



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

# MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ V BEZPEČNOSTNÍM PŘELIVU VODNÍHO DÍLA LETOVICE

MODELLING OF FLOW OVER SPILLWAY OF THE LETOVICE DAM

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Mikuláš Škrach

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAN JANDORA, Ph.D.

BRNO 2019



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodních staveb

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Mikuláš Škrach
Název	Modelování proudění v bezpečnostním přelivu vodního díla Letovice
Vedoucí práce	doc. Ing. Jan Jandora, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2018
Datum odevzdání	11. 1. 2019

V Brně dne 31. 3. 2018

---

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT



## **PODKLADY A LITERATURA**

Kolář, V., Patočka, C., Bém, J. 1983. Hydraulika. SNTL/ALFA, Praha.

Čihák, F., Valenta, P., Vaněček, S., Zeman, E. 1991. Automatizace inženýrských úloh. ČVUT, Praha.

Rodi W. 1980. Turbulence models and their application in hydraulics. International Association for hydraulic research, state-of-the-art paper, Delft.

Jandora, J. 2008. Matematické modelování ve vodním hospodářství. VUT v Brně.

## **ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ**

V diplomové práci bude nejprve provedena rešerše prací zabývajících se problémem matematického modelování proudění vody na bezpečnostních objektech vodních děl. Poté bude následovat vlastní modelování přepadu vody přes bezpečnostní přeliv vodního díla Letovice pro finální návrh bezpečnostního přelivu. K řešení bude použito dostupných programů na Ústavu vodních staveb.

Diplomová práce bude obsahovat:

- Úvodní část
- Účel a popis práce
- Matematický popis problému
- Numerické modelování proudění vody
- Výsledky modelování
- Závěrečné zhodnocení

## **STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

---

doc. Ing. Jan Jandora, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá numerickým modelováním plánovaného bezpečnostního přelivu na vodním díle Letovice. Cílem této diplomové práce je ověření hydraulických výpočtů pomocí numerického modelování a ověření kapacity bezpečnostního přelivu. K vytvoření prostorového modelu byl použit program SketchUp a numerické modelování bylo realizováno pomocí programu Flow-3D. Důvod přepočítávání bezpečnostního přelivu je jeho rekonstrukce a rozšiřování z důvodů jeho zkapacitnění v celkovém projektu rekonstrukce vodního díla Letovice.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Bezpečnostní přeliv, VD Letovice, numerický model, prostorový model, model, výpočetní síť, FLOW-3D, 3D-modelování, přelivná hrana.

## **ABSTRACT**

The thesis is concerned on numerical modeling of a scheduled spillway on water structure Letovice. The goal of the thesis is to verify hydraulic calculation using numerical modeling and to verify the capacity of the spillway. The spacial model was created in SketchUp program and the numerical modeling was implemented in Flow-3D program. The reason to recalculate the spillway is its reconstruction and extension in order to make high a capacity of it in the final project of Letovice water structure whole reconstruction.

## **KEYWORDS**

Spillway, Letovice dam, numerical model, 3D model, model, mesh, FLOW3D, 3D-modeling, trough.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Bc. Mikuláš Škrach *Modelování proudění v bezpečnostním přelivu vodního díla Letovice*. Brno, 2019. 57 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Jandora, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Modelování proudění v bezpečnostním přelivu vodního díla Letovice* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 9. 1. 2019

---

Bc. Mikuláš Škrach  
autor práce

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Modelování proudění v bezpečnostním přelivu vodního díla Letovice* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 9. 1. 2019

---

Bc. Mikuláš Škrach  
autor práce

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. J. Jandorovi Ph. D. za odborné vedení při tvorbě této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. M. Holinkovi a Ing. D. Duchanovi Ph. D. za pomoc s instalací, učením a řešením problémů v programu Flow-3D. Také děkuji Ing. P. Holomkovi za všechny podklady, které byly potřeba pro diplomovou práci. Zvláště bych chtěl poděkovat své přítelkyni a své rodině, za podporu v době tvorby diplomové práce.

V Brně dne 9. 1. 2019

---

Bc. Mikuláš Škrach  
autor práce

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>2</b>
1.1 Účel a popis práce . . . . .	2
<b>2 Hydraulické výpočty bezpečnostního přelivu</b>	<b>3</b>
2.1 Bezpečnostní přelivy . . . . .	3
2.1.1 Přepady . . . . .	3
2.1.2 Boční přeliv . . . . .	5
2.2 Výpočet . . . . .	6
<b>3 Matematické modelování</b>	<b>10</b>
3.1 Zákony hydrodynamiky . . . . .	10
3.1.1 Zákon zachování hmotnosti . . . . .	10
3.1.2 Zákon zachování hybnosti . . . . .	12
3.2 Navier-Stokesovy rovnice . . . . .	12
3.3 Reynoldskovy rovnice . . . . .	15
3.4 Turbulentní modely . . . . .	16
3.4.1 $k - \varepsilon$ model . . . . .	16
3.5 Numerické modely . . . . .	18
3.5.1 Metoda sítí . . . . .	18
3.5.2 Variační metody . . . . .	18
3.5.3 Metoda konečných prvků . . . . .	19
3.5.4 Metoda vážených reziduí . . . . .	19
<b>4 Vlatní řešení</b>	<b>20</b>
4.1 Zájmová lokalita . . . . .	20
4.1.1 Potok Křetínka . . . . .	20
4.1.2 Nádrž Letovice . . . . .	20
4.1.3 Hráz . . . . .	21
4.1.4 Odběrný objekt a spodní výpusti . . . . .	23
4.1.5 Stávající bezpečnostní přeliv . . . . .	25
4.1.6 Rekonstrukce VD . . . . .	27
4.1.7 Dočasný bezpečnostní přeliv . . . . .	27
4.1.8 Plánovaný bezpečnostní přeliv . . . . .	28
4.2 Prostorový model - SketchUp . . . . .	29
4.2.1 O programu . . . . .	29
4.2.2 Postup . . . . .	30
4.3 Úprava modelu - Blender . . . . .	31
4.3.1 O programu . . . . .	31
4.3.2 Postup opravy modelu . . . . .	32
4.4 Numerický model - Flow 3D . . . . .	33
4.4.1 Zjednodušující předpoklady . . . . .	33
4.4.2 O programu . . . . .	33
4.4.3 Nastavení . . . . .	33
4.4.4 FAVOR . . . . .	42
4.4.5 Výpočty . . . . .	44
<b>5 Výsledky modelování</b>	<b>45</b>
<b>6 Zhodnocení a závěr</b>	<b>51</b>
<b>Literatura</b>	<b>57</b>

# 1 Úvod

## 1.1 Účel a popis práce

Účel této diplomové práce je ověření kapacity bezpečnostního přelivu, která je spočítána pomocí hydraulických výpočtů, a taktéž zkontrolování, jestli měrné křivky bezpečnostního přelivu budou stejné při hydraulickém výpočtu jako při numerickém.

Ve svých dalších částech se diplomová práce zabývá obecnými informacemi o přelivech, hydraulickým výpočtem bezpečnostního přelivu na vodním díle Letovice, teorií matematického modelování, popisem vodního díla Letovice, jeho umístěním a historií díla. Dále se zabývá postupem tvoření modelu a jeho úpravami a popisuje programy použité k tomuto účelu a následný výpočet numerického modelu.

## 2 Hydraulické výpočty bezpečnostního přelivu

### 2.1 Bezpečnostní přelivy

#### 2.1.1 Přepady

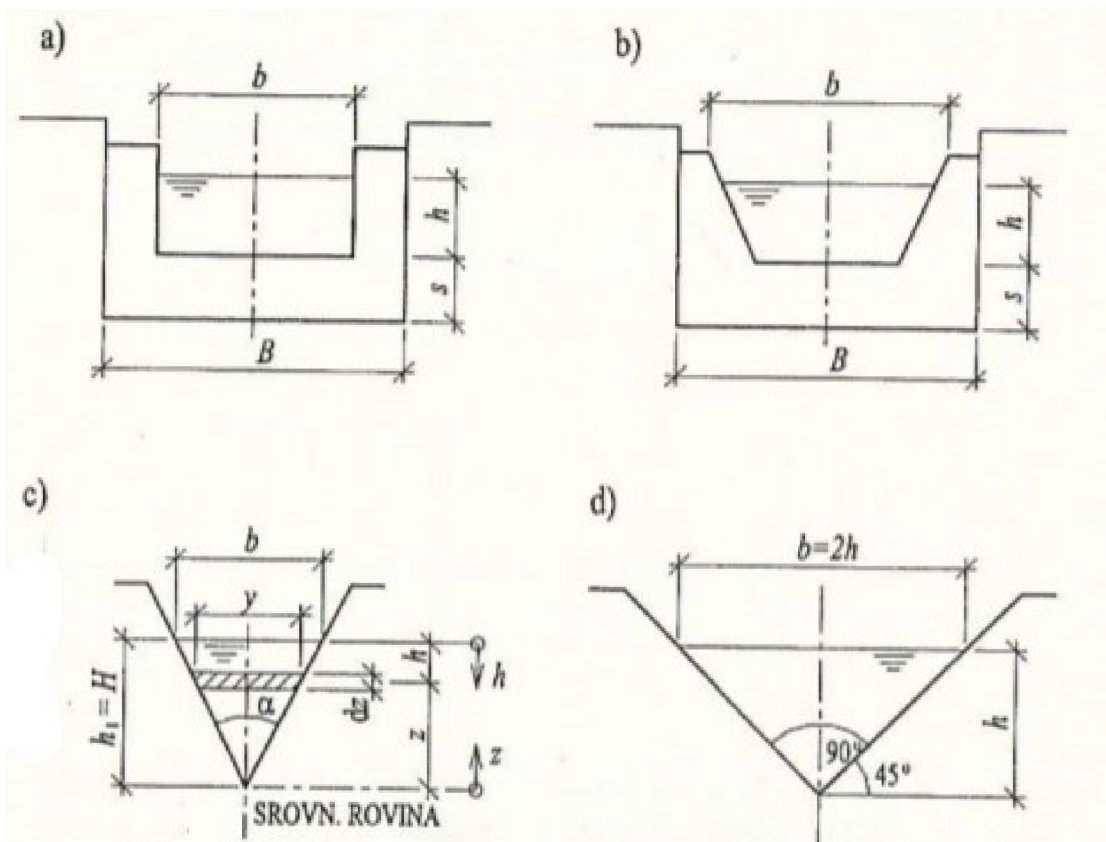
##### Názvosloví

- přeliv - konstrukce, přes kterou přepadá voda
- přelivná hrana - nejvyšší část přelivu
- přepadový paprsek - přepadající proud vody

##### Dělení

##### Podle typu konstrukce:

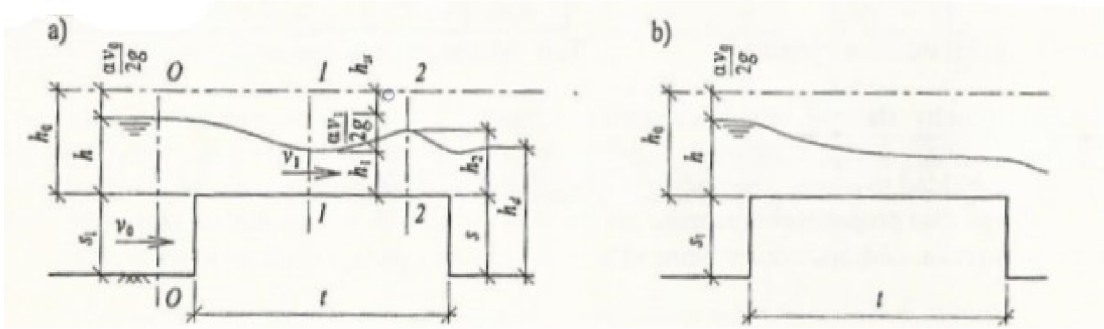
- ostrohranné přelivy [10]
  - $t < 0,66h$ , kde  $t$  je tloušťka přelivu a  $h$  je přepadová výška
  - používají se pro měření, jelikož jsou nejlépe experimentálně ověřeny
  - např.: Bazinův, lichoběžníkový, Thomsonův,...



