1 - Bazinova rovnice pro dokonalý přepad

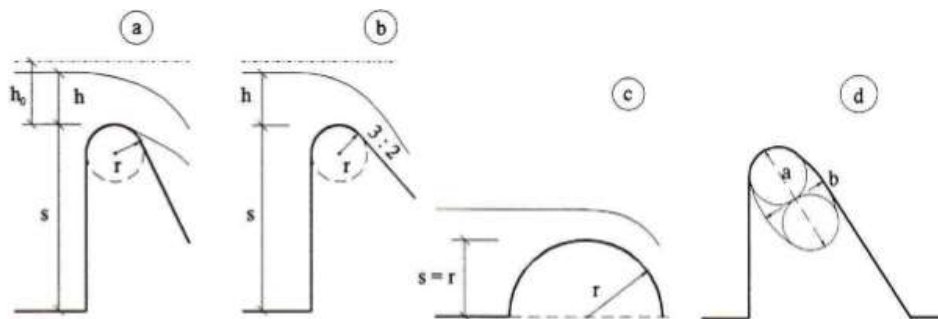
Přepady se dělí podle tloušťky a tvaru na přepad přes ostrou hranu, přepad přes širokou korunu a přepad přes jezový přeliv. Přepady dále dělíme na zatopený a nezatopený dle způsobu napojení paprsku na dolní vodu. Při dokonalém přepadu dolní voda neovlivňuje přepadový průtok. Přepady dělíme dle půdorysného uspořádání na čelní, boční a křivočaré. (2)

2.3 Jezové přelivy

Jezové přelivy dělíme na přelivy s vodorovnou korunou, na přelivy s kruhově nebo elipticky zaoblenou korunou a na parabolické proudnicové přelivy.

2.3.1 Přelivy s kruhově nebo elipticky zaoblenou korunou

Tyto přelivy patří mezi jednoduché a hydraulicky účelně upravené. Rozlišujeme čtyři základní schémata, pro která jsou stanoveny vzorce přepadového součinitele.



Obrázek 1 - Jezové přelivy s kruhově nebo elipticky zaoblenou korunou (10)

Tato základní schémata obsahují elipticky zaoblený přeliv a tři kruhově zaoblené přelivy, kde první má svislou vzdušnou stranu, druhý má vzdušnou stranu ve sklonu 3:2 a poslední má poloměr rovný výšce přelivu.

2.4 Vodní skok a návrh vývaru

Když přechází bystřinné proudění do říčního, děje se tak nespojitě pomocí vodního skoku. Naopak přechod z říčního na bystřinné se děje plynule. Vodní skok vzniká například přepadem přes jezové těleso nebo náhlým zvětšením sklonu.

Pro vodní skok je typické náhlé zvětšení hloubky a změna rychlosti. Při této změně dochází k velké přeměně kinetické energie na ztráty celkové energie. (3)

U posouzení vodního skoku vzhledem k patě jezu se porovnává hloubka vody v korytě dolní vody y_d , která je daná měrnou křivkou dolní vody, a druhá vzájemná hloubka vodního skoku y_2 .

Pokud je $y_d < y_2$, jedná se o vodní skok oddálený a znamená to, že v podjezí nejsou podmínky pro vznik vodního skoku a bystřinné proudění pokračuje dál. Když se $y_d = y_2$, vzniká vodní skok přilehlý. Jedná se o zcela výjimečný případ, kdy přímo u paty jezu jsou podmínky pro vznik vodního skoku. O vodní skok vzdutý se jedná, pokud je $y_d > y_2$. Znamená to, že vodní skok má tendenci se posouvat směrem proti proudu. (3)

Vývar slouží k tlumení kinetické energie v podjezí, kde dochází k přechodu z bystřinného proudění na říční pomocí vodního skoku. Vývar je vlastně stavební prohloubení dna.

Pro návrh vývaru je určující míra vzdutí $\bar{\sigma}$, která je daná vztahem:

$$\sigma = \frac{y_d}{y_2}$$

Rovnice 2 - Výpočet míry vzdutí

Pokud je výsledek menší než 1,05, není nutné navrhnout v podjezí vývar. Pokud je hodnota větší, je nutné navrhnout prohloubení dna u paty jezu, tedy hloubku vývaru d tak, aby nově upravený vztah vyšel v rozmezí 1,05 – 1,10.

$$\sigma = \frac{y_d + d}{y_2}$$

Rovnice 3 - Výpočet míry vzdutí se zohledněnou hloubkou vývaru

Délka vývaru L_v je vzdálenost od paty jezu ke konci uzavíracího prahu. Výpočet délky vodního skoku se liší dle různých autorů. Bude zde představen výpočet dle Nováka, který bude následně použit.

$$L_v = K \cdot (y_2 - y_1)$$

Rovnice 4 - Výpočet délky vývaru (dle Nováka)

Kde y_1 je první vzájemná hloubka vodního skoku, y_2 druhá vzájemná hloubka vodního skoku a hodnota K je určena dle následující tabulky, dle podílu druhé a první vzájemné hloubky vodního skoku.

y_2/y_1	K
3–4	5,5
4–6	5
6–20	4,5
20 a více	4

Tabulka 1 - Hodnoty parametru K pro výpočet délky vývaru

Tvar zakončení vývaru se také liší. Každý autor doporučuje trochu jiný. Může být svislý, ale například Smetana doporučoval stupňovitý a Novák se šikmou plochou 1 : m, kde hodnota m je 2 až 3.

2.5 Výpočty pro simulaci vodního skoku

V této kapitole bude představen postup výpočtu a uvedeny získané hodnoty, které budou použity jako okrajové podmínky pro následující simulace všech modelů.

Simulace vodního skoku původně měla sloužit jako základ pro model, do kterého bude doplněna savka. Bohužel simulace vodního skoku nebyla provedena zcela správně. Proto byla geometrie pro další modely upravena. Simulace vodního skoku bude sloužit jako návod práce v programu ANSYS CFX a hlavně jako návod pro simulaci neustáleného proudění.

Nejdříve byl zvolen tvar přelivné plochy, šířka přelivné hrany a také rozměry koryta dolní vody včetně sklonu. Následně tyto údaje byly zpracovány v programu Excel. Výsledkem byl výpočet měrných křivek horní a dolní vody a následně byl proveden návrh vývaru.

Inspirace pro některé hodnoty byly z podkladů pro jez Terezín. Podstatné však bylo splnění podmínky, aby spád, tedy rozdíl mezi horní a dolní hladinou, nebyl menší než 4 metry.

2.5.1 Výpočty měrné křivky horní vody

Pro tyto výpočty je zásadní volba přelivné plochy. Bylo vybíráno ze známých tvarů přelivů, pro které jsou definované vzorce pro výpočet přepadového součinitele.

Přelivnou plochou byl zvolen kruhově zaoblený jezový přeliv se sklonem na vzdušní straně 3:2 viz. Obrázek 1 schéma b). Tato plocha má známý vzorec, jedná se o výpočet dle Rehbocka:

$$\mu_p = 0,312 + \sqrt{0,3 - 0,01 \cdot \left(5 - \frac{h}{r}\right)^2} + 0,09 \cdot \frac{h}{s}$$

Rovnice 5 - Výpočet součinitele přepadu dle Rehbocka pro kruhově zaoblenou plochu se sklonem vzdušního líce 3:2

Kdy za h dosazujeme výšku přelivného paprsku, za s svislou vzdálenost od přelivné hrany k dnu horního koryta a za r poloměr kruhově zaoblené plochy.

Pro tento tvar rovnice platí určitá omezení, kdy musí být splněny obě tyto podmínky:

$$0,2 < r < s$$

$$h \leq r \cdot \left(6 - \frac{20 \cdot r}{s + 3 \cdot r}\right)$$

Rovnice 6 - omezení platnosti výpočtu přepadového součinitele

2.5.2 Přepad přes přelivnou hranu

Ve výpočtu bylo důležité znát přesné hodnoty průtoku a v závislosti na nich dopočítat výšku přepadového paprsku, tedy počítat opačně, než je zvykem.

Postup byl takový, že byly voleny nejprve hodnoty průtoku od 0 m³/s po 480 m³/s vždy po 10 m³/s. Následně pro danou hodnotu průtoku byla odhadnuta výška přepadového paprsku, nebo byla pro odhad použita výška přepadového paprsku z výpočtu z předchozí hodnoty průtoku. Poté byl spočítán součinitel přepadu pro daný stav. Z přepadové rovnice byla vyjádřena hodnota energetické výšky.

$$h_0 = \left(\frac{2 \cdot Q}{2 \cdot \mu_p \cdot \sqrt{2g}}\right)^{\frac{2}{3}}$$

Rovnice 7 - Výpočet energetické výšky přepadového paprsku z rovnice pro přepad

Následně byla dopočítána rychlost pomocí výšky přepadového paprsku.

$$v = \frac{Q}{b \cdot (s + h)}$$

Rovnice 8 - Výpočet rychlosti

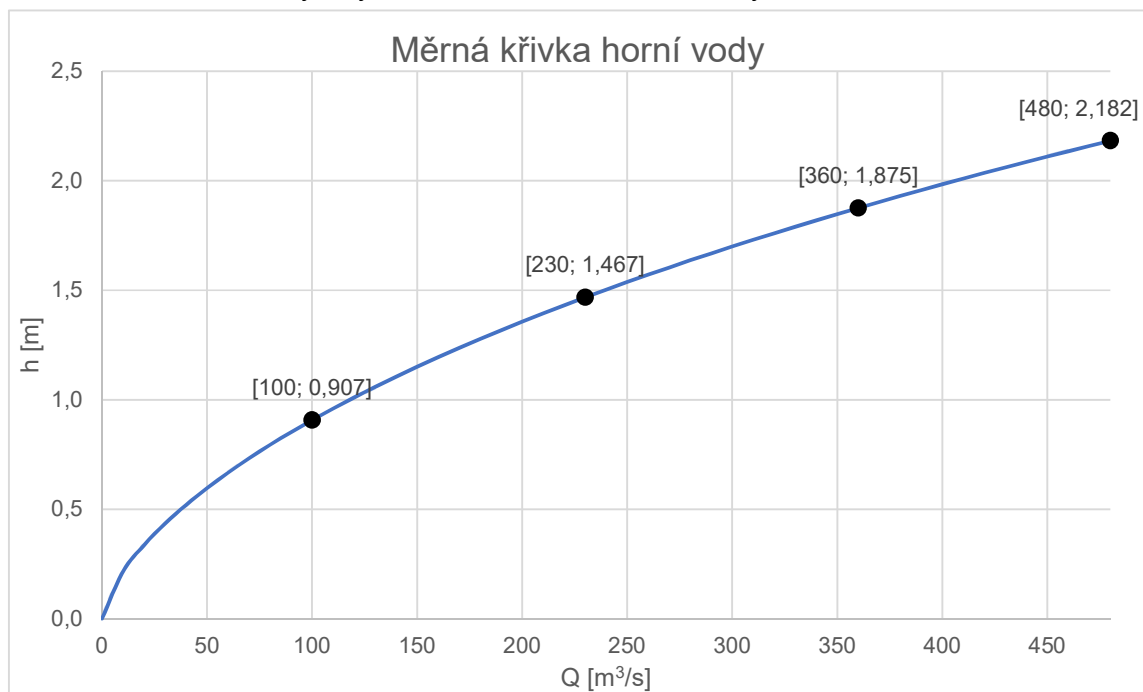
V dalším kroku byla provedena oprava původní hodnoty výšky přepadového paprsku díky znalosti, že rychlostní výška a výška přepadového paprsku mi dají dohromady energetickou výšku přepadu.

$$h = h_0 - \frac{\alpha v^2}{2g}$$

Rovnice 9 - Výpočet výšky přepadového paprsku

Tento celý postup byl opakován, ale pro opravenou hodnotu výšky přepadového paprsku. Tyto iterace byly provedeny čtyři, kdy nejvyšší rozdíl iterací byl kolem jedné desetiny milimetru.

Z těchto hodnot byla vytvořena měrná křivka horní vody.



Graf 1 - Měrná křivka horní vody s vyznačenými hodnotami okrajových podmínek

Na tomto grafu je zobrazena měrná křivka horní vody, kde jsou černě vyznačené hodnoty, které byly dále využity jako okrajové podmínky.

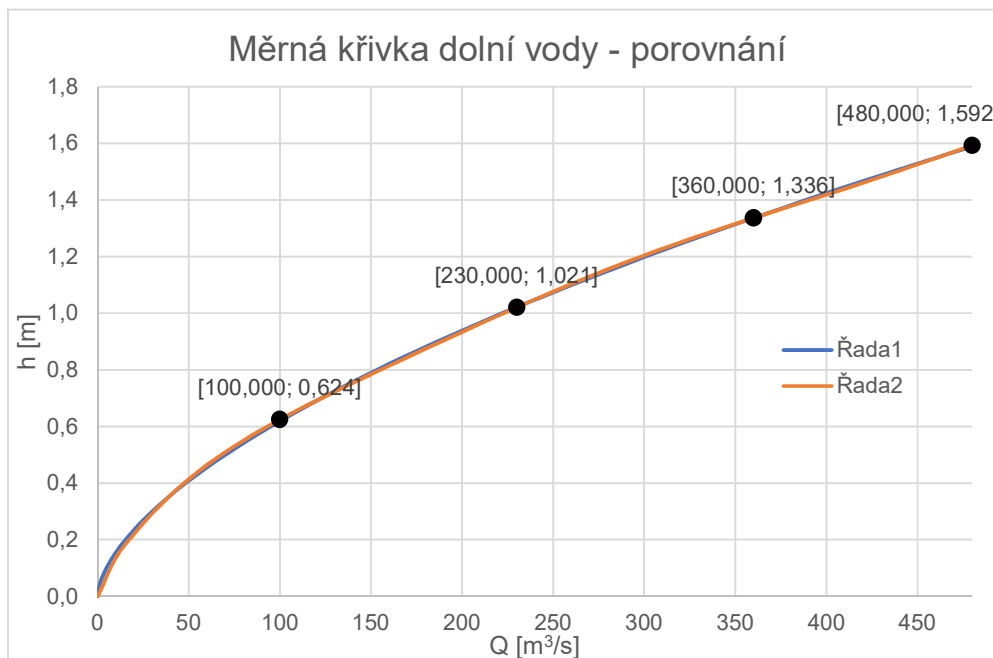
2.6 Výpočet měrné křivky dolní vody

Zde platí totéž jako pro výpočet měrné křivky horní vody, opět je třeba znát přesné hodnoty průtoků a následně dopočítat hodnoty hloubek. Postup byl takový, že byly nejdříve napočítány hodnoty průtoků pro dané hloubky, a z nich byl vytvořen graf. Pro graf byla zjištěna spojnice trendů.