Obrázek 2.1: Ostrohranné přelivy [10]



- jezové nebo přehradní přelivy
  - mohou mít pohyblivou (klapkové, tabulové, válcové,..) nebo pevnou konstrukci (obdélníkové, proudnicová plocha, lichoběžníkové,..)
- přelivy se širokou korunou [10]
  - $t \geq 2 - 3h$ , kde  $t$  je tloušťka přelivu a  $h$  je přepadová výška

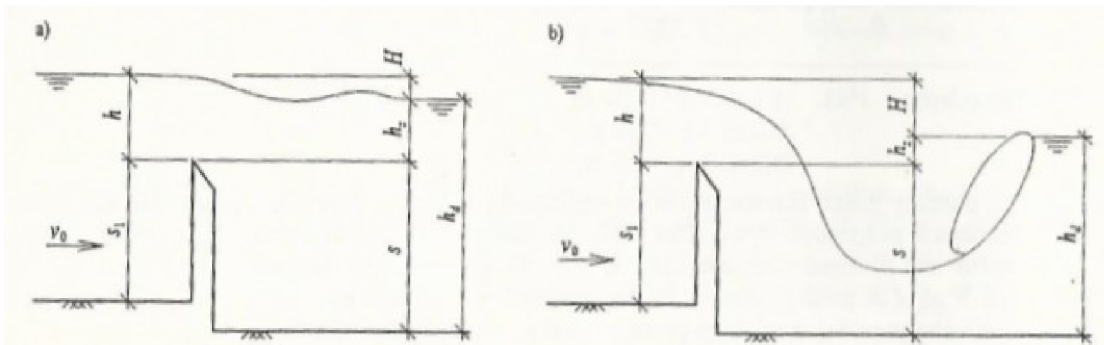


Obrázek 2.2: Rozdělení dle typu konstrukce [10]

- zvláštní typy přelivů
  - šachtové přelivy, boční přelivy

**Podle ovlivnění spodní vodou:**

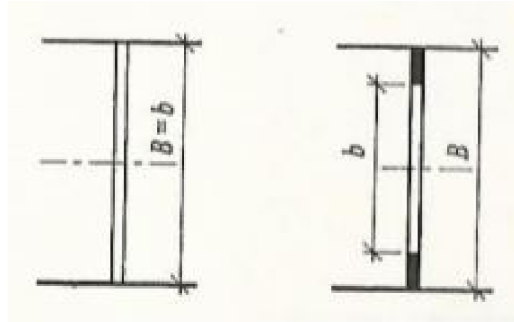
- přepad dokonalý - bez ovlivnění spodní vodou
  - počítá se dle rovnice 2.2
- přepad nedokonalý - přepad je ovlivněný spodní vodou
  - počítá se stejně, jako přepad dokonalý, akorát se do výpočtu přidá součinitel zatopení  $\sigma_z$



Obrázek 2.3: Rozdělení dle ovlivnění spodní vodou [10]

### Podle zúžení:

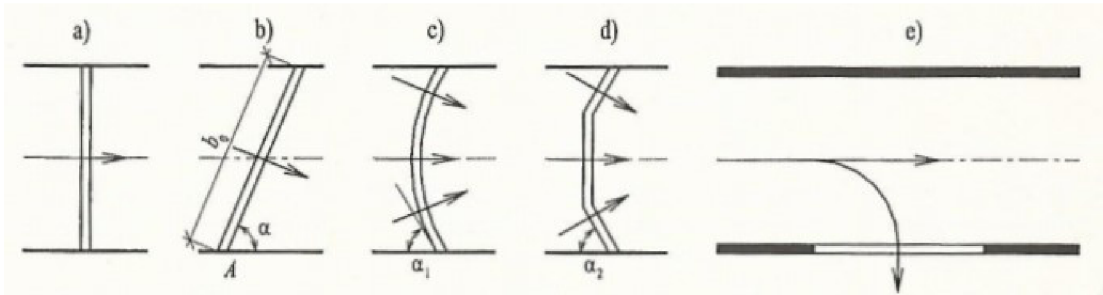
- bez bočního zúžení - když se šířka přelivu rovná šířce žlabu
- s bočním zúžením - jestliže je přelivná hrana užší než-li žlab
  - výpočet se neprovádí se skutečnou šířkou, ale s účinnou šířkou, která se počítá podle rovnice 2.4



Obrázek 2.4: Rozdělení dle zúžení [10]

### Podle půdorysného tvaru:

- přelivy čelné
- přelivy šikmé, lomené, křivočaré
  - do výpočtu přepadového množství 2.2 se přidá součinitel šikmosti, ve kterém se projeví vliv půdorysného uspořádání
- přeliv boční - detailněji 2.1.2



Obrázek 2.5: Rozdělení dle půdorysného tvaru [10]

#### 2.1.2 Boční přeliv

Boční přelivy bývají situovány na břeh vodní nádrže převážně v těsné blízkosti u hráze. Větší část přelivné hrany bývá zpravidla rozvlněná se směrem toku a přepad přes přelivnou hranu je tedy kolmý na tok. Přeliv bývá většinou zděná nebo betonová stěna, rovná nebo mírně zkosená. Přelivná hrana může mít různé tvary, ale nejčastější bývá půlkruhová, z důvodu jednoduché konstrukce.

Voda přes přeliv přepadá do spadiště, které bývá po celé délce přelivné hrany. Spadiště musí být dostatečně hluboké, aby neovlivňovalo přepad vody přes přeliv, a dostatečně kapacitní ze stejného důvodu.

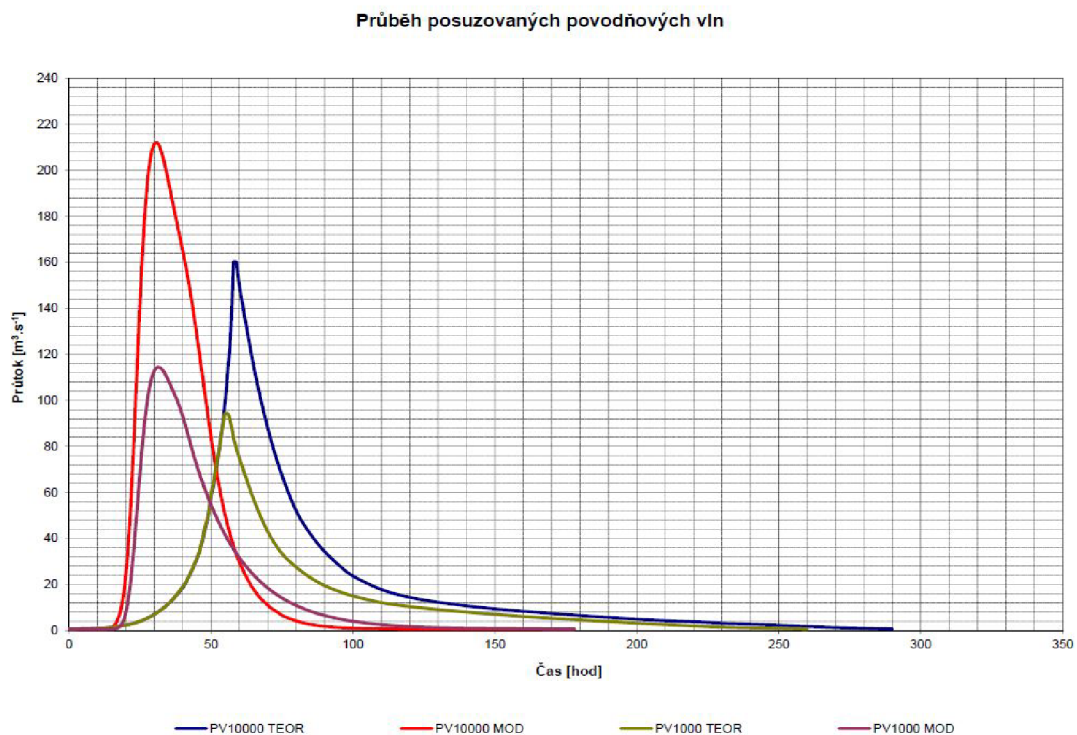
Za spadištěm následuje skluz, který má větší spád než-li spadiště, a slouží k rychlému odvedení vody ze spadiště do vývaru.

Vývar slouží k utlumení kinetické energie vody a ochraně koryta za přehradou.

## 2.2 Výpočet

### Použité podklady pro výpočet

Podkladem pro výpočet bezpečnostního přelivu vodního díla Letovice byla teoretická povodňová vlna s dobou opakování  $N=10\ 000$  let. Jako podklad byli připraveny dvě 10 000 leté povodně (viz obrázek: 2.6) . První byla zpracována ze srážkoodtokového modelu a druhá byla zpracována tzv. klasickým přístupem. Následně se vybrala povodeň s větším kulminačním průtokem a to tedy varianta dle srážkoodtokového modelu, která byla uvažována jako výchozí podklad pro výpočet bezpečnostního přelivu. Kulminační průtok je  $Q_{10\ 000} = 212\ m^3/s$ . [7]



**Obrázek 2.6:** Hydrogram povodní [7]

### Kapacita spodních výpustí

Kapacita spodních výpustí nebyla počítána zvláště pro rekonstrukci VD Letovice, ale byla převzata z manipulačního řádu vodního díla. Kapacita spodních výpustí pro hladinu je  $Q = 7.18\ m^3/s$  [13]. Výpočet ani kapacita spodních výpustí nebyly nijak ověřovány. Kapacita je počítána dle vzorce [7]:

$$Q = \frac{2}{3} \mu \cdot S \sqrt{2 \cdot g \cdot h}, \quad (2.1)$$

kde:

$\mu$  výtokový součinitel [–],

$S$  plocha potrubí [ $m^2$ ],

$h$  tlačná výška [ $m$ ].