Graf 2 - Měrná křivka dolní vody

Díky předpisu spojnice trendů bylo možné pro přesné hodnoty průtoků dopočítat hloubky vody v dolním korytě.



Graf 3 - Měrná křivka dolní vody (porovnání)

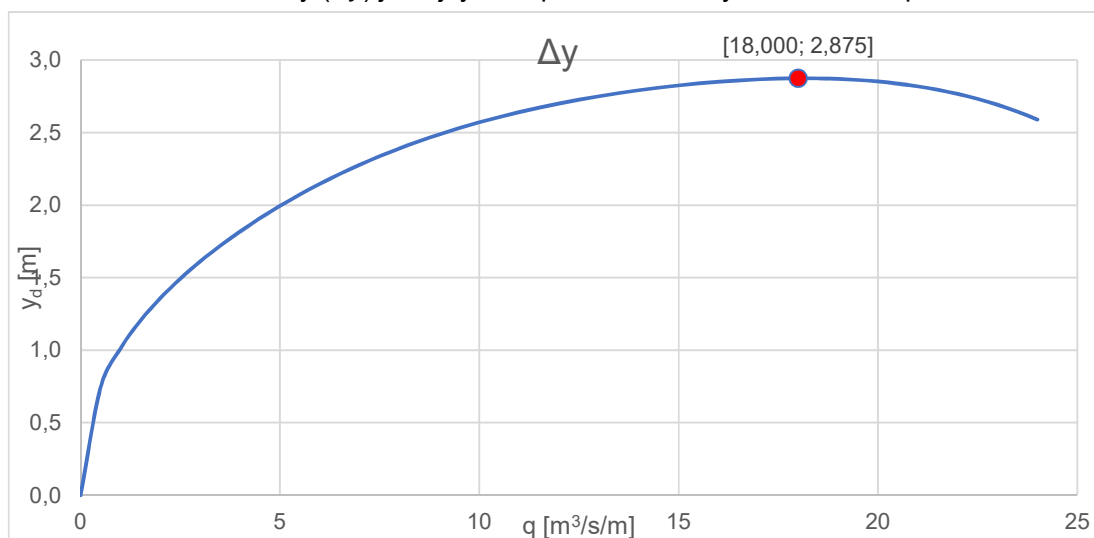
Na tomto grafu je vidět porovnání dvou křivek. Modrá – Řada1 je křivka, ze které se vycházelo, a byl pro ni zjištěn předpis spojnice trendů, z kterého byla dopočítána křivka oranžová – Řada2. Na oranžové křivce jsou černými puntíky opět vyznačeny hodnoty, které byly následně využity jako okrajové podmínky.

2.7 Návrh vývaru

Pro návrh vývaru je důležité znát pro každý průtokový stav, který se převede na specifický průtok, hodnoty hloubky dolní vody a energetickou výšku horní vody.

Postup byl takový, že byla spočtena hodnota celkové energie horní vody (součet geodetické výšky, tlakové výšky a rychlostní výšky) pro každý průtokový stav. Díky ní pak byly dopočítány obě vzájemné hloubky vodního skoku. Druhá hloubka vodního skoku byla porovnána s hloubkou dolní vody pro daný průtokový stav.

Průtokový stav, na který se navrhuje vývar, je ten, kdy rozdíl druhé vzájemné hloubky vodního skoku a dolní vody (Δy) je nejvyšší. Zpravidla to nebývá maximální průtok.



Graf 4 - Zobrazení rozdílu dolní vody a druhé vzájemné hloubky v závislosti na specifickém průtoku

V tomto případě vyšel nejhorší stav pro specifický průtok 18 m³/s/m (vyznačené v grafu), což odpovídá průtoku 360 m³/s.

Pro tento stav byla hledaná taková hloubka vývaru, pro kterou vyjde míra vzdutí mezi 1,05 a 1,10. Postup byl takový, že byla odhadnuta hloubka vývaru, která byla následně připočtena jako geodetická výška k hodnotě celkové energie. Z té pak byly dopočteny vzájemné hloubky vodního skoku. Byla provedena kontrola míry vzdutí. Následně byl pomocí podílu vzájemných hloubek nalezen parametr K, který byl dosazen do Rovnice 4 - Výpočet délky vývaru (dle Nováka). Celková délka vývaru vyšla 23 metrů a jeho hloubka 5 metrů.

3.CFD

Existují různé metody vyhodnocení úlohy proudění. Nejjednodušší metoda je analytická, ale ta funguje pouze na jednoduché případy. Dále můžeme udělat fyzikální model, který bývá velice přesný, ale na druhou stranu bývá dražší a je limitován například velikostí prostorů. Poslední je numerická metoda, která může být stejně přesná jako experiment, a navíc tím získáme více informací za menší cenu. K numerickému řešení využíváme výpočetních programů.

Zkratka CFD znamená Computational Fluid Dynamics, což lze přeložit jako výpočty v dynamice tekutin. Jedná se o počítačovou simulaci, která je schopna vyřešit úlohy proudění tekutin, sdílení tepla a mnohé další procesy. Řešení je založené na řešení rovnic mechaniky tekutin v oblasti se specifickými okrajovými podmínkami. Proudění popisují Navier – Stokesovy rovnice spolu s rovnicí kontinuity.

Postup práce by se dal shrnout do tří fází. V první fázi je důležitá volba geometrie a nastavení okrajových podmínek, druhá fáze je samotný výpočet a třetí fází je zobrazení výsledků.

Hlavním důvodem, proč se většina úloh musí řešit numericky, jsou Navier – Stokesovy rovnice. Jedná se o parciální diferenciální rovnice a jejich analytické řešení pro složitější geometrie je nemožné. Jsou to rovnice, které popisují bilanci hybnosti. Říkají, že setrvačná síla částice nebo elementárního objemu se rovná součtu sil působících na element. Síly působící na element jsou třecí, tlakové a hmotnostní. Mezi hmotnostní patří například gravitační síla. (4)

Rovnice se dají řešit třemi různými diskretizačními procesy. Jedná se o metodu konečných diferencí, metodu konečných objemů a metodu konečných prvků. Metoda konečných diferencí je nejstarší metodou. Využívá diferenciálního tvaru rovnic a princip fungování je aproximace v uzlových bodech. Metoda konečných objemů je nejvíce využívána v CFD. Využívá integrálního tvaru rovnic a řešení je aproximováno přes hranice kontrolního objemu. Metoda konečných prvků je podobná metodě konečných objemů, ale aproximuje po částech lineárních funkcí. Tato metoda se nejvíce využívá při pevnostních výpočtech, není vhodná pro turbulentní proudění. (4)

Pro metodu konečných objemů jsou hlavními parametry přesuny a změny proměnných, naopak od jejich hodnot v jednotlivých uzlech, jako tomu bylo pro metodu konečných diferencí. Prvotní zjednodušená představa byla, že si model lze představit jako soustavu malých nádrží (kontrolních objemů) navzájem spojených trubicemi (mřížkou), které dávají informaci o přenosu látky. Pro metodu konečných objemů je výpočetní síť rozdělena na konečný počet

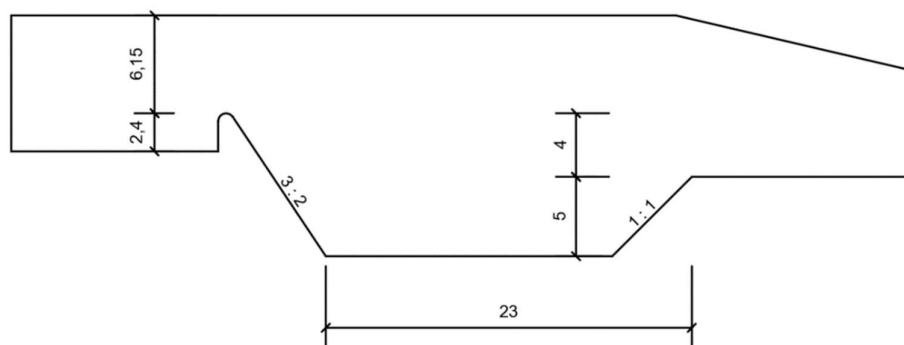
malých kontrolních objemů. Hodnoty složek rychlostí a skalárních veličin jsou v geometrických středech kontrolních objemů, přenos informací probíhá přes stěny a vypočítává se jako suma integrálu jednotlivé hrany. (5)

3.1.1 ANSYS CFX

Software ANSYS CFX spadá do skupiny programů, které analyzují proudění (CFD). Program je integrován do prostředí ANSYS WORKBENCH. Rozhraní programu se skládá z pěti složek. První slouží k vytvoření geometrie, druhý k vytvoření výpočetní sítě. Třetí složka „Setup“ nazývaná CFX-Pre slouží k nastavení fyzikálních vlastností modelu, okrajových podmínek i nastavení výpočtu. Další složka je „Solution“ neboli CFX-Solver, který slouží k řešení dané úlohy. V této fázi můžeme sledovat, jestli naše úloha konverguje, nebo lze sledovat imbalance, a to vždy na grafu v závislosti na počtu provedených iterací. Poslední složka „Result“ CFD-Post slouží k zobrazení výsledků a hodnot. V této fázi si můžeme například zobrazovat kontury daných veličin na námi vytvořené řezy, zobrazit proudnice, nebo přes funkční kalkulátor nechat spočítat určité hodnoty.

3.2 Vytvoření geometrie modelu a výpočetní sítě

Z daných volených a následně i vypočtených hodnot byl vytvořen model v programu AutoCAD, pro který byla následně vytvořena výpočetní síť. Toto bylo poté vloženo do programu ANSYS CFX, kde byly přidány okrajové podmínky a provedena simulace vodního skoku na vytvořeném modelu.



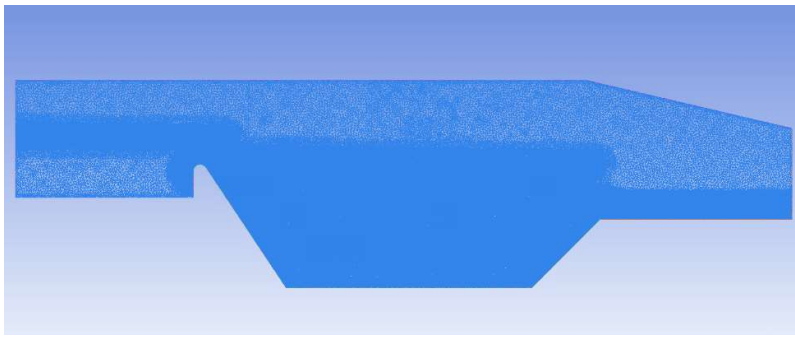
Obrázek 2 - Model pro simulaci vodního skoku

V modelu byly pevně dané hodnoty výšky přelivu, hloubka a délka vývaru, dále bylo nutné dodržet sklon vzdušné strany přelivu dle výpočtu. Ostatní hodnoty byly zamýšlené tak, aby byl dostatečný prostor na zadání okrajových podmínek a dostatečný prostor nad uvažovanou hladinou. Celý model byl tedy necelých 60 metrů dlouhý. Sešikmená část na konci

modelu byla snahou o ušetření z celkového počtu výpočetních uzlů ve výpočetní síti. Předpoklad byl takový, že tam voda nebude zasahovat a že toto místo nebude důležité.

Následně byl celý model vytažen do šířky 0,1 metru, aby bylo splněno uvažování 2D úlohy.

Výpočetní síť byla vytvořena v programu ANSYS ICEM CFD. Snaha byla, aby výpočetní síť měla kolem 500 000 výpočetních uzlů a aby byla zhuštěna v místech, kde se bude nacházet rozhraní vody a vzduchu, a v místě předpokládaného vodního skoku.



Obrázek 3 - Vytvořená výpočetní síť modelu vodního skoku

Po importování geometrie do programu ANSYS ICEM CFD byla geometrie opravena pomocí funkce „repair geometry“. Tato funkce opraví možné nepřesnosti ve vytvořené geometrii. Z možností zobrazení geometrie byla nechána zaškrtnuta jenom možnost zobrazení povrchů. Původní geometrie byla rozdělena na části, pro která budou různá nastavení při tvoření výpočetní sítě. Části byly pojmenovány podle okrajových podmínek, aby to usnadnilo a zpřehlednilo následnou práci.

Typ povrchové sítě byl nastaven „All Tri“ a jako metoda generování „Patch Independent“, což znamená, že povrchová síť je tvořena výhradně trojúhelníky různých velikostí. Pro objemovou síť byl volen typ „Tetra/Mixed“ a metoda „Quick(Delaunay)“. Hodnota nejvyššího elementu byla zadána 6 400 mm. Při generování výpočetní sítě dochází k tomu, že model je nejdříve pokryt hrubými elementy, které se následně dělí na menší, aby seděly do definované oblasti. V posledním kroku byla generována prizmatická síť. Prizmatická síť byla nastavena v okolí stěn – v tomto případě na nátoku před jezem, na přelivné ploše, na vývaru a dnu pod jezem. Růst od prvního elementu byl nastaven exponenciální s hodnotou 1,2. Celkový počet vrstev byl nastaven na 10 kromě úseku před jezem. Zde byl nastaven počet vrstev pouze 5. Zahuštění sítě v místech vodního skoku a předpokládaného rozhraní voda – vzduch bylo vytvořeno pomocí funkce „Density“.

Byla vytvořena nestrukturovaná výpočetní síť, která má celkem 425 757 výpočetních uzlů.

3.3 Okrajové podmínky

Model včetně výpočetní sítě byl importován do programu ANSYS CFX. Zde byly použity hodnoty z předchozího výpočtu jako okrajové podmínky. Byl prováděn výpočet pro stav, pro který byl navrhován vývar.

V programu bylo nastaveno, že se v modelu vyskytuje kromě vody i vzduch a že gravitace směřuje proti kladné ose z. Následně byly vypsány „expressions“ (funkce, výrazy), které budou dále využívány pro nastavení okrajových podmínek.

```
√ DenH      998 [kg m^-3]
√ DownH     6.336 [m]
√ DownPres  DenH*g*DownVFWater*(DownH-z)
√ DownVFAir step((z-DownH)/1[m])
√ DownVFWater 1-DownVFAir
√ Qtop      Water.massFlow()@Opening
√ UpH       10.875 [m]
√ UpPres    DenH*g*UpVFWater*(UpH-z)
√ UpVFAir   step((z-UpH)/1[m])
√ UpVFWater 1-UpVFAir
```

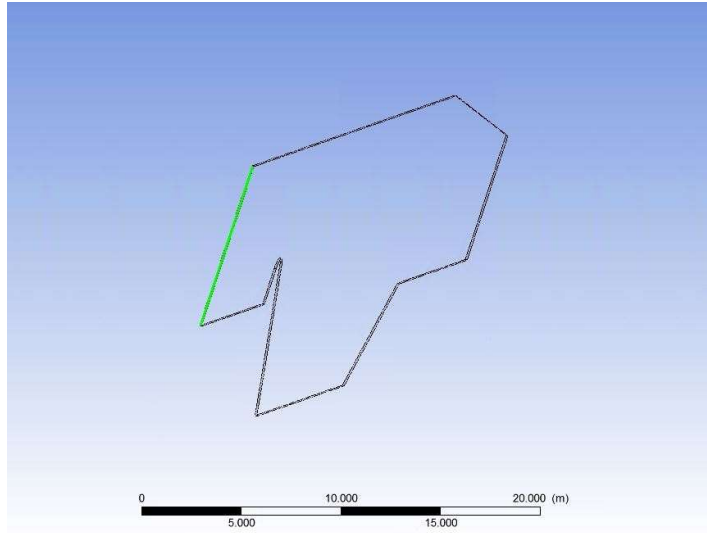
Obrázek 4 - Expressions pro model vodního skoku

Nejdříve byla nastavena hodnota hustoty vody (DenH). Poté byla nastavena hodnota polohy horní a dolní vody vzhledem k celkové geometrii modelu. Tyto dva výrazy byly pojmenovány UpH (horní voda) a DownH (dolní voda). Obě hodnoty byly získány pomocí předchozího výpočtu. Díky těmto výrazům bylo možné předepsat funkce pro „volume fraction“, které říkají, kde se vyskytuje voda a kde vzduch. Pak byly předepsány funkce pro hydrostatický tlak, kde byl do výrazu doplněn parametr UpVFWater (či DownVFWater), který zajišťuje, že se hydrostatický tlak bude počítat právě jenom od úrovně hladiny po dno. Výrazy pro hydrostatický tlak byly pojmenovány UpPres pro horní vodu a DownPres pro dolní. Výraz Qtop je nastaven jako kontrola, zda je model dobře vytvořen. Jedná se o funkci, která počítá objem vody, který proteče přes danou část. Toto místo bylo zvoleno jako horní okrajová podmínka. Tedy místo, kde by měl být jenom vzduch. Pokud by v průběhu výpočtu bylo pozorováno, že hodnoty této funkce nejsou rovny nule, znamená to, že je špatně nastavena geometrie modelu.

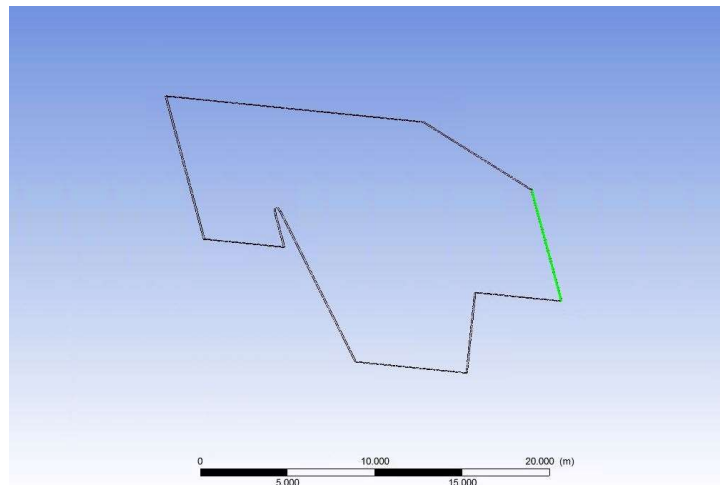
V tomto modelu bylo nastaveno pět okrajových podmínek – okrajová podmínka na vtoku (Inlet), okrajová podmínka výtoku (Outlet), okrajová podmínka pro stěny (Wall), horní okrajová podmínka (Opening) a okrajová podmínka symetrie (Symmetry).

Okrajová podmínka vtoku byla nakonec zvolena jako „Total pressure“, což znamená energetická výška, která byla nastavena jako hodnota UpPres. Pro tuto podmínku bylo nutné také nastavit, kde se na této ploše bude vyskytovat voda a kde vzduch. Pro tyto údaje bylo využito předepsaných vzorců – UpVFWater pro vodu a UpVFAir pro vzduch. Okrajovou podmínkou na výtoku byl zvolen hydrostatický tlak, kde byl použit výraz DownPres. Zbývající část podmínky byla nastavena obdobně jako předchozí podmínka, ale byla nastavena s hodnotami DownVFWater a DownVFAir.

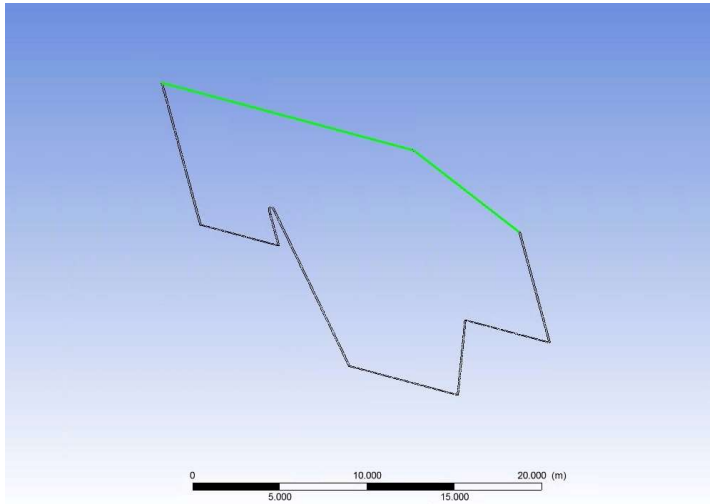
Pro stěny byla použita okrajová podmínka „No Slip Wall“ a drsnost jako „Smooth Wall“, což představuje hladkou stěnu. Následně byla nastavena horní okrajová podmínka, kde byl zadán relativní tlak jako 0 Pa a následně bylo nastaveno, že se zde vyskytuje pouze vzduch a žádná voda. Hodnota pro „volume fraction“ vzduchu byla 1 a pro „volume fraction“ vody byla 0. Tato okrajová podmínka umožňuje průchod jakékoliv tekutiny. Poslední podmínka byla symetrie, která byla nastavena na celé ploše boků obou modelů. Jedná se o zvláštní typ stěnové podmínky. Na této okrajové podmínce jsou všechny gradienty rovny nule a není na ní možné definovat žádnou fyzikální veličinu. Tato podmínka se dá použít pouze pokud je jak geometrie, tak i proudění symetrické vzhledem k této rovině. Díky této podmínce je pak možné výsledky zrcadlit. Pokud se jedná o složitější a náročnější úlohu, může to ušetřit mnoho času. (6) (7)



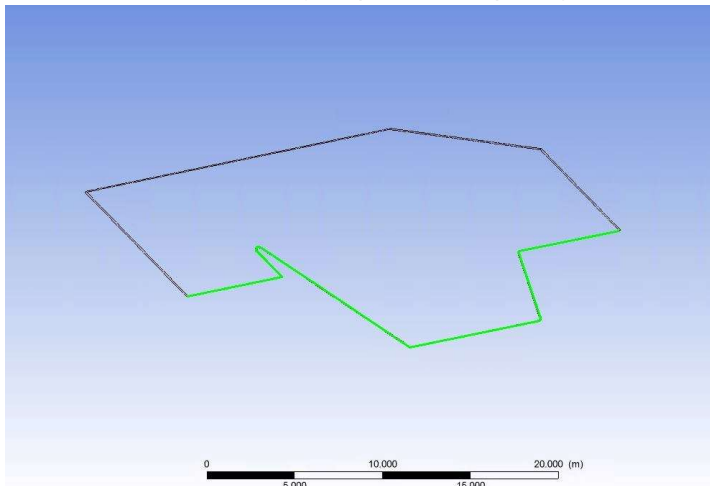
Obrázek 5 - Okrajová podmínka Inlet



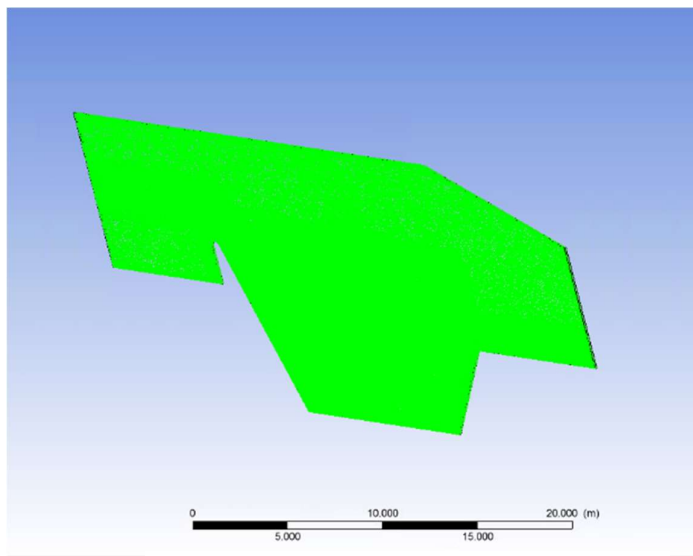
Obrázek 6 - Okrajová podmínka Outlet



Obrázek 9 - Okrajová podmínka Opening



Obrázek 7 - Okrajová podmínka Wall



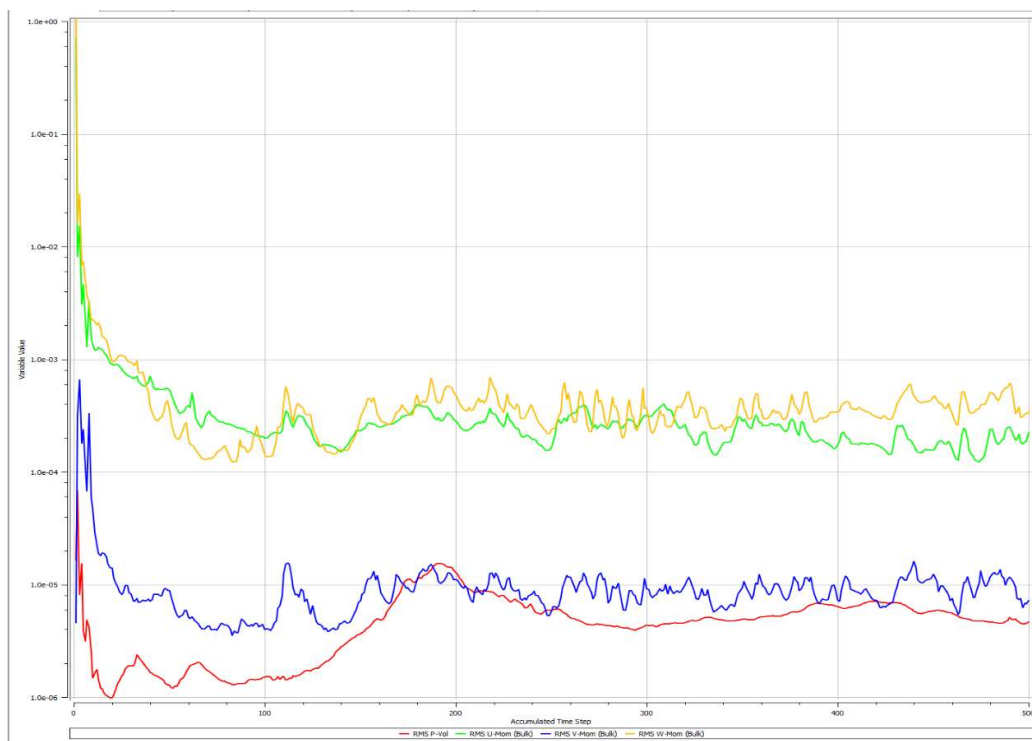
Obrázek 8 - Okrajová podmínka Symmetry

3.4 Řešení úlohy

Konvergenční kritérium bylo nastaveno RMS (Root Mean Square) a cílová konvergence reziduí na 1×10^{-4} .