Výtokový součinitel  $\mu$  byl stanoven na hodnotu na 0,419 dle manipulačního řádu [13].

### Kapacita přelivu

Kapacita navrhovaného bezpečnostního přelivu je vypočítána ve studii [7], kde se uvažuje s délkou přelivné hrany 35 m s úrovní hrany přelivu na kótě 361.10 m n. m. [7]

### Měrná křivka nezatopeného přelivu

$$Q = m \cdot b_0 \sqrt{2 \cdot g} (H - H_{p\bar{r}})^{\frac{3}{2}}, \quad (2.2)$$

kde:

$m$  součinitel přepadu pro výpočet transformace byl zvolen 0,485 [-][7],

$$m = \frac{2}{3} \mu, \quad (2.3)$$

$\mu$  součinitel přelivu [-],

$b_0$  účinná šířka přelivu [m],

$$b_0 = b - 0,1 \cdot \xi \cdot n_z (H - H_{p\bar{r}}), \quad (2.4)$$

$g$  gravitační zrychlení [ $m/s^2$ ],

$b$  šířka přelivu [m],

$n_z$  počet zúžení [-],

$\xi$  součinitel místních ztrát; uvažováno 1 pro pravý úhel [-] [7],

$H$  hladina vody v nádrži [m n. m.],

$H_{p\bar{r}}$  kóta přelivné hrany bezpečnostního přelivu [m n. m.],

### Měrná křivka zatopeného přelivu

Když dosáhne výška vody ve spadišti 1/3 až 1/2 výšky přelivu, tak hladina začne ovlivňovat kapacitu přelivu. V hydrotechnických výpočtech k DUR VD Letovice [7] se uvažovalo s bystřínným prouděním na skluzu a s kritickou hloubkou na rozhraní spadiště a skluzu. Kritická hloubka byla vypočítána na konci spadiště 2.5. Přepočet pro lichoběžníkové koryto se sklonem svahů 1 : m dle rovnice 2.6 [7].

$$h_{k0} = \sqrt[3]{\frac{\alpha \cdot Q^2}{g \cdot b^2}}, \quad (2.5)$$

kde:

$g$  gravitační zrychlení [ $m/s^2$ ],

$\alpha$  Coriolissovo číslo [-],

$Q$  průtok spadištěm [ $m^3/s$ ],

$b$  šířka dna,  $b = 8,5$  m [m] [7],

$$h_{kr} = h_{k0} \left(1 - \frac{\sigma}{3} + 0,105 \cdot \sigma^2\right), \quad (2.6)$$

kde:

$\sigma$  součinitel charakterizující sklon svahu v lichoběžníkovém korytě [-],

$$\sigma = \frac{m_s \cdot h_{h0}}{b}, \quad (2.7)$$

$m_s$  poměr sklonů svahů v lichoběžníkovém korytě [-].

## Výpočet kritického sklonu

$$i_{kr} = \frac{v_k^2 \cdot n^2}{R_k^{\frac{4}{3}}}, \quad (2.8)$$

kde:

- $v_{kr}$  kritická rychlost [m/s],  
 $n$  drsnost; uvažována  $n = 0,02$  [-] [7],  
 $R_k$  kritický hydraulický poloměr [m],

$$R_k = \frac{S_k}{O_k}, \quad (2.9)$$

- $S_k$  průtočná plocha [m<sup>2</sup>],  
 $O_k$  omočený obvod [m].

Porovnání kritického sklonu se sklonem počátečního úseku skluzu ukazuje, že pro všechny uvažované průtoky je kritický sklon menší a lze tedy předpokládat vznik kritické hloubky na konci spadiště [7].

## Průběh hladiny ve spadišti

Hladina vody ve spadišti byla řešena metodou po úsecích [7].

$$\Delta h = (I_d - I_e) \cdot \Delta x - \frac{1+k}{2 \cdot g} \left[ \alpha_2 \left( \frac{Q_2}{S_2} \right)^2 - \alpha_1 \left( \frac{Q_1}{S_1} \right)^2 \right], \quad (2.10)$$

- $I_d$  sklon dna spadiště [-],  
 $I_e$  sklon čáry energie [-],

$$I_e = \frac{n^2 \cdot Q^2}{R^{\frac{4}{3}} \cdot S^2}, \quad (2.11)$$

- $R$  kritický hydraulický poloměr [m],  
 $S$  průtočná plocha [m<sup>2</sup>],  
 $n$  drsnost; uvažována  $n = 0,02$  [-] [7],  
 $k$  koeficient místní ztráty víření dle Ven Te Chowa [-],  
 $\alpha_{1,2}$  Coriolisovo číslo; uvažováno  $\alpha_{1,2} = 1$  [-] [7],  
 $S_{1,2}$  průtočná plocha [m<sup>3</sup>/s],  
 $Q_{1,2}$  průtok [m<sup>3</sup>/s],

$$Q_1 = Q_2 - q \cdot \Delta x, \quad (2.12)$$

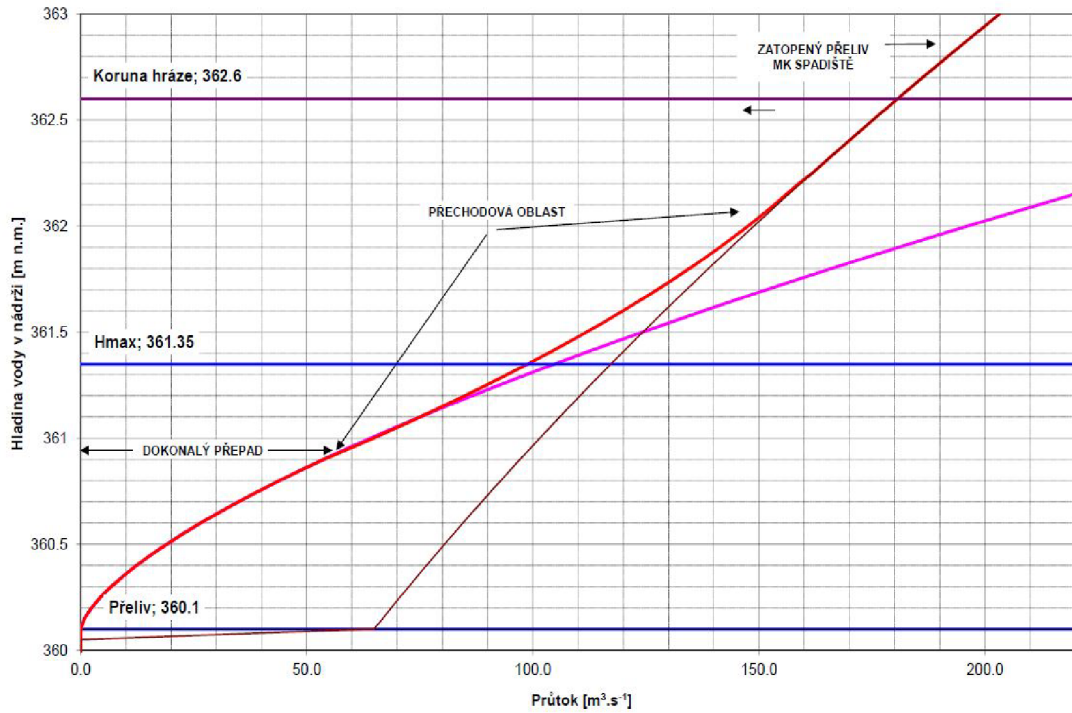
- $q$  specifický průtok na přelivné hraně bočního přelivu [m<sup>2</sup>/s],

$$q = \frac{Q_{posuzované}}{L}, \quad (2.13)$$

- $L$  délka přelivné hrany  $L = 35$  m [m] [7],

### Měrná křivka

Při vyobrazení obou měrných křivek (viz obrázek 2.7) jak při nezatopeném tak i zatopeném spadišti lze vidět, že při průtoku cca 55 m<sup>3</sup>/s dojde k ovlivnění průtoku vodou ze spadiště. Tento průtok odpovídá kótě 360,95 m n. m.



Obrázek 2.7: Měrná křivka [7]

### Přechodová oblast

V úseku mezi 360,95 a 362,20 m n. m. probíhá proudění v přechodové oblasti, kde byla měrná křivka přepadu interpretována polynomem 2. stupně dle rovnic 2.14 2.15 [7].

$$Q = a \cdot H^2 + b \cdot H + c, \quad (2.14)$$

tedy:

$$Q = -22,75646 \cdot H + 16535,82047 \cdot H - 3003721,8644, \quad (2.15)$$

kde:

$H$  hladina vody v nádrži [m].

Tímto způsobem byla odvozena měrná křivka pro zvětšený bezpečnostní přeliv na vodním díle Letovice. Tato diplomová práce se zabývá ověřením této měrné křivky pomocí matematického modelu.

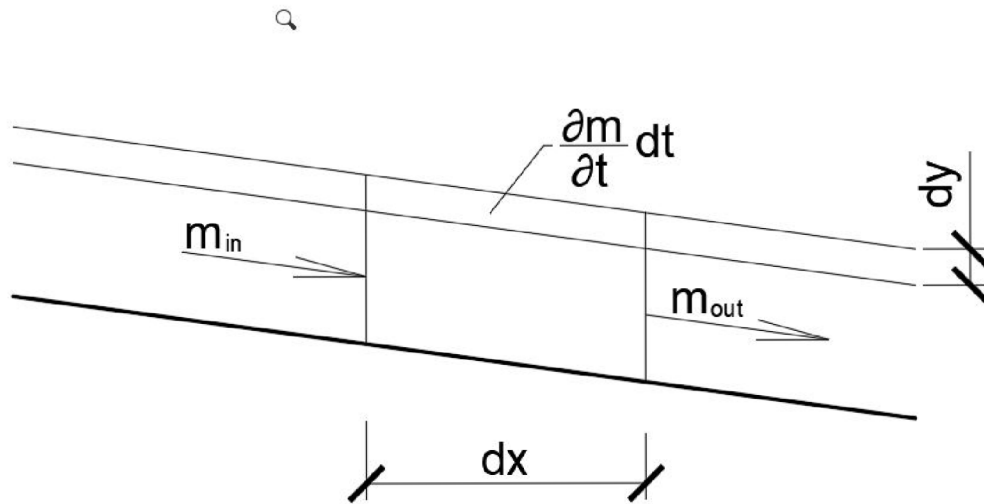
### 3 Matematické modelování

#### 3.1 Zákony hydrodynamiky

Následující vztahy jsou potřebné k odvození Navier-Stokesových rovnic 3.2.

##### 3.1.1 Zákon zachování hmotnosti

Zákon zachování hmotnosti lze interpretovat rovnicí kontinuity. Z něj vyplývá, že rozdíl mezi hmotností kapaliny do elementu vtékající a z elementu vytékající za časový interval se musí rovnat časové změně hmotnosti kapaliny obsažené v tomto elementu [10].



Obrázek 3.1: Rovnice kontinuity - 1D

Vyjádření této definice v jednorozměrném tvaru:

$$\rho \cdot v \cdot A \cdot dt - \left( \rho \cdot v \cdot A \cdot dt + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \cdot v \cdot A \cdot dt) dx \right) = \frac{\partial m_k}{\partial t} dt, \quad (3.1)$$

kde:

$\rho \cdot v \cdot A \cdot dt$  hmotnost kapaliny vtékající do elementu,

$\left( \rho \cdot v \cdot A \cdot dt + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \cdot v \cdot A \cdot dt) dx \right)$  hmotnost kapaliny vytékající z elementu,

$\rho \cdot v \cdot A \cdot dt$  časová akumulace hmotnosti kapaliny v elementu,

kde:

$\rho$  hustota kapaliny [ $kg/m^3$ ],

$v$  profilová rychlost [ $m/s$ ],

$A$  průtočný průřez [ $m^2$ ],

$m_k$  hmotnost kapaliny [ $kg$ ],

$t$  čas [ $s$ ].

Po úpravě rovnice 3.1 a zavedením  $Q = A \cdot v$  dostaneme:

$$\frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot Q)}{\partial x} = 0, \quad (3.2)$$

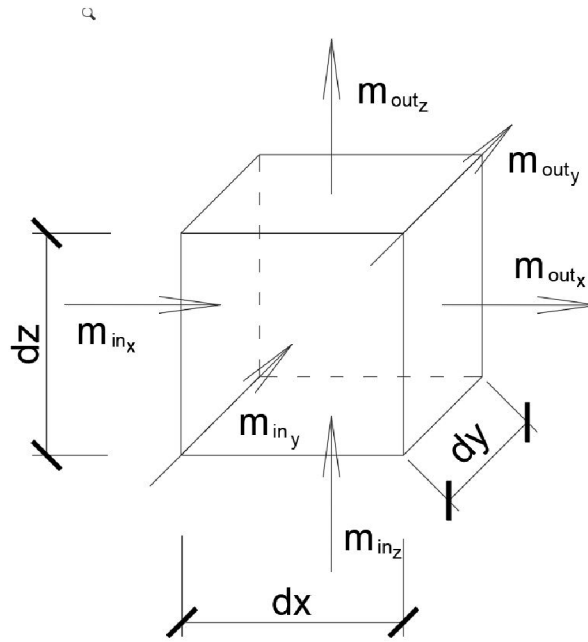
kde:

$Q$  průtočné množství [ $m^3/s$ ].

Pokud se jedná o nestlačitelnou kapalinu ( $\rho = \textit{kons.}$ ) nabude rovnice kontinuity tvaru:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0. \quad (3.3)$$

Podobným způsobem se odvodí i rovnice kontinuity pro 3D.



Obrázek 3.2: Rovnice kontinuity - 3D

Nejprve si stejně jako v jednorozměrném vyjádření v rovnici 3.1 vyjádříme rovnice v každém směru [11]:

$$\rho \cdot u_x \cdot dy \cdot dz \cdot dt - \left( \rho \cdot u_x + \frac{\partial(\rho \cdot u_x)}{\partial x} dx \right) dy \cdot dz \cdot dt = \frac{\partial(\rho \cdot u_x)}{\partial x} dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt, \quad (3.4)$$

$$\rho \cdot u_y \cdot dx \cdot dz \cdot dt - \left( \rho \cdot u_y + \frac{\partial(\rho \cdot u_y)}{\partial y} dy \right) dx \cdot dz \cdot dt = \frac{\partial(\rho \cdot u_y)}{\partial y} dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt, \quad (3.5)$$

$$\rho \cdot u_z \cdot dx \cdot dy \cdot dt - \left( \rho \cdot u_z + \frac{\partial(\rho \cdot u_z)}{\partial z} dz \right) dx \cdot dy \cdot dt = \frac{\partial(\rho \cdot u_z)}{\partial z} dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt, \quad (3.6)$$

kde:

$\rho$  hustota kapaliny [ $kg/m^3$ ],

$u_{xyz}$  složka vektoru bodové rychlosti ve směru x,y,z, [ $m/s$ ],

$t$  čas [ $s$ ].



Po složení rovnic 3.4, 3.5, 3.6 dohromady a jejich úpravě obdržíme diferenciální rovnici popisující zákon hmotnosti tekutiny v hydraulice, která se nazývá Rovnice spojitosti konzervativního proudění pro stlačitelnou kapalinu:

$$\frac{\partial(\rho \cdot u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot u_z)}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0. \quad (3.7)$$

Pro nestlačitelné kapaliny ( $\rho = 0$ ) má pak rovnice tvar:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0, \quad (3.8)$$

popřípadě (včetně použití i Einsteinovy sumační konvence) tvar:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0. \quad (3.9)$$

### 3.1.2 Zákon zachování hybnosti

Další zákon hydrodynamiky, který je potřebný pro další vyjádření, je zákon zachování hybnosti. Jedná se v podstatě o přizpůsobení impulzové věty z mechaniky hmotného bodu na ustálený proud kapaliny. Při jejím použití uvažujeme jen účinky na omezený výsek proudu [11].

Působí-li na hmotný bod o hmotnosti  $m$  stála síla  $\vec{F}$ , mění se rychlost  $\vec{u}$ . Podle Newtonova zákona platí [11]:

$$F_i - m \frac{Dv_i}{Dt} = 0, \quad (3.10)$$

kde:

$F_i$	složka vektoru síly [N],
$m$	hmotnost [kg],
$v_i$	složka vektoru rychlosti [m/s],
$t$	čas [s].

V klasické Newtonově mechanice se hmotnost  $m$  považuje za konstantní a substanciální derivace složky  $v_i$  vyjadřuje celkové zrychlení v daném bodě. Proto rovnice 3.10 nabude tvaru:

$$\frac{Dv_i}{Dt} = \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j}. \quad (3.11)$$

## 3.2 Navier-Stokesovy rovnice

Navier -Stokesovy rovnice jsou nejobecnější rovnice prostorového pohybu newtonovské kapaliny. Vyjadřují vztah mezi silami objemovými, tlakovými, odporovými a setrvačnými v proudící kapalině [11].

K odvození kromě zákona zachování hmotnosti dle rovnice 3.1.1 a zákona zachování hybnosti dle rovnice 3.1.2, potřebujeme definovat konstitutivní vztahy pro newtonovskou stlačitelnou kapalinu vyjadřující napětí  $\sigma_{ij}$  v kapalině jako lineární funkci rychlosti přetvoření  $\varepsilon_{ij}$  a tlaku  $p$  [11]:

$$\sigma_{ij} = -p \cdot \delta_{ij} + \lambda(\rho, T) \varepsilon_v \cdot \delta_{ij} + 2 \cdot \mu(\rho, T) \dot{\varepsilon}_{ij}, \quad (3.12)$$

kde:

$p$	tlak [Pa],
-----	------------

$\delta_{ij}$  Kroneckerovo delta [-],

$\delta_{ij} = 0$  pokud  $i \neq j$

$\delta_{ij} = 1$  pokud  $i = j$

$\lambda(\rho, T)$   $\lambda = \frac{2}{3}\mu$ , koeficient objemového přetvoření [-],

$\mu(\rho, T)$  koeficient dynamické viskozity [-],

$\dot{\epsilon}_v$  tenzor rychlosti objemového přetvoření [-],

$$\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_{xx} + \dot{\epsilon}_{yy} + \dot{\epsilon}_{zz} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}, \quad (3.13)$$

$\dot{\epsilon}_{ij}$  tenzor rychlosti přetvoření [-],

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right). \quad (3.14)$$

Pro newtonovskou kapalinu platí  $\rho = konst.$  a s užitím vztahů 3.13, 3.14 a 3.7 platí, že  $\dot{\epsilon}_v = 0$ .

Dále k odvození Navier-Stokesovy rovnice je potřeba definovat síly působící infinitesimální kontrolní element vyjmutý z obrati proudění:

- Povrchové síly - tlakové, smykové způsobené pohybem a vazkostí kapaliny... Síly které působí na povrch objemu a vyjadřují tak interakci s okolím elementárního objemu [11]:

$$dF_{si} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} dx dy dz, \quad (3.15)$$

kde:

$F_{si}$  složka vektoru síly povrchového zatížení [N],

$\sigma_{ij}$  symetrický tenzor napětí [-].

- Objemové síly - gravitační, Coriolisovy, elektromagnetické... Síly které působí na celý objem [11]:

$$dF_{bi} = dm \cdot f_i, \quad (3.16)$$

kde:

$F_{bi}$  složka vektoru síly objemového zatížení [N],

$f_i$  složka objemového zatížení na jednotku hmotnosti [ $m/s^2$ ],

$dm$   $dm = \rho dV = \rho dx dy dz$  dostaneme pak:

$$dF_{bi} = \rho \cdot f_i dx dy dz. \quad (3.17)$$

Dosazením všech sil působících na infinitesimální kontrolní element lze odvodit rovnici hybnosti pro kapalinu. Podmínku rovnováhy zapíšeme takto:

$$dF_i = dF_{si} + dF_{bi}. \quad (3.18)$$

Dosazením rovnic 3.16, 3.17 a 3.10 do rovnice 3.18 dostaneme rovnici:

$$\rho dx dy dz \left( \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} dx dy dz + \rho \cdot f_i dx dy dz, \quad (3.19)$$

kteřá za předpokladu, že  $dx, dy, dz \neq 0$ , lze upravit do podoby:

$$\rho \left( \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho \cdot f_i \quad (3.20)$$

Pokud použijeme rovnici 3.20 v rovnici kontinuity 3.7 dostaneme:

$$\frac{\partial(\rho \cdot v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot v_i \cdot v_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho \cdot f_i. \quad (3.21)$$

Když dosadíme do rovnice 3.21 konstitutivní vztahy 3.12 za  $\sigma_{ij}$ , pak definujeme Navier-Stokesovy rovnice [11]:

$$f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\lambda \cdot \dot{\epsilon}_v)}{\partial x_i} + 2 \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\mu \cdot \dot{\epsilon}_{ij})}{\partial x_j} = \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j}, \quad (3.22)$$

kde:

$f_i$  zrychlení vyvolané objemovými silami,

$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}$  zrychlení vyvolané tlakovou silou,

$\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\lambda \cdot \dot{\epsilon}_v)}{\partial x_i}$  zrychlení vyvolané objemovým přetvořením kapaliny,

$2 \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\mu \cdot \dot{\epsilon}_{ij})}{\partial x_j}$  zrychlení vyvolané tvarovým přetvořením kapaliny,

$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j}$  zrychlení vyvolané setrvačnými silami.