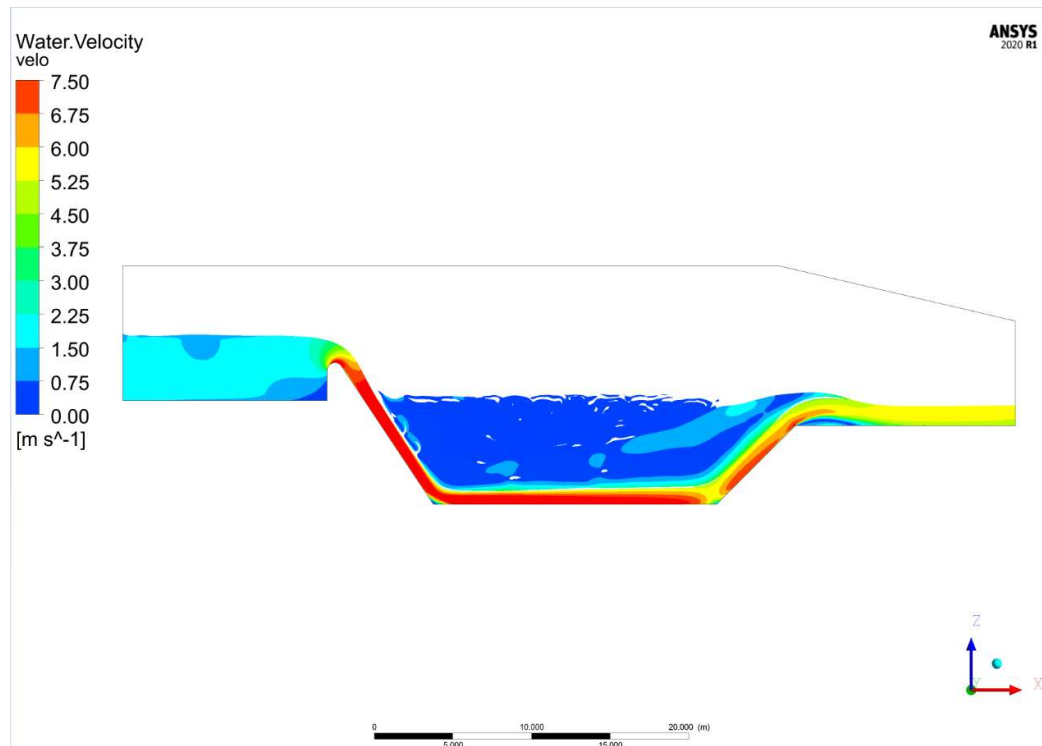
Po spuštění Solveru se na obrazovce objeví okno, kde lze vidět textové okno a grafické okno. V textovém okně pozorujeme textový výpis běhu programu. V grafickém okně pozorujeme grafický průběh reziduí v závislosti na počtu iterací. Je zde možné sledovat i předepsaný výraz Q_{top} , kde se v závislosti na počtu iterací zobrazuje hmotnostní průtok vody, který buď vtéká do modelu (kladná hodnota) nebo odtéká (záporná hodnota). Jestliže byla geometrie vymyšlena dobře, tak se po chvíli křivka zobrazující hmotnostní průtok vody ustálí na nule.

Při sledování grafického zobrazení reziduí pozorujeme, že hodnoty zprvu klesají, ale pak začínají kmitat, některé hodnoty již kolem $1 \cdot 10^{-3}$ až $1 \cdot 10^{-5}$. Toto je zobrazené na obrázku níže (Obrázek 10)



Obrázek 10 - Průběh reziduí v závislosti na počtu provedených iterací

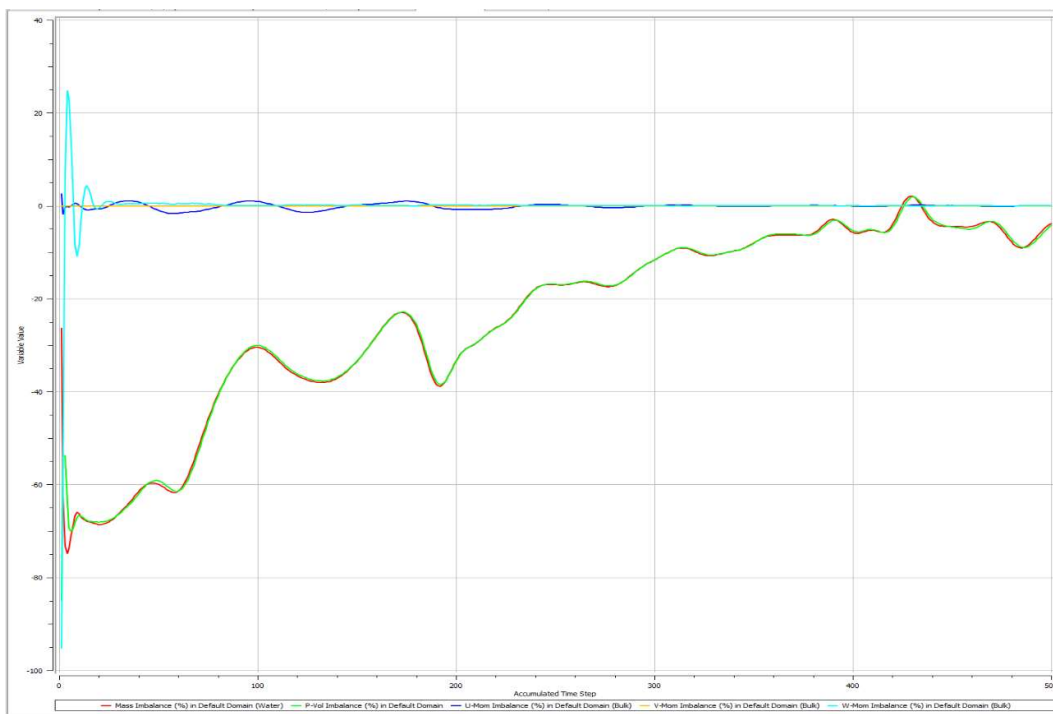
Na dalším obrázku (Obrázek 12) je zobrazena rychlost na rovině, která je nastavena jako podélný řez, který je oříznut tak, aby se zobrazovala jen rovina, kde se nachází voda. Je patrné, že výpočet byl proveden nebo nastaven špatně. Na obrázku lze vidět náhle zvýšení hladiny na konci vývaru a následné pozvolné snižování hladiny společně s velmi vysokými rychlostmi. To značí, že proudění je stále bystřinné, což může zapříčinit jednak špatně volená geometrie společně s okrajovými podmínkami nebo nedokončený výpočet.



Obrázek 11 - Rychlosti zobrazené na podélném řezu

Proto je daleko lepší volba sledovat grafické zobrazení imbalancí, při čemž lze uvažovat, že úloha bude v pořádku, když hodnoty konvergují k nule.

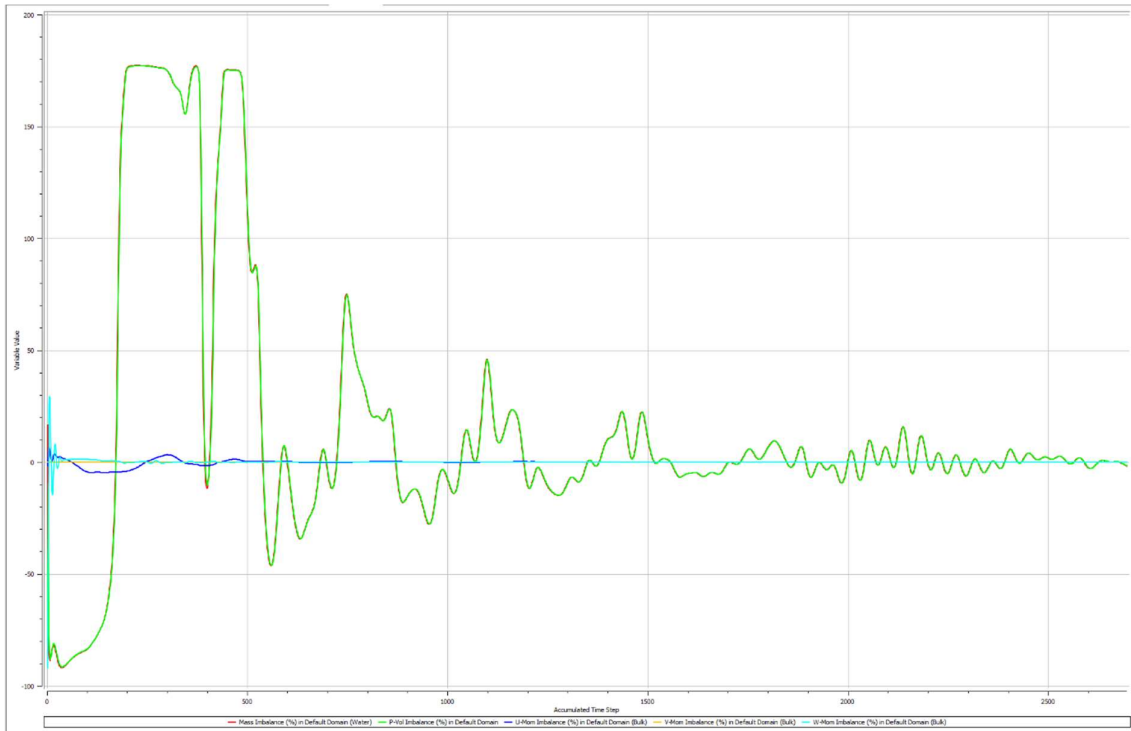
Na obrázku níže (Obrázek 12) zobrazuje průběh imbalancí, kde je vidět 5 křivek. Zelená zobrazuje tlakové imbalance, červená imbalance hmotnostního průtoku a zbylé tři zobrazují rychlostní imbalance. Rychlost je uvažována ve třech směrech podle os.



Obrázek 12 - Průběh imbalancí v závislosti na provedených iteracích

Z obrázku je patrné, že pro výpočet nebyl proveden dostatečný počet iterací. Bylo by daleko lepší ve výpočtu pokračovat, abychom dosáhli ustálení hodnot kolem nuly. I když se konečná hodnota pro hmotnostní průtok a tlak pohybuje kolem 3%, je patrné že před tím nedošlo k ustálení kolem nulové hodnoty, proto se nedá předpokládat, že výsledek je zcela správný.

Pro ukázkou správného provedení výpočtu byla vybrána varianta z následujících výpočtů, kde je dobře vidět, jak průběh postupně konverguje k nule. Díky tomu se dá předpokládat daleko větší přesnost výpočtu. Nevýhodou však je, že počet iterací přesáhl hodnotu 2 500, což znamená celkové časové prodloužení výpočtu. Obrázek se nachází na další stránce (Obrázek 13)



Obrázek 13 - Průběh imbalancí pro výpočet varianty A.1.1

4. Ejekční účinek

Zvyšující se hladina spodní vody při výtoku z vodní elektrárny při vyšších průtokových stavech zapříčiňuje snížení spádu, což má za následek snížení výkonu vodních elektráren. Při snížení pod jednu třetinu spádu to může mít až za následek nulový výkon u malých vodních elektráren. Tomu se dá zabránit snížením úrovně dolní vody právě díky ejekci.

Nápad využití ejekčního účinku není novinka. První experimenty byly uskutečněny už v roce 1905. Přesto ale tohoto jevu nebylo příliš využíváno, protože se s tím pojí složitý návrh a většinou zanedbatelný efekt na výkon vodní elektrárny. (8)

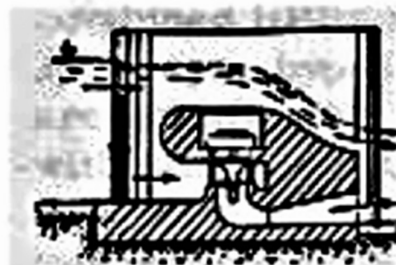
Ejekce je jev, kdy se ovlivňují vzájemně dva proudy tekutiny, z nichž jeden proud ovlivňuje druhý proud.

Ve spojitosti s vodními elektrárnami se pojem ejekční účinek chápe jako snížení tlaku v savce, což zapříčiní „nasátí“ výtoku z turbíny. Snížení tlaku je rozdíl mezi piezometrickou výškou na výtoku ze savky bez ejekčního účinku a s ejekčním účinkem.

Ejekčního účinku lze tedy dosáhnout například puštěním těchto větších průtoků přes jez nad vyústěním savky. Tento přepadající paprsek má vysokou rychlost, kterou může ovlivnit výtok ze savky, tak že přenese část své kinetické energie na pomalejší průtok z turbíny, což vede k přenosu hybnosti a snížení tlaku a zároveň úrovně hladiny za elektrárnou. (8)

Je známo několik prostorových uspořádání pro využití ejekce. Tedy způsobů kudy vést paprsek nadbytečného průtoku. Rozlišujeme dva základní typy. Jeden je ejekce na výtoku ze savky. Tedy k ejekci dochází až za savkou. Druhým způsobem je využití nadbytečného průtoku zaústěním do kolena savky.

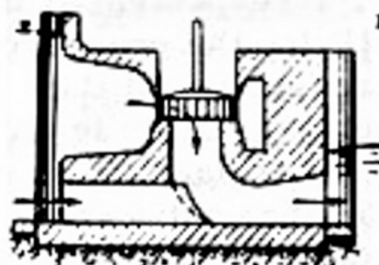
První typ může být uspořádaný tak, že paprsek vody přepadá nad savkou (Obrázek 14) nebo po jejím boku (Obrázek



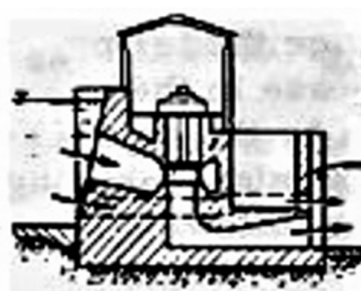
Obrázek 14 - Schéma ejekce pomocí přepadajícího paprsku (9)



Obrázek 15 - Schéma ejekčního účinku pomocí paprsku vody vedeného bokem (9)



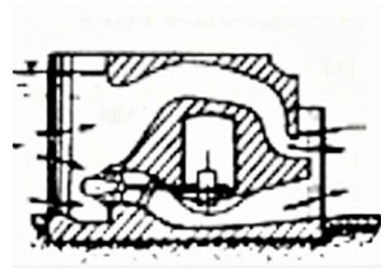
Obrázek 16 - Schéma – zaústění do kolena savky (9)



Obrázek 17 - Schéma ejekčního účinku (potrubí pod úrovní nátoky na turbínu) (9)

15). Druhý typ, aby ejekce vznikala přímo v savce, může být uspořádán tak, že průtok vody je zaústěn přímo do ramene savky (Obrázek 16).

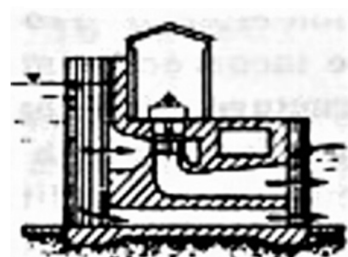
Mezi další typy uspořádání patří ten, kdy je voda vedena potrubím, a to buď pod úrovní nátoky na turbínu (pod úrovní vstupní spirální skříně, Obrázek 17), nad touto úrovní pomocí násosky (Obrázek 18) anebo pod úrovní savky (Obrázek 19). V neposlední řadě je spousta variací a kombinací těchto uspořádání (Obrázek 20). (9)



Obrázek 18 - Schéma ejekčního účinku pomocí násosky (9)

V této práci bude kladen důraz na ejekci pomocí přepadajícího paprsku nad savkou, protože právě to bylo předmětem dalších simulací a výpočtů.