S předpokladem, že  $\rho = konst.$  a viskozita kapaliny  $\mu = konst.$  dostaneme tvar, který upravíme vztahem 3.14. Výsledný tvar je:

$$f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j}. \quad (3.23)$$

Do vztahu 3.23 dále zavedeme tenzor vizkozního napětí:

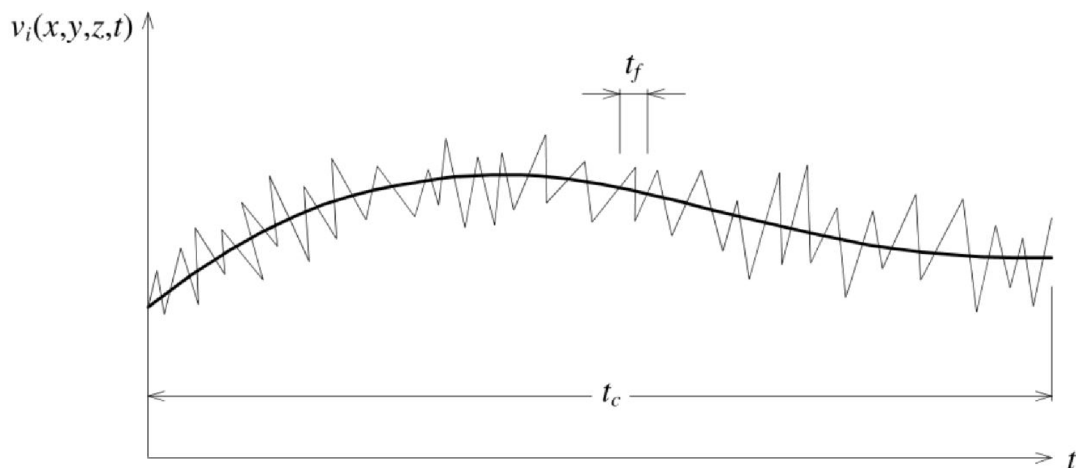
$$\tau_{ij}^f = \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right), \quad (3.24)$$

a upravená rovnice 3.23 následně dostane tvar:

$$\rho \cdot f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}^f}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (v_j \cdot v_i)}{\partial x_j}. \quad (3.25)$$

Jelikož máme čtyři neznámé, tak jako čtvrtou rovnici použijeme rovnici kontinuity 3.7.

### 3.3 Reynoldskovy rovnice



Obrázek 3.3: střední rychlosti

Reynoldsovy rovnice zavádějí tzv. okamžité hodnoty složky rychlosti  $v_i$  a tlaku  $p$  [11]:

$$v_i = \bar{v}_i + v'_i, \quad (3.26)$$

kde:

$\bar{v}_i$  součet střední hodnoty složky rychlosti [ $m/s$ ],

$v'_i$  flukтуаční složka rychlosti [ $m/s$ ],

$$p = \bar{p} + p', \quad (3.27)$$

kde:

$\bar{p}$  součet střední hodnoty složky tlaku [ $Pa$ ],

$p'$  flukтуаční složka tlaku [ $Pa$ ].

Dosazením těchto středních hodnot fluktuace okamžitých složek rychlostí dle rovnice 3.26 a tlaku dle rovnice 3.27 do Navier-Stokesových rovnic pro nestlačitelnou kapalinu 3.25 a časovým zprůměrováním dostaneme Reynoldsovy rovnice [11]:

$$\rho \cdot f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}^f}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\bar{v}_j \cdot \bar{v}_i + \overline{v'_j \cdot v'_i})}{\partial x_j}, \quad (3.28)$$

kde:

$\rho$  hustota kapaliny [ $kg/m^3$ ],

$f_i$  složka vektoru objemového zatížení vztáženého na jednotku hmotnosti [ $m/s^2$ ],

$\tau_{ij}^f$  tenzor viskózních napětí [ $kg/m/s$ ],

$t$  čas [ $s$ ].

Vyjádřením Reynoldsových tangenciálních napětí ( nazývaných také virtuální):

$$\tau_{ij}^t = -\rho \cdot \overline{v_j' \cdot v_i'} \quad (3.29)$$

a následným dosazením do rovnice 3.28 dostáváme:

$$\rho \cdot f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial (\tau_{ij}^f + \tau_{ij}^t)}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\bar{v}_j \cdot \bar{v}_i)}{\partial x_j} \quad (3.30)$$

Celkem tedy dostáváme deset neznámých a to:  $p$ ,  $\bar{v}_x$ ,  $\bar{v}_y$ ,  $\bar{v}_z$ ,  $\tau_{xx}^t$ ,  $\tau_{xy}^t$ ,  $\tau_{xz}^t$ ,  $\tau_{yz}^t$ ,  $\tau_{yy}^t$ ,  $\tau_{zz}^t$ . Oproti tomu rovnice máme jenom čtyři. Tři rovnice z 3.30 a jednu rovnici kontinuity 3.9. Systém je tedy otevřený a soustava rovnic je řešitelná pouze v případě, že se určí neznámá korelace  $(\overline{v_j' \cdot v_i'})$ , tedy že se uzavře soustava rovnic doplněním nezávislými rovnicemi.

### 3.4 Turbulentní modely

Modely turbulence mohou být rozděleny podle různých hledisek. Nejdůležitějším hlediskem pro uzavření rovnic 3.9 a 3.30 jsou následující [9]:

#### Způsob modelování neznámých korelací mezi flukтуаčními složkami rychlosti $(\overline{v_j' \cdot v_i'})$

- použitím Boussinesqova pojetí (zavedení turbulentní viskozity)
- přímým modelováním korelací mezi flukтуаčními složkami rychlosti  $(\overline{v_j' \cdot v_i'})$  modely Reynoldsových napětí

#### počet rovnic které modely uzavírají

- 0 - rovnicové - modely bez transportních rovnic (např. model konstantní turbulentní viskozity, Prandtlův model směřovací délky, Prandtlův model volné smykové vrstvy, atd.)
- 1 - rovnicové (např. Bradshawův model)
- 2 - rovnicové (např.  $k - \varepsilon$  model (Launder-Spalding), RNG  $k - \varepsilon$  model (Mohammadi, Pironneau), atd.)
- více rovnicové - rovnice nepřinášejí očekávaný zisk informací, proto se nepoužívají.

#### 3.4.1 $k - \varepsilon$ model

Pro tuto úlohu byl použitý  $k - \varepsilon$  model, hlavně z důvodů jeho poměrně přesných výsledků a také z důvodu, že tento model je nejrošířenější a tedy je dobře ověřený.

$k - \varepsilon$  model pro izotermické proudění nestalčité kapaliny má tvar [9]:

- modifikovaný Prandtl-Kolmogorův vztah

$$\mu_t = c_\mu \cdot \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.31)$$

kde:

$\mu_t$	součinitel turbulentní viskozity $[kg/m/s]$ ,
$c_\mu$	koefficient $k - \varepsilon$ modelu $[-]$ ,
$\rho$	hustota kapaliny $[kg/m^3]$ ,

- $k$  kinetická energie turbulence vztažená na jednotku hmotnosti [ $J/kg$ ],  
 $\varepsilon$  disipace turbulentní energie na jednotku hmotnosti [ $J/kg/s$ ].

- transportní rovnice kinetické turbulence  $k$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{v}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\rho \cdot \sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \frac{\mu_t}{\rho} \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} - \varepsilon, \quad (3.32)$$

kde:

- $\mu_t$  součinitel turbulentní viskozity [ $kg/m/s$ ],  
 $t$  čas [ $s$ ],  
 $\rho$  hustota kapaliny [ $kg/m^3$ ],  
 $k$  kinetická energie turbulence vztažená na jednotku hmotnosti [ $J/kg$ ],  
 $\varepsilon$  disipace turbulentní energie na jednotku hmotnosti [ $J/kg/s$ ],  
 $\bar{v}$  střední hodnota složky rychlosti [ $m/s$ ],  
 $\sigma_k$  koeficient  $k - \varepsilon$  modelu [-].

- transportní rovnice rychlosti  $\varepsilon$  její disipace

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{v}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\rho \cdot \sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + c_{1\varepsilon} \frac{\mu_t}{\rho} \frac{\varepsilon}{k} \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (3.33)$$

kde:

- $\mu_t$  součinitel turbulentní viskozity [ $kg/m/s$ ],  
 $t$  čas [ $s$ ],  
 $\rho$  hustota kapaliny [ $kg/m^3$ ],  
 $k$  kinetická energie turbulence vztažená na jednotku hmotnosti [ $J/kg$ ],  
 $\varepsilon$  disipace turbulentní energie na jednotku hmotnosti [ $J/kg/s$ ],  
 $\bar{v}$  střední hodnota složky rychlosti [ $m/s$ ],  
 $c_{1,2\varepsilon}$  koeficient  $k - \varepsilon$  modelu [-],  
 $\sigma_\varepsilon$  koeficient  $k - \varepsilon$  modelu [-].

$c_\mu$	$c_{1\varepsilon}$	$c_{2\varepsilon}$	$\mu_k$	$\mu_\varepsilon$
0,09	1,44	1,92	1,00	1,30

**Tabulka 3.1:** Koeficienty  $k - \varepsilon$  modelu [9]

### Porovnání modelů

Pro ověření rozsahu nepřesnosti a rozdílnosti při výběru turbulentního modelu, byly vytvořeny kontrolní numerické modely, které se lišily jenom v použití turbulentního modelu.

Při pohledu na výsledky kontroly lze vyvodit, že výběr použitého modelu nedává moc rozdílné výsledky

model	průtok $m^3/s$
$k - \varepsilon$ - použitý	64,73
RNG $k - \varepsilon$	64,63
$k - \omega$	65,03

**Tabulka 3.2:** Porovnání modelů

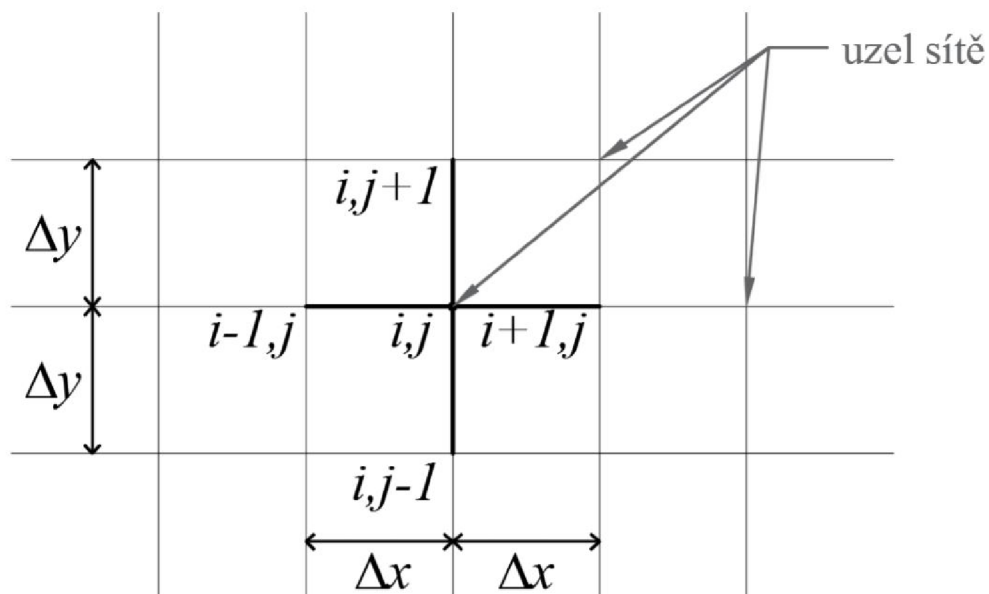
### 3.5 Numerické modely

Numerické metody jsou oproti analytickým metodám určeny k počítání rozsáhlých úloh, ale na druhou stranu bývají výpočetně náročnější. V praxi bývají používány především tyto metody [11]:

- Metoda sítí
- variační metody
- metody vážených reziduí

#### 3.5.1 Metoda sítí

Metoda sítí neboli také metoda konečných diferencí je založena na tom, že se v řešené oblasti vytvoří konečný počet bodů a to je takzvaná síť. Následně stačí v každém bodě vyřešit diferenciální rovnice. Je možná na kraji sítě použít okrajové podmínky a to tak, že derivace, které se v nich nacházejí, se nahradí diferenčními podíly.



**Obrázek 3.4:** Metoda sítí [12]

#### 3.5.2 Variační metody

Fyzikální úlohu lze mnohdy popsat kromě diferenciálních rovnic také za pomoci minimálních principů. Jedná se o diferenciální rovnice, kdy integrál ukazující potenciální energii nabývá minima. Mezi nejčastější variační metody patří:

- Ritzova metoda

- Galerkinova metoda

Obě dvě metody mají velký význam v Metodě konečných prvků 3.5.3.

### **3.5.3 Metoda konečných prvků**

Jedná se o numerickou metodu sloužící k simulaci průběhů napětí, deformací i proudění tekutin na vytvořeném modelu. Jejím principem je zjednodušená diskretizace spojitého kontinua do určitého, konečného počtu prvků. Počítané parametry jsou určovány v jednotlivých uzlech [8] Výhody této metody jsou

- algoritmus je nezávislý na počítané oblasti, jelikož se může přizpůsobit dané oblasti
- vysoký řád konvergence
- okrajové podmínky lze snadno vyjádřit

### **3.5.4 Metoda vážených reziduí**

Úkolem metody vážených reziduí není nalézt přesné řešení, ale omezit a redukovat diferenciální rovnici a okrajové podmínky na soustavu algebraických rovnic.



## 4 Vlatní řešení

### 4.1 Zájmová lokalita

#### 4.1.1 Potok Křetínka

Potok Křetínka spadá do povodí Moravy, do závodu Dyje, pod číslo hydrologického pořadí 4-15-02-035. Potok pramení u obce Stašov na severovýchodě Čech. Původní jméno potoka Křetínka je Svitavice [2]. Délka celého toku je 29 km a plocha povodí je 129 km<sup>2</sup>. Má 47 přítoků z toho je 26 pravostranných a 21 levostranných. Průměrný roční průtok na toku je v hlásném profilu pod přehradou 0,644 m<sup>3</sup>/s s výškou hladiny 37 cm [7].



Obrázek 4.1: Potok Křetínka nad nádrží [14]

#### 4.1.2 Nádrž Letovice

Vodní nádrž Letovice, občas nazývána Křetínka leží asi kilometr proti proudu od obce Letovice a v blízkosti obcí Křetín, Vranová, Dolní poříčí a Lazinov (viz 4.2). Obec Lazinov je nově vybudovaná obec, jelikož původní Lazinov leží pod hladinou nádrže. Vodní nádrž Letovice leží na potoku Křetínka v říčním km 2,293.



Obrázek 4.2: Situace [3]

Nádrž je v provozu od roku 1976, přičemž se začala stavět v roce 1972 po rozhodnutí, které přišlo v roce 1969. Hlavním důvodem výstavby bylo navýšení průtoků v řece Svitavě, která měla nedostatek vody z důvodu velkého čerpání podzemní vody v oblasti Březová, která se čerpá a následně upravuje na pitnou vodu pro město Brno.

Nádrž má na délku 4,7 km s celkovým objemem 11,6 mil m<sup>3</sup> vody.

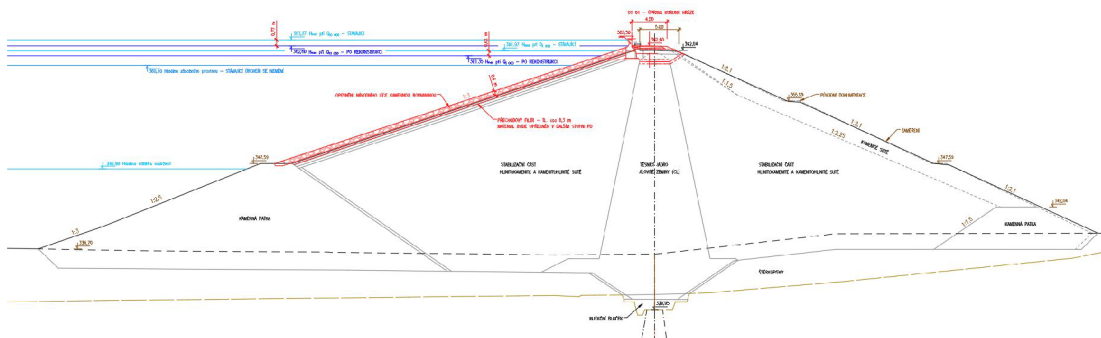
#### Účel díla:

- kompenzační nalepšení průtoků v řece Svitavě
- výroba elektrické energie (65 kW)
- rekreace
- sportovní rybolov
- protipovodňová ochrana
- zajištění denních průtoků

#### 4.1.3 Hráz

Hráz je zemní nehomogenní, sypaná z kamenitohlinité sutě se středním jílovitým těsnicím jádrem. Těsnicí jádro je zavázáno do podloží betonovým injekčním bločkem. utěsnění podloží hráze je provedeno jednořadou patrovou clonou v ose hráze [7]. Hráz má lichoběžníkový profil ve sklonu na vzdušném líci 1 : 2,25 a na návodním líci 1 : 3. Vzdušný líc je zatravněn po celé ploše (viz obrázek 4.5). Návodní svah je opevněn 25 cm vrstvou mastixem prolévaného makadamu na 30 cm drtě frakce 2-4 mm a 30 cm přírodního šterkopískového filtru (viz obrázek 4.4). Hráz je přímá a 126 m dlouhá. Paty hráze, jak vzdušná, tak i návodní, jsou opatřeny kamennými patkami.





Obrázek 4.3: Řez hrází [6]



Obrázek 4.4: Návodní líc [14]



Obrázek 4.5: Vzdušný líc [14]

#### 4.1.4 Odběrný objekt a spodní výpusti

Před bezpečnostním přelivem se nachází lávka, která vede do odběrného objektu (viz obrázek 4.6). Odběrný objekt je věžový, výšky 31,50 m. Ve spodní části je vtok uložený na betonových stoličkách do dvou potrubí DN 700. K ochraně a provozu potrubí slouží česlicový rám a tři uzávěry

- stavidlové tabule - návodní uzávěr
- hradidla s těsněním - návodní provozní uzávěr
- kuželové uzávěry - provozní regulační uzávěr

Obě potrubí vedou štolou do malé vodní elektrárny (viz obrázek 4.7), která je umístěna pod hrází, kde jsou osazeny tři Francisovy turbíny o celkovém výkonu 65 kW.





Obrázek 4.6: Odběrný objekt [14]



Obrázek 4.7: Malá vodní elektrárna [14]

#### 4.1.5 Stávající bezpečnostní přeliv

Bezpečnostní přeliv je boční a je umístěn v pravém břehu (viz obrázek 4.8). Přeliv je dlouhý 26,60 m a je tvořen půlkruhovou přelivnou hranou a průměru 1,20 m z kamenných bloků (viz obrázek 4.9). Kóta přelivné hrany je 360,10 m n. m. Stěny přelivu jsou betonové ve sklonu asi 6 : 1. Podélný sklon ve spadišti je přibližně 4,6 % a jeho šířka je okolo 4,00 m a délka 29,65 m. Nad koncem spadiště je železobetonový most sloužící k přejezdu na korunu hráze se šířkou 4,50 m. Spadiště má přibližný sklon 40,00 %, ale ten je v průběhu proměnlivý s délkou 89,90 m končící vývarem (viz obrázek 4.10).