V tomto případě se piezometrický efekt ejekce počítá jako rozdíl mezi úrovní hladiny v korytě v určité vzdálenosti a úrovní hladiny na výstupu ze savky. Tato hladina je součet hloubky paprsku a hloubky pod paprskem.



Obrázek 19 - Schéma ejekčního účinku (potrubí pod úrovní savky) (9)

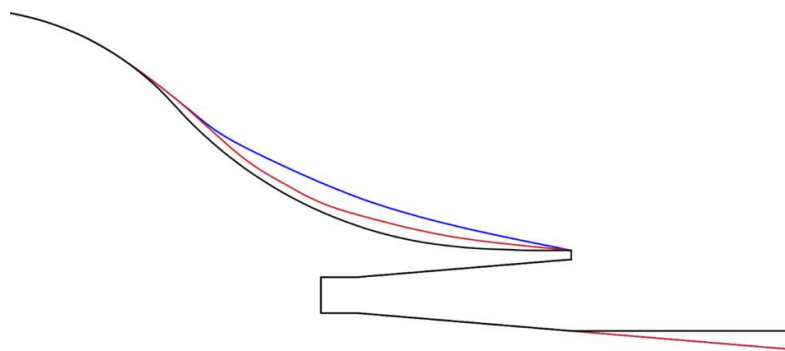


Obrázek 20 - Schéma ejekčního účinku – kombinace (9)

4.1 Stanovení parametrů ovlivňující ejekci

Jako posuzované parametry, které ovlivňují ejekční účinek, byly zvoleny tvar přelivné plochy a poměry průtoků. Tvarem přelivné plochy je myšleno, v jakém sklonu je zakončena. Poměr průtoků znamená kolikanásobek teče přes jezové těleso oproti tomu, kolik teče savkou.

Typy zakončení byly vybrány tři a průtokové stavy byly vybrány čtyři. Pro každý průtokový stav byly počítány dvě varianty. Pro první model byly spočítány všechny průtokové stavy v obou variantách. Pro zbylé modely byly spočítány také všechny průtokové stavy, ale pouze v jedné variantě. Celkem bylo provedeno šestnáct výpočtů.



Obrázek 21 - Zobrazení zakončení přelivné plochy všech modelů
(černě – model A, modře – model B; červeně – model C)

5. Modely doplněné o savku

V této kapitole bude popsána geometrie modelu, následné nastavení výpočtů, způsob vyhodnocení a shrnutí závěry výsledků.

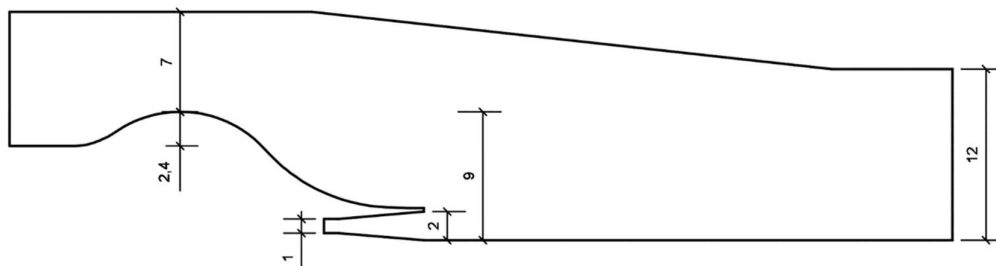
Z předchozího modelu byly zachovány výšky a rozměry, ale pro zjednodušení řešené úlohy byl uvažován nekonečně dlouhý vývar. Modely byly vytvořeny v programu AutoCAD.

Modely byly následně doplněny o savku. Začátek savky byl uvažován o výšce 1 metr a výstupní profil o výšce 2 metry. Nutnou podmínkou bylo, aby se výtoková rychlost ze savky pohybovala kolem 1 m/s.

Důležité je, že u všech modelů byla zachována poloha savky vzhledem k horní a dolní vodě.

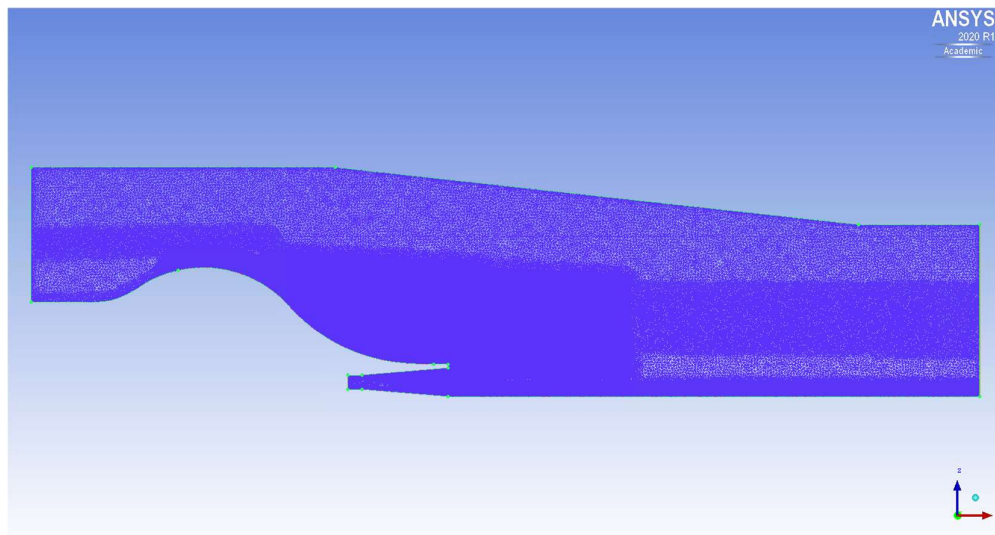
5.1 Model A

První model byl vytvořen na základě poskytnuté inspirace a na doporučení pana Ing. Součka. Pro tento model bylo důležité, že zakončení jezové plochy je vodorovné v délce 1 metr.



Obrázek 22 – Geometrie modelu A

Výpočetní síť byla vytvořena v programu ANSYS ICEM CFD. Snaha byla stejná jako u simulace vodního skoku, tzn. zhušťit síť v místě rozhraní vody a vzduchu a v místě předpokládaného vodního skoku. Celkový počet uzlů ve výpočetní síti byl 413 989. V programu ANSYS ICEM CFD byl celý model také rozdělen na části, které byly pojmenovány podle okrajových podmínek.

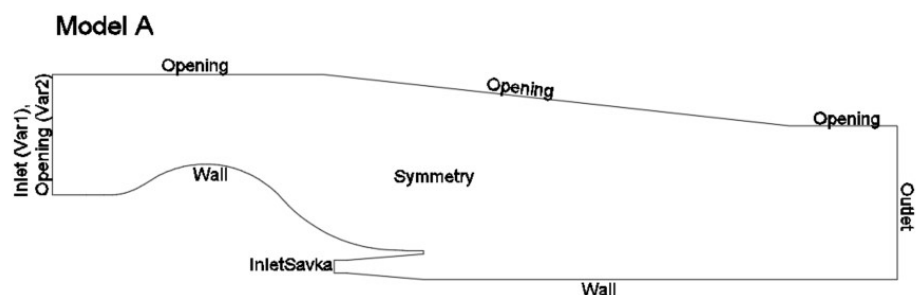


Obrázek 23 - Výpočetní síť modelu A

Výpočet byl prováděn pro čtyři různé průtokové stavy a vždy byl počítán ve dvou variantách pro každý model. Tyto dvě varianty se liší tím, že v první variantě teče voda přes jezové těleso i savkou, v druhé variantě voda teče pouze savkou. Rozdíl byl v nastavení některých okrajových podmínek. Stejně okrajové podmínky byly „Outlet“, kde byla nastavena

hodnota pro hydrostatický tlak jako DownPres, Opening, symetrie, okrajová podmínka stěn a podmínka na vtoku savky do modelu. Podmínka vtoku savky byla nastavena jako normálová rychlost s hodnotou 2 m/s. Okrajové podmínky vtoku byly různé. Pro první variantu, kdy do modelu voda vtéká přes plochu „Inlet“, byl nastaven výraz UpPres pro hodnotu energetické výšky. Pro druhou variantu, kdy do modelu přes plochu „Inlet“ nic neteče, byla nastavena okrajová podmínka vtoku jako „Opening“.

Jelikož byl výpočet prováděn pro čtyři různé průtokové stavy znamená to, že pro každý stav se bude lišit nastavení okrajových podmínek pro vtok a výtok. Tedy jiná různá nastavení výrazů UpH a DownH. Následující tabulka popisuje všech osm výpočtů. Jsou zde uvedeny hodnoty výrazů UpH a DownH. Tyto hodnoty byly získány z předešlého výpočtu simulace vodního skoku. V dalších dvou sloupcích je zobrazeno, jestli se jedná o variantu, kdy voda teče jak přes jezové těleso i savkou, anebo teče pouze savkou.



Obrázek 24 - Schématické zobrazení okrajových podmínek modelu A

Varianta	Okrajová podmínka		Průtok	
	UpH [m]	DownH [m]	Savkou	Přes jez
A.1.1	9,907	5,624	x	x
A.1.2	9,907	5,624	x	
A.2.1	10,467	6,021	x	x
A.2.2	10,467	6,021	x	
A.3.1	10,875	6,336	x	x
A.3.2	10,875	6,336	x	
A.4.1	11,182	6,592	x	x
A.4.2	11,182	6,592	x	

Tabulka 2 - Hodnoty okrajových podmínek UpH a DownH pro model A






Tyto dvě varianty se liší také v nastavení inicializace. Inicializace definuje počáteční podmínku. Pro první variantu, kde voda teče i přes jezové těleso, byla nastavena počáteční podmínka – vtok přes jezové těleso. V druhé variantě by to ztrácelo smysl, proto byla jako počáteční podmínka nastavena okrajová podmínka odtoku.

Pro každý výpočet bylo nejdříve nastaveno 1000 iterací. Důležité bylo sledování průběhu imbalancí v závislosti na počtu provedených iterací. Snaha byla, aby se výpočet ustálil kolem nuly. Když se tak stalo, bylo vhodné výpočet zastavit. Na toto bohužel 1000 nastavených iterací nestačilo. Výpočty tedy byly počítány minimálně na 1500 iterací. Některé dokonce dosahovaly až přes 2000 iterací. Pokud byl výpočet spouštěn samostatně, byl počítán na 10–12 výpočetních jader. Při výpočtu je vhodné uvažovat jedno jádro na 30–50 tisíc výpočetních uzlů. I přesto trvalo časově dlouho, než se výpočet ustálil kolem nulové hodnoty imbalancí.

5.1.1 Způsob vyhodnocení

První provedenou kontrolou před představováním výsledků byla kontrola průtoků. Kontrola byla prováděna tak, že byla vzata suma všech vtoků do modelu a od té byly odečteny odtoky z modelu. Tato hodnota byla následně převedena na procenta tak, že tento rozdíl v absolutní hodnotě byl vydělen celkovým odtokem z modelu. Tento výpočet je součástí přílohy - Příloha A - Kontroly průtoků a výpočet poměrů průtoků pro všechny modely a varianty.

Hodnoty byly získány díky předepsaným výrazům v CFX-postu (Obrázek 25). Vtoku do modelu odpovídaly hodnoty výrazů „PrutokInlet“ a „PrutokInletSavka“. Odtok byl nazván „PrutokOutlet“.

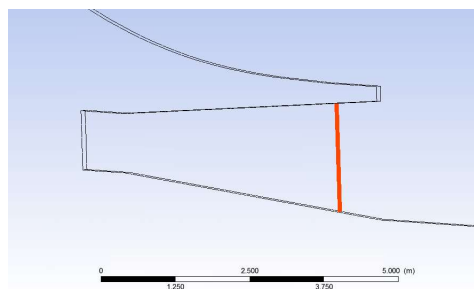
 PrutokInlet	<code>Water.massFlow()@Inlet</code>
 PrutokInletSavka	<code>Water.massFlow()@InletSavka</code>
 PrutokOutlet	<code>Water.massFlow()@Outlet</code>
 PrutokSavka	<code>Water.massFlow()@Savka</code>
 TlakSavka	<code>areaAve(Pressure)@Savka</code>

Výraz obsahuje funkci `Water.massFlow` a za znakem `@` je název plochy. Dohromady dostaneme informaci o průtoku vody přes tuto plochu za sekundu. V programu se průtok uvádí jako hmotnostní.

Obrázek 25 - Výrazy z CFX – Post

Když byly získány hodnoty průtoků, bylo možné zjistit poměry mezi průtokem přes jezové těleso a průtokem savkou. Tyto hodnoty hrály roli v celkovém vyhodnocení. Byly získány tak, že byla použita hodnota „PrutokInlet“, která byla vydělena hodnotou „PrutokInletSavka“ vždy pro každý průtokový stav. Hodnota průtoku savkou byla pro všechny modely stejná. Tabulky, kde je zobrazeno, jak tyto hodnoty byly získány, jsou součástí přílohy - Příloha A - Kontroly průtoků a výpočet poměrů průtoků pro všechny modely a varianty.

Následně byl vytvořen řez savkou. Řez se nachází u všech modelů stejně vždy jeden metr před koncem savky. Rovina řezu byla nazvaná Savka. Na tomto řezu budeme zjišťovat tlak. Tlak zjistíme opět pomocí předepsaného výrazu. Výraz byl nazván „TlakSavka“ a jeho předpis je `areaAve(Pressure)@Savka`. Funkce `areaAve` nám pomůže získat průměrnou hodnotu veličiny, která je napsána v závorce na ploše, která je opět napsána za znakem `@`. Tímto výrazem tedy získáme průměrný tlak na rovině nazvané Savka. Získaná hodnota je v pascálech. Získaná hodnota tlaku byla převedena na hloubku vody pro daný stav a variantu. Hodnoty tlaků získané z programu ANSYS CFX jsou součástí přílohy - Příloha B - Získané hodnoty tlaků a vypočtené hloubky pro všechny varianty.