Obrázek 4.8: Stávající bezpečnostní přeliv [14]





Obrázek 4.9: Detail hrany přelivu [14]



Obrázek 4.10: Spadiště [14]

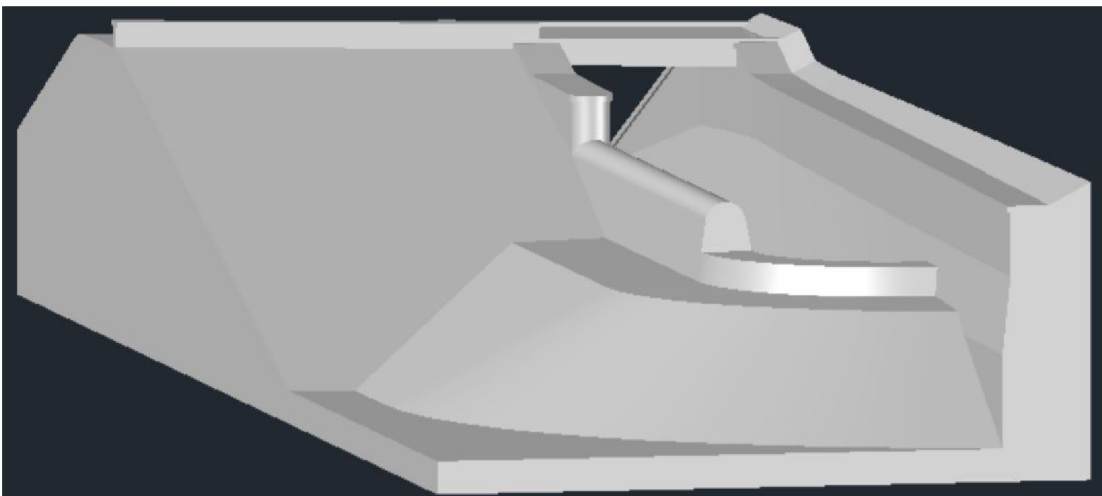
#### 4.1.6 Rekonstrukce VD

- SO 01 - koruna hráze - zvýšení těsnícího jádra, propojení s vlnolamem a navýšení koruny hráze
- SO 02 - opevnění návodního svahu hráze - opevnění kamennou rovnatinou z lomového kamene
- SO 03 - bezpečnostní přeliv a spadiště - viz 4.1.8
- SO 04 - skluz - rozšíření
- SO 05 - přemostění skluzu - nové přemostění z důvodu rozšíření spadiště a skluzu
- SO 06 - vývar - stavba nového vývaru
- SO 07 - opevnění odpadního koryta za vývarem - opevnění 28 m koryta
- SO 08 - systém TBD - vybavení VD pro měření TBD
- SO 09 - ostatní úpravy - úpravy pro větší bezpečnost VD
- SO 10 - opevnění koryta Křetíanky pod VD - úprava a opevnění koryta až po most v Letovicích

#### 4.1.7 Dočasný bezpečnostní přeliv

Dočasný přeliv je úprava stávajícího přelivu, tak aby byl kapacitně schopný plnit požadavky snížení maximální hladiny během rekonstrukce a hladina v nádrži nemusela být o tolik dočasně snížena. Touto problematikou se zabývá diplomová práce [12], která navrhuje dvě řešení:

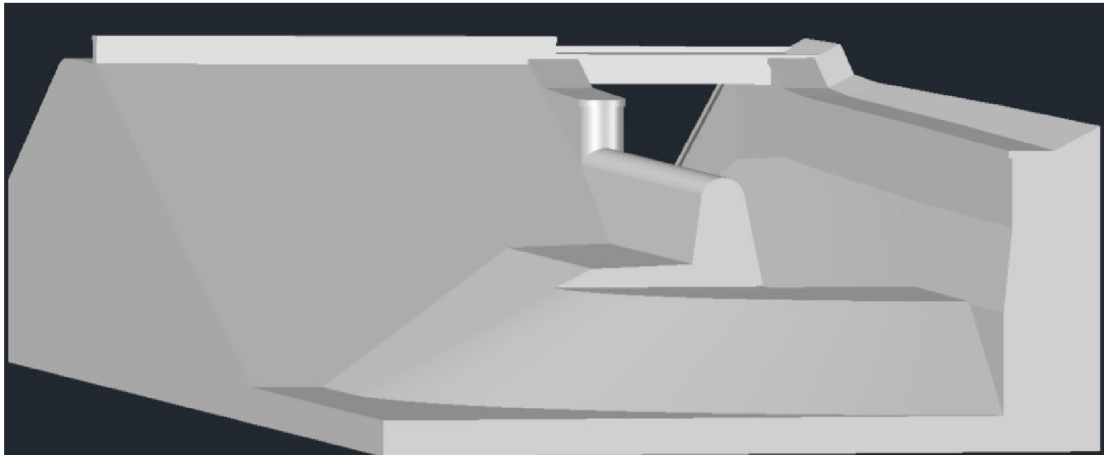
- první řešení - snížení přední části přelivné hrany na kótu 358,60 m n. m.



Obrázek 4.11: Dočasný BP varianta 1 [12]

- druhé řešení - odstranění přední části přelivné hrany i s částí podkladu až na kótu 357,10 m n. m.





**Obrázek 4.12:** Dočasný BP varianta 2 [12]

Výsledkem jednotlivých variant je tabulka, které je vyhotovena pro dva různé transformované průtoky  $Q_{100}^T = 45 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $Q_{200}^T = 60 \text{ m}^3/\text{s}$ . Výsledkem jsou snížené hladiny v nádrži.

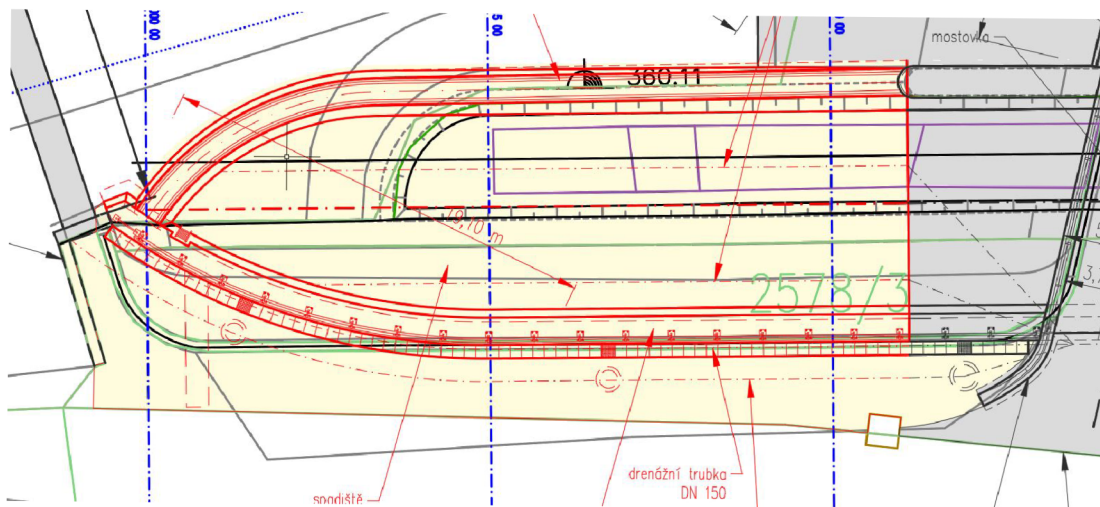
Název	H [m n. m.] pro $Q_{100}^T$	H [m n. m.] pro $Q_{200}^T$
stávající stav	360,84	360,97
varianta 1	360,66	361,13
varianta 2	360,33	360,83

**Tabulka 4.1:** Porovnání hodnot [12]

V závěru diplomové práce [12] je doplněno, že ochrana pomocí snížení bezpečnostního přelivu není dostatečná a že je nutné mít po dobu rekonstrukce sníženou hladinu vody v nádrži.

#### 4.1.8 Plánovaný bezpečnostní přeliv

Nový bezpečnostní přeliv bude vybudován na místě původního a bude mít šířku minimálně 8,5 m, to je asi o 4,5 m širší než přeliv stávající. Rozšíření bude směrem k silnici, tedy bude umístěn do stávajícího skalního masivu, který bude odtěžen a spolu s ním bude zbourána dosavadní opěrná stěna. Skalní svah bude sešikmen do sklonu 5 : 1. Dále bude bezpečnostní přeliv rozšířen i délkově a to na délku přelivné hrany 35 m, to je o 8,4 m delší než stávající přelivná hrana. Poloměr a tvar přelivné hrany zůstane stejný jako u stávajícího přelivu, tedy půlkruh s poloměrem 0,60 m. Taktéž výška přelivné hrany zůstane 360,10 m n. m. Zeď přelivu se nebude dělat celá nová, ale zůstane přímá část stávajícího bezpečnostního přelivu a to o délce 18 m, takže se bude přistavovat 17 m. Sklon zdi přelivu zůstane stejný asi 6 : 1. Stávající přelivná hrana, která nebude zbourána, tak bude sanována. Způsob sanace bude dále blíže specifikován na základě odebrání vzorků, ale zatím se předpokládá odebrání 30 cm poškozeného betonu na lící zdi, dále hloubková penetrace a následné dodělaní odebrané stávající konstrukce. Nová část opravené zdi bude připevněna vlepenými trny. Kamenný obklad přelivné hrany bude rozebrán a očištěn a následně znovu osazen. Spadiště bude vybouráno a v místě nezbouraného přelivu bude spadiště vybouráno až k patě zdi. Sklon nového spadiště zůstane stejný. Spadiště a nově vybudovaná přelivná hrana budou založeny na skalním masivu, na kterém bude vyrovnávací a podkladní vrstva betonu a bude tvořit jeden celek bez dilatací. V místě připojení přelivné hrany a na hraně spadiště budou umístěny smykové trny, které umožní vodorovný pohyb. Nová opěrná zeď bude ve spodní části ve sklonu 5 : 1 až 6 : 1 a v horní části bude svislá. Nad ní bude římsa ze železobetonu. Šířka opěrné zdi je 1,55 m a v horní části 1,00 m. Skluz bude délky 8,10 m a šířky 8,00 - 8,50 m. Sklon skluzu bude stejný jako u skluzu stávajícího.



Obrázek 4.13: Půdorys bezpečnostního přelivu [6]

## 4.2 Prostorový model - SketchUp

### 4.2.1 O programu

SketchUp je software pro tvorbu 3D modelů, vyvíjený společností Trimble, navržený pro profesionální architekty, stavební a strojní inženýry, ale i například pro filmové tvůrce a vývojáře počítačových her. Tento program umožňuje nejen vytvářet 3D objekty a texturovat jejich povrch, ale umožňuje přidat GeoUmístění kdekoli na Zemi prostřednictvím online map a propojení se softwarem GIS [5]. SketchUp byl zvolen, jelikož je to program, ve kterém se pracuje intuitivně a jednoduše, ale přesto je přesný na milimetry a jednotlivá zjednodušení v něm lze upravovat.