Obrázek 26 - Zobrazení řezu savkou

Ejekční účinek byl posuzován jako rozdíl hladin při ejakci a bez ejakce. Jde o rozdíl hladin, kdy voda teče přes jezové těleso a savkou anebo jen savkou. Pro každý průtokový stav byly spočítány tyto dvě varianty pro model A. Pro zbylé dva modely byla druhá varianta vždy uvažována z hodnot modelu A. Vyhodnocení bylo provedeno jako rozdíl těchto dvou hloubek. Rozdíl byl kladný, pokud hloubka pro variantu, kdy teče voda i přes jezové těleso byla nižší než pro variantu, kdy voda teče pouze savkou. Kladný výsledek znamená, že se podařilo získat větší spád, tedy bylo dosaženo ejekčního účinku pomocí paprsku vody přepadajícího nad savkou.

Výsledky byly vyhodnoceny nejdříve pro každý model zvlášť. Výsledkem je nejvíce optimální podíl průtoků pro zisk spádu pomocí ejekčního účinku. Poté bylo provedeno porovnání všech modelů. Výsledkem je tvar zakončení přelivné plochy, který je z těchto tří nejvíce efektivní pro zisk spádu pomocí ejekčního účinku.

Z každého modelu byl vytvořen i grafický výstup. Tyto výstupy jsou součástí samostatných příloh (Příloha C až Příloha R). Grafický výstup bude obsahovat zobrazení „volume fraction“ na podélném řezu modelu. Toto bude ukazovat, kde se na modelu nachází voda a kde vzduch. Barva pro hodnotu 1 bude ukazovat, kde se nachází voda, barva pro hodnotu 0 bude zobrazovat vzduch. Následně bude zobrazen tlak na stejném řezu, který bude ohraničen podmínkou tak, aby se zobrazoval jenom v místech, kde je voda. Nejvyšší hodnota tlaku má červenou barvu, nejnižší modrou. Mezi dvěma variantami pro stejný průtokový stav bychom měli pozorovat rozdíl v úrovni savky v tomto zobrazení tlaku, pokud se nám povedlo dosáhnout ejekčního účinku. Poslední grafické zobrazení bude odpovídat rychlostem, kde spolu s rychlostmi budou zobrazeny proudnice.

5.1.2 Výsledky modelu A

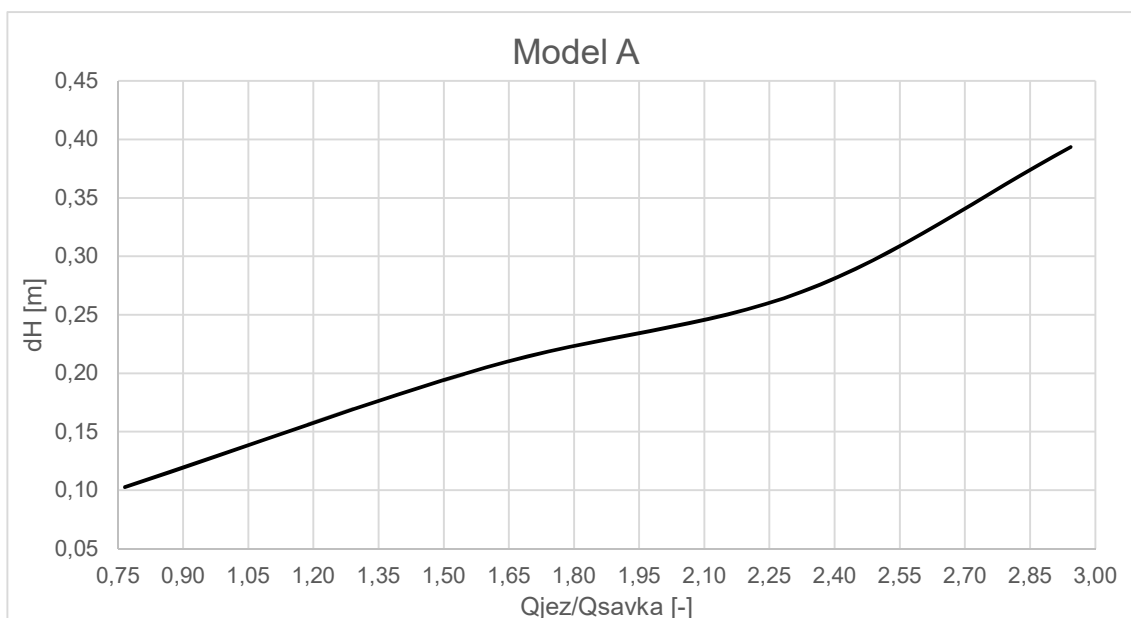
V této kapitole budou uvedeny výsledky pro model A, které budou prováděny stejně jako v předchozí kapitole. Všechny podrobné výpočty zapsané formou tabulek jsou obsaženy v přílohách stejně jako grafické výstupy z programu.

V tabulce se budou nacházet informace o hloubce vody pro všechny varianty a dále rozdíl hloubek pro každý průtokový stav a podíl průtoků přes jez a savkou. V tabulce bude nazván „ $Q_{\text{jez}}/Q_{\text{savka}}$ “.

V grafech je zobrazena závislost získaného rozdílu hloubky na poměru průtoků.

Model a průtokový stav	Varianta 1	Varianta 2	dH	Q _{jez} /Q _{savka}
	H _{savka}	H _{savka}		
	[m]	[m]	[m]	[-]
A.1	4,503	4,606	0,103	0,766
A.2	4,770	4,975	0,205	1,597
A.3	5,018	5,288	0,270	2,325
A.4	5,145	5,538	0,393	2,943

Tabulka 3 - Vyhodnocení ejekčního účinku pro model A v závislosti na podílu průtoků



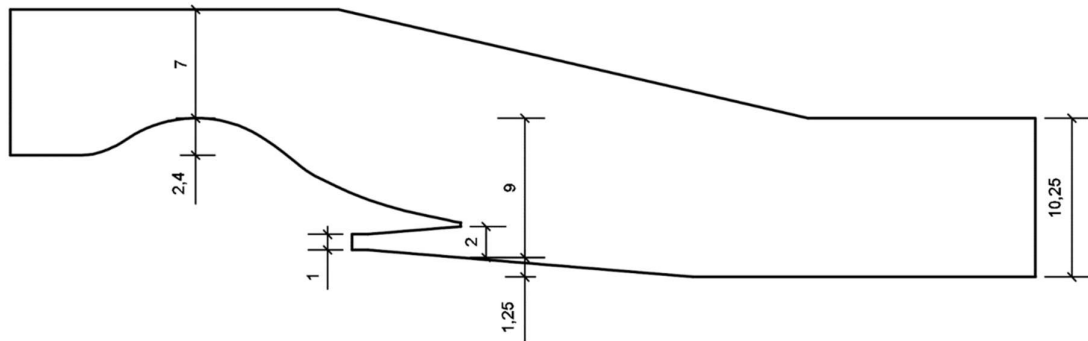
Graf 5 - Závislost rozdílu hladin na podílu průtoků pro model A

Z těchto výsledků je patrné, že čím větší průtok teče přes jez, tím více to ovlivňuje tlak na konci savky. Dalo by se předpokládat, že tento trend bude mít stále rostoucí tendenci, dokud nedojde k zatopení, tedy k většímu ovlivnění dolní vodou.

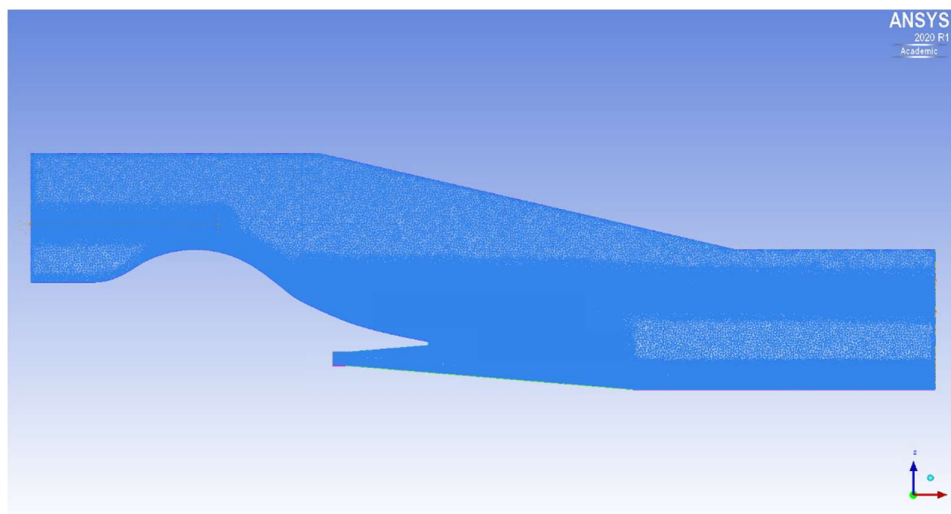
Pro lepší přehled o ovlivnění ejekčního účinku byl doplněn další model.

5.2 Model B

Tento model měl opět zachované všechny rozměry jako předchozí, ale lišil se zešikmením přelivné plochy na sklon 1 : 10 a zahloubením savky, tedy jejím prodloužením o 1,25 metru dolů.

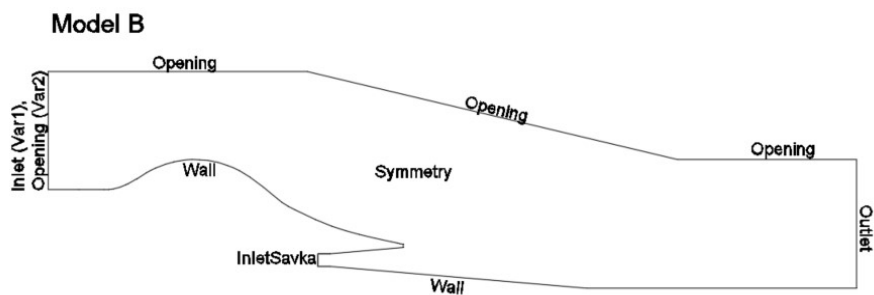


Obrázek 27 - Geometrie modelu B



Obrázek 28 - Výpočetní síť modelu B

Výpočetní síť byla opět nastavena v programu ANSYS ICEM CFD. Zde bylo zároveň provedeno rozdělení na části, které byly nazvány stejně jako okrajové podmínky. Celkový počet výpočetních uzlů byl 450 591.



Obrázek 29 – Schématické zobrazení okrajových podmínek modelu B

Dno modelu bylo nastaveno tak, aby leželo na nulové souřadnici Z. Poloha savky vzhledem k horní a dolní vodě byla stejná jako u předchozího modelu. Proto bylo nutné okrajové podmínky UpH a DownH zvýšit o 1,25 metrů.

Varianta	Okrajová podmínka		Průtok	
	UpH [m]	DownH [m]	Savkou	Přes jez
B.1.1	11,157	6,874	x	x
B.2.1	11,717	7,271	x	x
B.3.1	12,125	7,586	x	x
B.4.1	12,432	7,842	x	x

Tabulka 4 – Hodnoty okrajových podmínek UpH a DownH pro model B

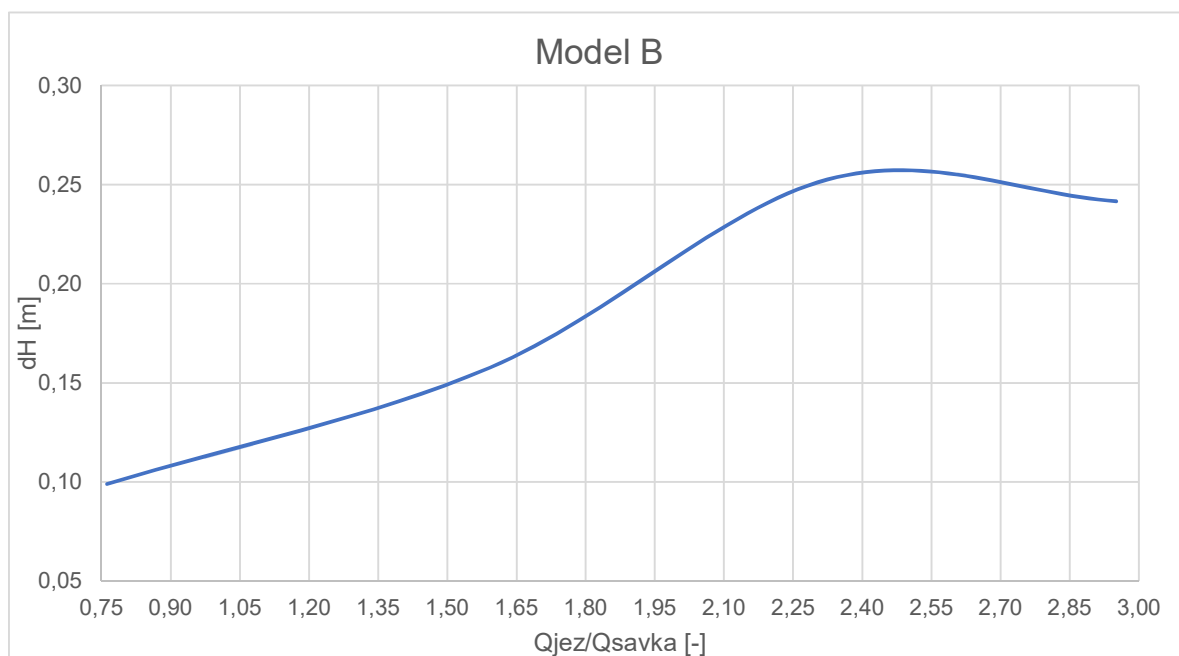
Díky stejnému umístění savky vzhledem k polohám horní, a hlavně dolní vody nemusely být provedeny výpočty pro druhé varianty, protože hydrostatický tlak by byl totožný.

5.2.1 Výsledky modelu B

Výsledky byly shrnuty opět do stejné tabulky a grafu. Podrobnější výsledky jsou součástí samostatných příloh. Varianta 2 v této tabulce je totožná s tabulkou modelu A, jelikož hodnoty druhé varianty by byly stejné jak pro model A tak pro model B.

Model a průtokový stav	Varianta 1	Varianta 2	dH	$Q_{\text{jez}}/Q_{\text{savka}}$
	H_{savka}	H_{savka}		
	[m]	[m]	[m]	[-]
B.1	4,507	4,606	0,099	0,762
B.2	4,817	4,975	0,158	1,592
B.3	5,035	5,288	0,253	2,324
B.4	5,296	5,538	0,242	2,951

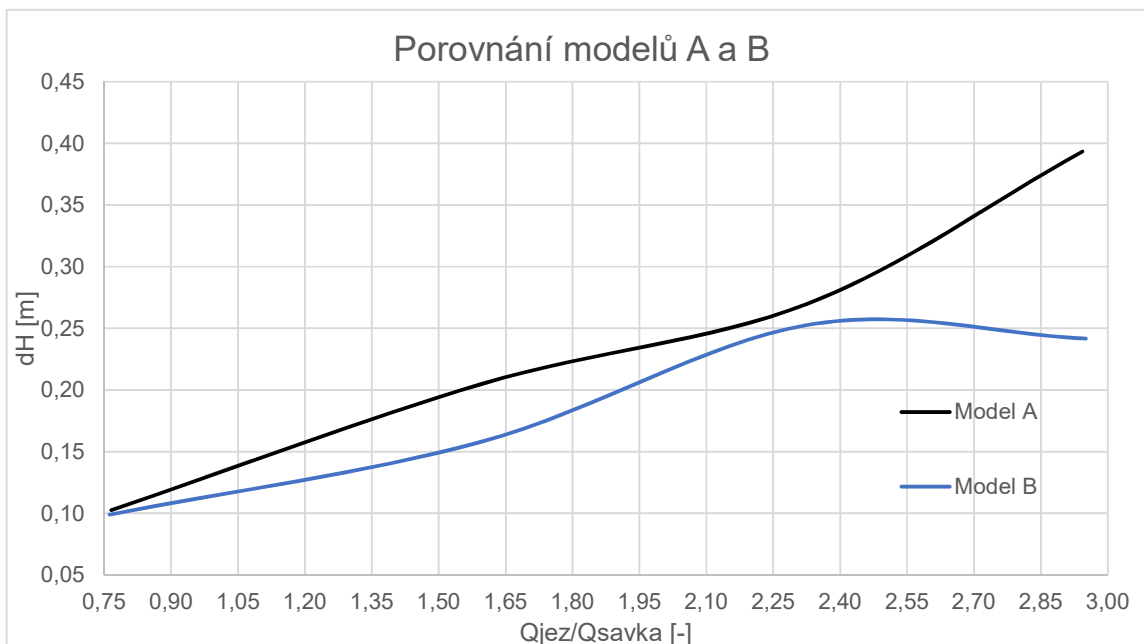
Tabulka 5 - Vyhodnocení ejekčního účinku pro model B v závislosti na podílu průtoků



Graf 6 - Závislost rozdílu hladin na podílu průtoků pro model B

Zde pozorujeme, že rozdíl hladin roste a následně po překročení bodu, který odpovídá hodnotě cca 2,4 začne klesat. Informaci o efektivnější ploše z dosavadních posuzovaných modelů získáme z grafu, kde jsou zobrazeny hodnoty pro model A i pro model B.

5.3 Porovnání modelů A a B



Graf 7 - Závislost rozdílu hladin na podílu průtoků porovnání modelu A a B

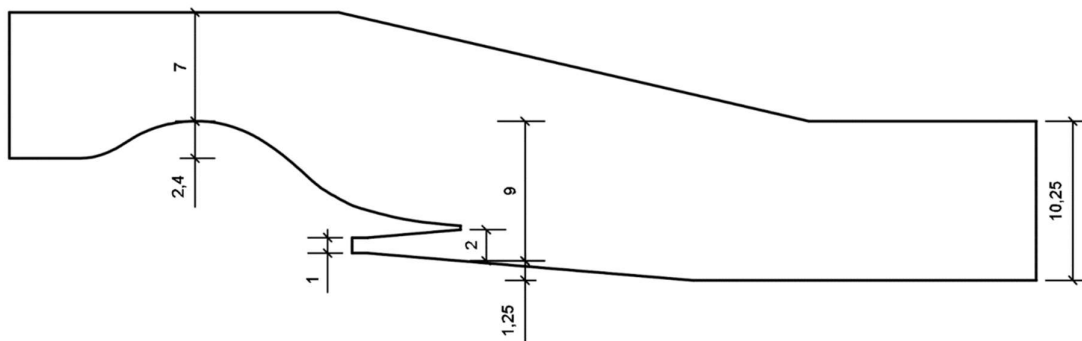
Z tohoto grafu vyplývá, že v prvním bodě se hodnoty tolik neliší, ale čím více stoupá průtok přes jezové těleso, tím více se stává efektivnější zakončení modelu A.

Proto můžeme předpokládat, že další zvýšení sklonu nebude efektivní.

Lepší představu o tvaru zakončení jezové plochy by mohl dodat další model, kde se zakončení bude nacházet mezi hodnotami sklonů mezi hodnotami sklonů modelů A a B.

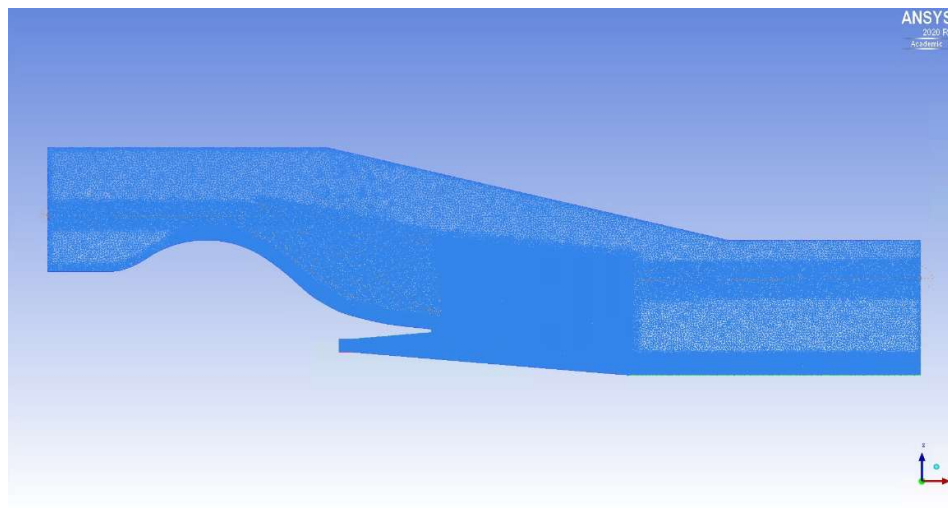
5.4 Model C

U modelu C bylo ponecháno prodloužení savky do hloubky o 1,25 metrů. Sklon byl volen tak, aby se nacházel mezi hodnotami vodorovného sklonu a sklonu 1 : 5. Sklon zakončení byl zvolen 1 : 10.



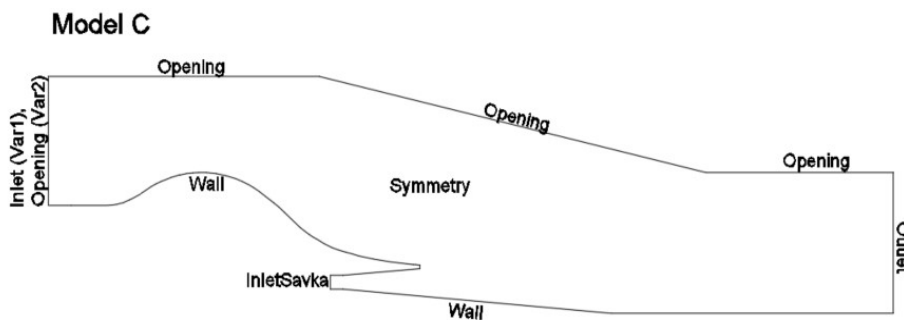
Obrázek 30 - Geometrie modelu C

Výpočetní síť modelu C byla vytvořena v programu ANSYS ICEM CFD. Celkový počet výpočetních uzlů byl 345 926. Tato síť má méně uzlů hlavně proto, že prostor, kde je předpokládán vznik vodního skoku, byl rozdělen na dvě různě husté sítě pomocí funkce „density“.



Obrázek 32 - Výpočetní síť modelu C

Model zde byl rozdělen opět na části pojmenované podle okrajových podmínek a okrajové podmínky jsou shodné s modelem B, protože oba tyto modely jsou prohloubené o 1,25 metrů.



Obrázek 31 - Schématické zobrazení okrajových podmínek modelu C

Varianta	Okrajová podmínka		Průtok	
	UpH [m]	DownH [m]	Sacím p.	Přes jez
C.11	11,157	6,874	x	x
C.2.1	11,717	7,271	x	x
C.3.1	12,125	7,586	x	x
C.4.1	12,432	7,842	x	x

Tabulka 6 - Hodnoty okrajových podmínek UpH a DownH pro model C

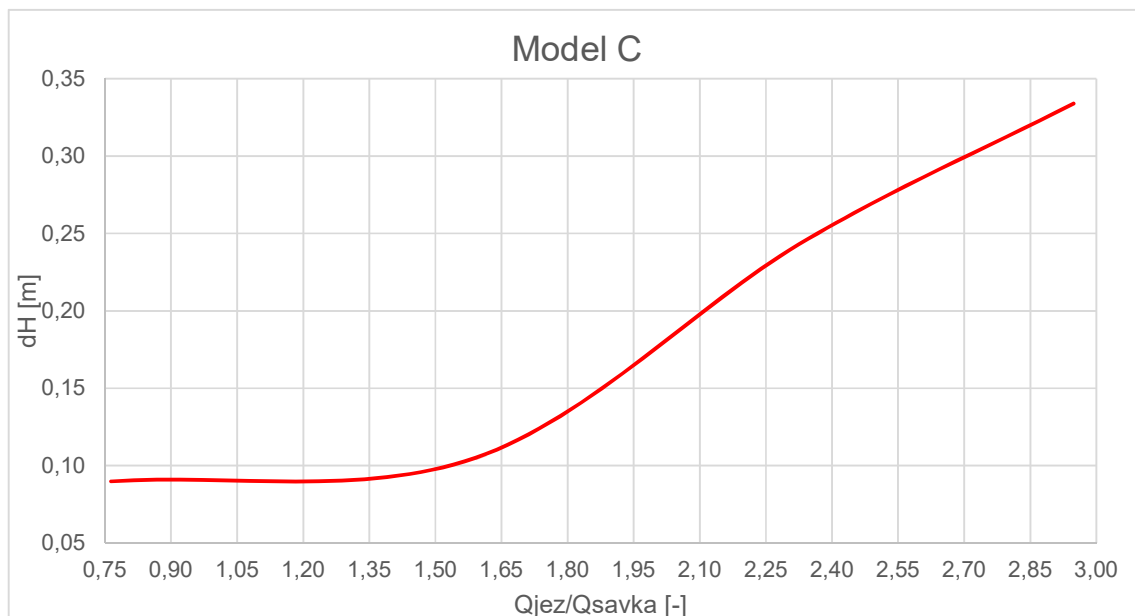
Výsledky první varianty byly porovnávány s výsledky druhé varianty pro model A, jelikož v předchozích kapitolách bylo dokázáno, že hydrostatický tlak zůstane stejný, protože hloubka savky se vzhledem k hladině nemění.

5.4.1 Výsledky modelu C

Grafické výsledky a podrobnější výpočty jsou opět součástí samostatných příloh. Zde platí totéž jako v předešlém modelu.

Model a průtokový stav	Varianta 1	Varianta 2	dH	Q _{jez} /Q _{savka}
	H _{savka}	H _{savka}		
	[m]	[m]	[m]	[-]
C.1	4,516	4,606	0,090	0,764
C.2	4,870	4,975	0,105	1,591
C.3	5,045	5,288	0,243	2,325
C.4	5,204	5,538	0,334	2,948

Tabulka 7 - Vyhodnocení ejekčního účinku pro model C v závislosti na podílu průtoků



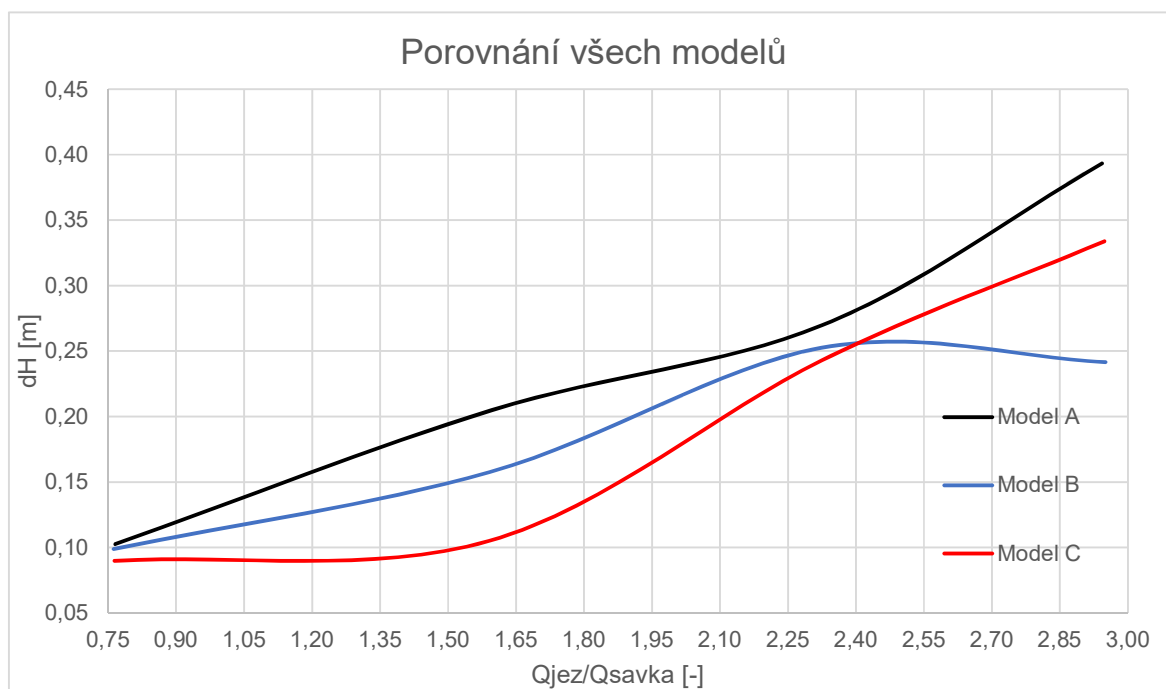
Graf 8 - Závislost rozdílu hladin na podílu průtoků pro model C

Tento graf má opět rostoucí tendenci. Nemá ale tendenci růst stejně. Pozorujeme, že do hodnoty poměru průtoků 1,6 roste opravdu pomalu, následně za touto hodnotou roste daleko rychleji.

Aby bylo možné vyhodnotit nejvíce efektivní zakončení přelivné plochy z těchto tří modelů, bylo nutné vytvořit graf, kde budou zobrazeny hodnoty pro všechny tři modely zároveň.

5.5 Porovnání zakončení přelivné plochy

Byly vytvořeny tři modely s odlišným sklonem zakončení přelivné plochy. Pro model A byl volen sklon vodorovný, pro model B byl sklon volen ve sklonu 1:5 a pro model C byl model volen ve sklonu 1:10.



Graf 9 - Závislost rozdílu hladin na podílu průtoků pro všechny modely

Na tomto grafu jsou zobrazeny hodnoty získané z rozdílu hloubek vody v závislosti na poměry průtoků. Barevné označení je totožné s obrázkem v úvodu této kapitoly. Černě je model A, modře je model B, červeně je model C.

Z tohoto grafu vyplývá, že z těchto tří variant je nejlepší model A s vodorovným zakončením přelivné plochy. Zhruba do hodnoty 2,4 na ose, která zobrazuje poměry průtoků, je efektivnější zakončení modelu B než modelu C. Po překonání této hodnoty se stává efektivnějším zakončení modelu C.

Na začátku pozorujeme, že se hodnoty křivek modelů příliš neliší. U všech modelů se jedná o zisk z rozdílů hloubek kolem 10 cm. Následně pozorujeme mírné oddálení hodnot křivek a pak opět u hodnoty odpovídající třetímu průtokovému stavu pozorujeme přiblížení hodnot. Dále pozorujeme, že křivky modelů A a B mají podobnou rostoucí tendenci, naopak křivka popisující model B začíná pomalu klesat.

Nejvyšší rozdíl hladin dosahuje model A. Jedná se o rozdíl necelých 40 cm a je ho dosaženo při čtvrtém průtokovém stavu.

6. Závěr

V této bakalářské práci byl nejprve popsán návrh jezu a podjezí včetně popsání výpočtu. Na základě tohoto výpočtu byla vytvořena geometrie. Dále byla stručně popsána práce v programu ANSYS ICEM CFD. Poté byla představena práce v programu ANSYS CFX, kde bylo vysvětleno nastavování fyzikálních parametrů modelů a okrajových podmínek. Následně byly odprezentovány výsledky a z kritického pohledu byly určeny chyby ve výpočtu.

V práci byl představen jev ejekce a využití ejekčního účinku z pohledu využití vodní energie. Jako posuzované vlivy na ejekční účinek byly vybrány hodnoty průtoků přes jezové těleso vzhledem k průtoku savkou a tvar geometrie. Poměry průtoků byly zvoleny čtyři. První se pohyboval kolem 0,75, druhý kolem 1,6, třetí kolem 2,3 a poslední čtvrtá hodnota byla necelé 3. Tvarem geometrie je myšlen sklon zakončení jezové plochy. Tato zakončení byla volena ve třech variantách. Model A měl zakončení vodorovné, model B ve sklonu 1 : 5 a poslední model C ve sklonu 1 : 10. Pro každý průtokový stav musely být provedeny dvě varianty výpočtů, které se lišily v nastavení okrajových podmínek. Tyto dvě varianty byly spočteny pouze u modelu A. Pro zbylé modely byla počítána pouze jedna varianta. Celkem bylo provedeno šestnáct výpočtů.

Podstatné je, že ve všech výpočtech bylo dosaženo efektu ejekčního účinku. Z této práce vychází jako nejlepší zakončení modelu A – vodorovné, kde bylo pozorováno, že čím více stoupá průtok přes jezové těleso, tím více roste získaný rozdíl hloubek. Toto tvrzení platí i pro model C. U modelu B je naopak nejvyššího získaného rozdílu hloubek dosaženo přibližně tehdy, když přes jezové těleso teče 2,5 násobek průtoku vody oproti průtoku vody savkou. Dále bylo pozorováno, že do hodnoty poměrů průtoků 2,4 bylo zakončení modelu B efektivnější, naopak po této hodnotě bylo efektivnější zakončení modelu C. Nejvyšší rozdíl hladin vyšel necelých 40 cm a stalo se tak u modelu A, když přes jezové těleso tekla průtok odpovídající necelému trojnásobku průtoku savkou.

Získání těchto výsledků bylo velice náročné, jelikož se jedná o neustálý jev. Výpočty musely být prováděny na mnoho iterací. Mnohdy to znamenalo neustálé spouštění pokračování výpočtu, což se projevilo na velké celkové časové náročnosti.

6.1 Náměty pro další postup

Z rozdílů celkového počtu elementů u modelu C, vzhledem k ostatním a vzhledem k získaným výsledkům, se dá předpokládat, že je možné snížit počet těchto elementů, a tím pádem snížit celkovou náročnost na časové trvání výpočtu.

Bylo by vhodné posoudit, jaký vliv má protažení savky u modelu B a C. Což znamená, že ke každému z těchto modelů bychom vytvořili ještě jeden, který by byl bez tohoto protažení. A pro model A bychom vytvořili variantu s tímto protažením.

Hodnoty poměru průtoku v této práci byly zvoleny jen do hodnoty 2,9. Bylo by přínosné prozkoumat efekt ejekčního účinku i pro vyšší hodnoty z toho důvodu, že byl v této práci vysloven předpoklad, že ke snížení efektu ejekčního účinku dojde, když nastane ovlivnění přepadu dolní vodou (k zatopenému přepadu).

Bylo by také přínosné na tyto výpočty navázat a prozkoumat více sklonů zakončení přelivné plochy.

7. Použitá literatura a prameny

1. **GABRIEL, P., GRANDTNER, T., PRŮCHA, M., VÝBORA, P.** *Jezy*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989.
2. **KOLÁŘ, V., PATOČKA, C., BÉM, J.** *Hydraulika*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983.
3. **JANDORA, Jan.** Researchgate. [Online] [Citace: 8. Květen 2020.] https://www.researchgate.net/publication/39927915_Hydraulika_a_hydrologie.
4. **JAHODA, M.** Počítačová dynamika tekutin užitečný nástroj pro inženýry. [Online] [Citace: 5. Květen 2020.] http://uchi-old.vscht.cz/uploads/pedagogika/bezpecnostni_inzenyrstvi/CFD.shrnuti.pdf.
5. **Vodička, V.** Bakalářská práce - Přehled a vývoj CFD metod. [Online] 2011. [Citace: 10. Květen 2020.] <https://core.ac.uk/download/pdf/30291808.pdf>.
6. **ANSYS, Inc.** ANSYS CFX-Solver Modeling Guide. [Online] Listopad 2011. [Citace: 16. Květen 2020.] http://read.pudn.com/downloads500/ebook/2077964/cfx_mod.pdf.
7. **Blejchař, T.** TURBULENCE MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ - CFX. *Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava*. [Online] 2012. [Citace: 20. Květen 2020.] <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FS/Tur/Turbulence.pdf>.
8. **SLISKII, S. M.** *Ejection into tailraces of hydropower plants*. Moskva : GEI - Gosudarstvennoe Energeticheskoe Izdatel'stvo, 1953.
9. **DETTMER, P. H. C., OVELAR, C. O. S., NORILLER, M. L., JUNJI OTA, J. L., CHAVES, C. F.** *COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL MODELING OF EJECTION EFFECT IN*. [Online] 6. Zář 2019. [Citace: 12. Květen 2020.] <https://static.iahr.org/34/665.pdf>.
10. **Havlík, A., Pícek, T.** Přednášky z předmětu hydraulika 2. *Katedra hydrauliky a hydrologie*. [Online] [Citace: 10. Březen 2020.] http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/prednasky/HY2V_06_Prepady.pdf.
11. **ANSYS, Inc.** ANSYS CFX-Solver Manager User's Guide. [Online] Listopad 2011. [Citace: 16. Květen 2020.] http://read.pudn.com/downloads500/ebook/2077964/cfx_solv.pdf.

8. Seznam obrázků

Obrázek 1 - Jezové přelivy s kruhově nebo elipticky zaoblenou korunou (10).....	3
Obrázek 2 - Model pro simulaci vodního skoku	11
Obrázek 3 - Vytvořená výpočetní síť modelu vodního skoku	12
Obrázek 4 - Expressions pro model vodního skoku	13
Obrázek 5 - Okrajová podmínka Inlet.....	14
Obrázek 6 - Okrajová podmínka Outlet	14
Obrázek 7 - Okrajová podmínka Wall.....	15
Obrázek 8 - Okrajová podmínka Symmetry.....	15
Obrázek 9 - Okrajová podmínka Opening	15
Obrázek 10 - Průběh reziduí v závislosti na počtu provedených iterací.....	16
Obrázek 11 - Rychlosti zobrazené na podélném řezu	17
Obrázek 12 - Průběh imbalancí v závislosti na provedených iteracích	18
Obrázek 13 - Průběh imbalancí pro výpočet varianty A.1.1	19
Obrázek 14 - Schéma ejekce pomocí přepadajícího paprsku (9)	20
Obrázek 15 - Schéma ejekčního účinku pomocí paprsku vody vedeného bokem (9) ..	20
Obrázek 16 - Schéma – zaústění do kolena savky (9)	20
Obrázek 17 - Schéma ejekčního účinku (potrubí pod úrovní nátoku na turbínu) (9) ..	20
Obrázek 18 - Schéma ejekčního účinku pomocí násosky (9)	21
Obrázek 19 - Schéma ejekčního účinku (potrubí pod úrovní savky) (9).....	21
Obrázek 20 - Schéma ejekčního účinku – kombinace (9).....	21
Obrázek 21 - Zobrazení zakončení přelivné plochy všech modelů (černě – model A, modře – model B; červeně – model C)	22
Obrázek 22 – Geometrie modelu A	23
Obrázek 23 - Výpočetní síť modelu A.....	23
Obrázek 24 - Schématické zobrazení okrajových podmínek modelu A	24
Obrázek 25 - Výrazy z CFX – Post.....	26
Obrázek 26 - Zobrazení řezu savkou	26
Obrázek 27 - Geometrie modelu B.....	29
Obrázek 28 - Výpočetní síť modelu B.....	29
Obrázek 29 – Schématické zobrazení okrajových podmínek modelu B.....	30
Obrázek 30 - Geometrie modelu C.....	32
Obrázek 31 - Schématické zobrazení okrajových podmínek modelu C	33
Obrázek 32 - Výpočetní síť modelu C	33

9. Seznam tabulek

Tabulka 1 - Hodnoty parametru K pro výpočet délky vývaru.....	5
Tabulka 2 - Hodnoty okrajových podmínek UpH a DownH pro model A.....	24
Tabulka 3 - Vyhodnocení ejekčního účinku pro model A v závislosti na podílu průtoků	28
Tabulka 4 – Hodnoty okrajových podmínek UpH a DownH pro model B	30
Tabulka 5 - Vyhodnocení ejekčního účinku pro model B v závislosti na podílu průtoků	31
Tabulka 6 - Hodnoty okrajových podmínek UpH a DownH pro model C.....	34
Tabulka 7 - Vyhodnocení ejekčního účinku pro model C v závislosti na podílu průtoků	34
Tabulka 8 - Kontrola průtoků pro všechny varianty výpočtů.....	44
Tabulka 9 - Výpočet poměrů průtoků pro všechny počítané varianty.....	44
Tabulka 10 - Získané tlaky z programu ANSYS CFX převedené na hloubky pro všechny varianty	45

10. Seznam grafů

Graf 1 - Měrná křivka horní vody s vyznačenými hodnotami okrajových podmínek ...	7
Graf 2 - Měrná křivka dolní vody	8
Graf 3 - Měrná křivka dolní vody (porovnání)	8
Graf 4 - Zobrazení rozdílu dolní vody a druhé vzájemné hloubky v závislosti na specifickém průtoku.....	9
Graf 5 - Závislost rozdílu hladin na podílu průtoků pro model A	28
Graf 6 - Závislost rozdílu hladin na podílu průtoků pro model B	31
Graf 7 - Závislost rozdílu hladin na podílu průtoků porovnání modelu A a B.....	32
Graf 8 - Závislost rozdílu hladin na podílu průtoků pro model C	34
Graf 9 - Závislost rozdílu hladin na podílu průtoků pro všechny modely	35

11. Seznam vzorců

Rovnice 1 - Bazinova rovnice pro dokonalý přepad.....	3
Rovnice 2 - Výpočet míry vzdutí.....	4
Rovnice 3 - Výpočet míry vzdutí se zohledněnou hloubkou vývaru	4
Rovnice 4 - Výpočet délky vývaru (dle Nováka)	4
Rovnice 5 - Výpočet součinitele přepadu dle Rehbocka pro kruhově zaoblenou plochu se sklonem vzdušního líce 3:2.....	5
Rovnice 6 - omezení platnosti výpočtu přepadového součinitele.....	6
Rovnice 7 - Výpočet energetické výšky přepadového paprsku z rovnice pro přepad..	6
Rovnice 8 - Výpočet rychlosti	6
Rovnice 9 - Výpočet výšky přepadového paprsku	6

12. Seznam příloh

Příloha A - Kontroly průtoků a výpočet poměrů průtoků pro všechny modely a varianty	44
Příloha B - Získané hodnoty tlaků a vypočtené hloubky pro všechny varianty	45
Příloha C - A.1.1	46
Příloha D - A.1.2	47
Příloha E - A.2.1	48
Příloha F - A.2.2	49
Příloha G - A.3.1	50
Příloha H - A.3.2	51
Příloha I - A.4.1	52
Příloha J - A.4.2	53
Příloha K - B.1.1	54
Příloha L - B.2.1	55
Příloha M - B.3.1	56
Příloha N - B.4.1	57
Příloha O - C.1.1	58
Příloha P - C.2.1	59
Příloha Q - C.3.1	60
Příloha R - C.4.1	61