Obrázek 4.14: SketchUp [4]

#### 4.2.2 Postup

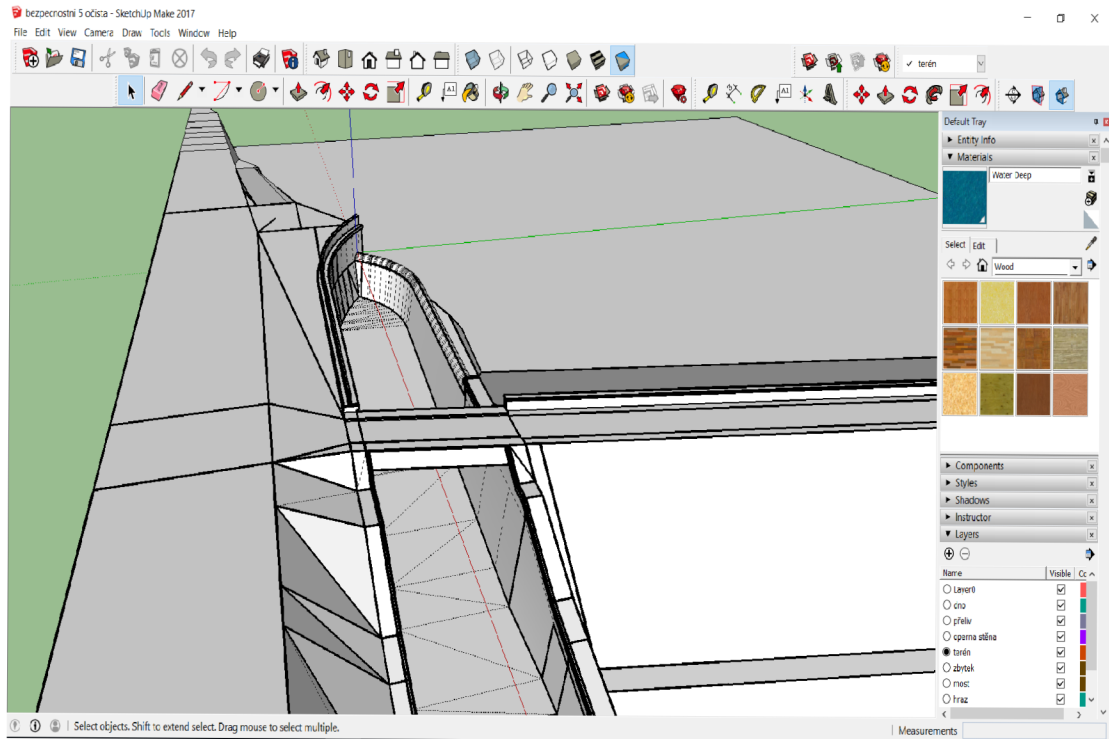
Před začátkem modelování je vhodné si nejprve podložit protor půdorysem, ať se člověku lépe orientuje. Bohužel podložení výkresem umožňuje pouze placená verze SketchUp Pro. I přes tuto nevýhodu je použití SketUpu výhodné, jelikož je práce s ním snadná, oproti vytváření 3D modelu v AutoCADu a mnohem přesnější než např. v Blenderu, který se neřadí mezi technické programy. Taktéž je možné vytvářet model v samotném Flow 3D, ale ten je určený převážně pro snadné objekty.

Pro snadnější práci je výhodné si jednotlivý objekt rozdělit na dílčí objekty a ty rýsovat zvlášť. Samotný SketchUp má možnost si jednotlivé hladiny vypínat, stejně jako v AutoCADu a tak napojování nečiní problém.

Jednotlivé rozdělení objektů:

- přeliv
- opěrná zeď
- dno
- most
- spadiště - část bez přelivné hrany
- hráz
- okolní terén

Jako podklad pro prostorový model sloužil projekt výkresové dokumentace pro územní rozhodnutí [6].

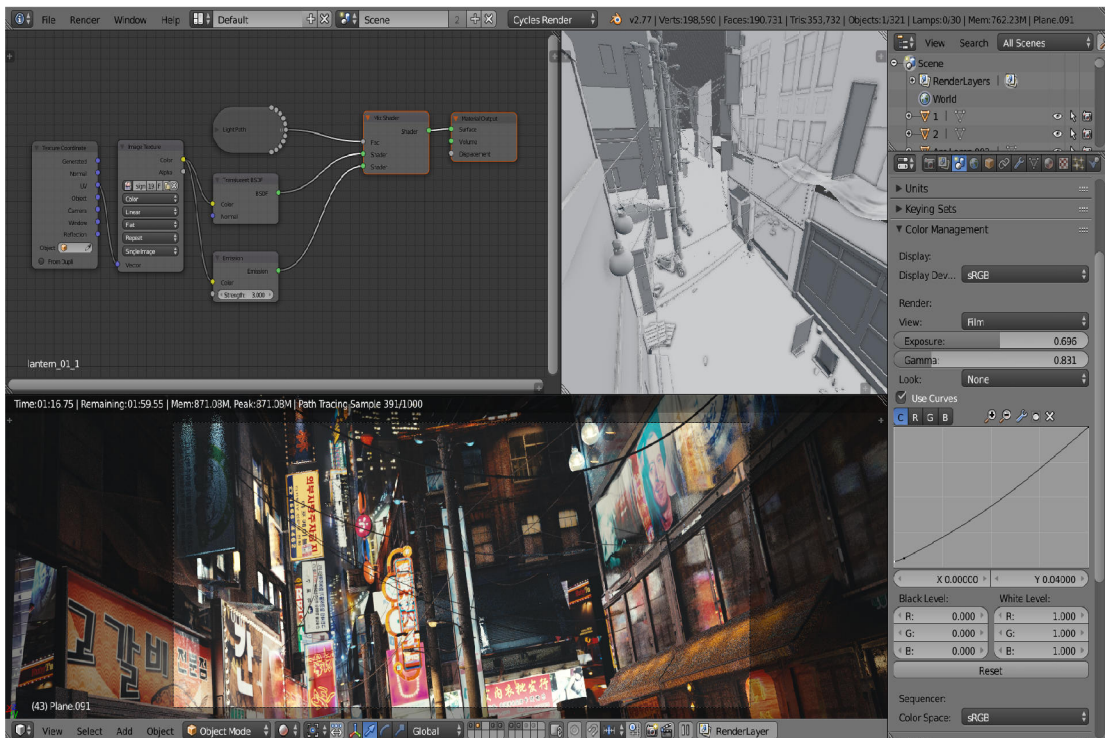


Obrázek 4.15: SketchUp

## 4.3 Úprava modelu - Blender

### 4.3.1 O programu

Blender je program pro 3D modelování, který je zaměřen spíše na vytváření her a animací, než-li na inženýrskou činnost. Program byl nicméně využit na konvertování výstupu modelu z formátu „dae” (v tomto druhu lze exportovat 3D model ze SketchUpu) do formátu „stl” (druh, který potřebuje Flow 3D). Dále byl program Blender využit na opravu modelu (viz 4.4.4)



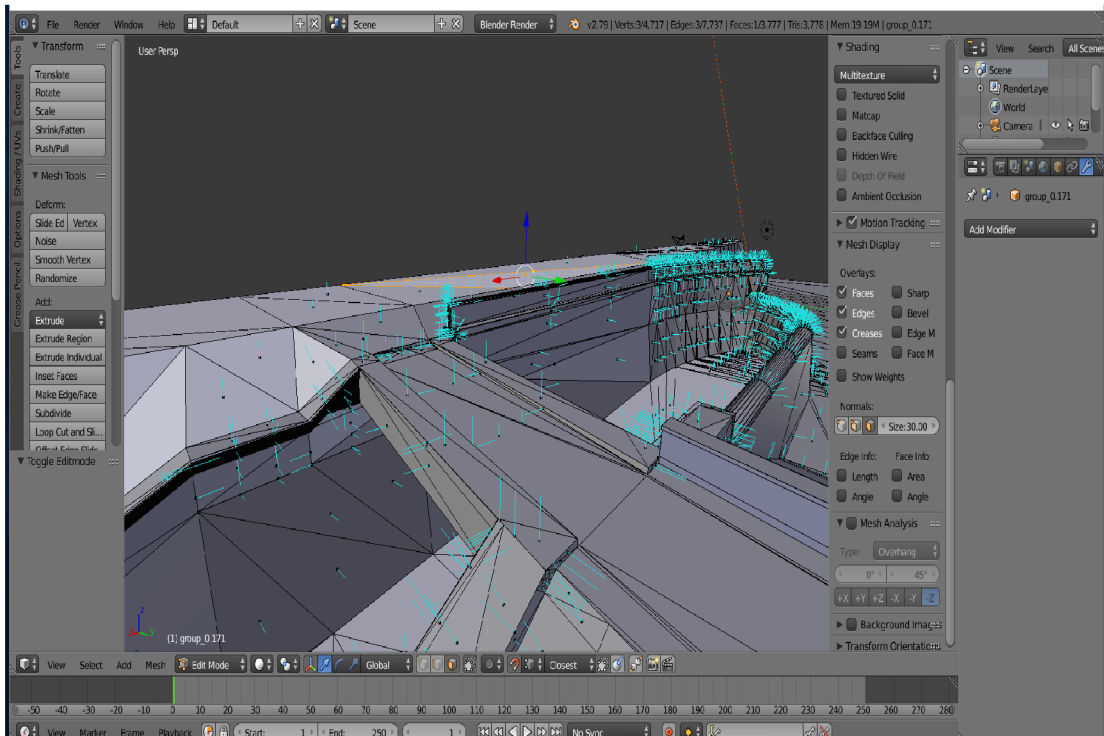
Obrázek 4.16: Blender [1]

### 4.3.2 Postup opravy modelu

Každá plocha, ze které je udělán model bezpečnostního přelivu, má rubovou a lícovou stranu. A pokud jsou tyto plochy špatně otočeny, tak je potřeba je opravit obrácením. Opravu je možno udělat automatizovaně, dle předpokladů, které udělá samotný program Blender, ale ne vždy to bývá vhodná metoda opravy, stejně jako v tomto případě.

Pokud je nutné dělat opravy ručně, tak se musí zahájit editací modelu a zobrazit normály. Normály představují čáry vystupující vždy z těžiště lícové strany. Následně je potřeba najít všechny normály, které směřují špatným směrem a postupně je všechny otočit. Pokud normála vystupuje na obě dvě strany, tak jsou přítomny dvě plochy na stejném místě a je potřeba jednu vymazat. V modelu k této diplomové práci byly opravy udělány ručně z důvodu špatné automatické opravy.





Obrázek 4.17: Blender - oprava normál

## 4.4 Numerický model - Flow 3D

### 4.4.1 Zjednodušující předpoklady

Pro tento případ numerického modelu bylo určeno několik zjednodušujících předpokladů, některé z důvodu zjednodušení celkové úlohy, některé z důvodu špatně postihnutečných podmínek. Předpoklad:

- na celý úsek je použita jednotná drsnost
- proudění je ustálené, výpočet v čase slouží pouze k ustálení výsledků
- kapalina je nestlačitelná
- neuvažujeme s provzdušněním proudu
- děj je izotermický

### 4.4.2 O programu

Flow 3D je výpočetní program na řešení dynamiky kapalin pomocí numerických metod.

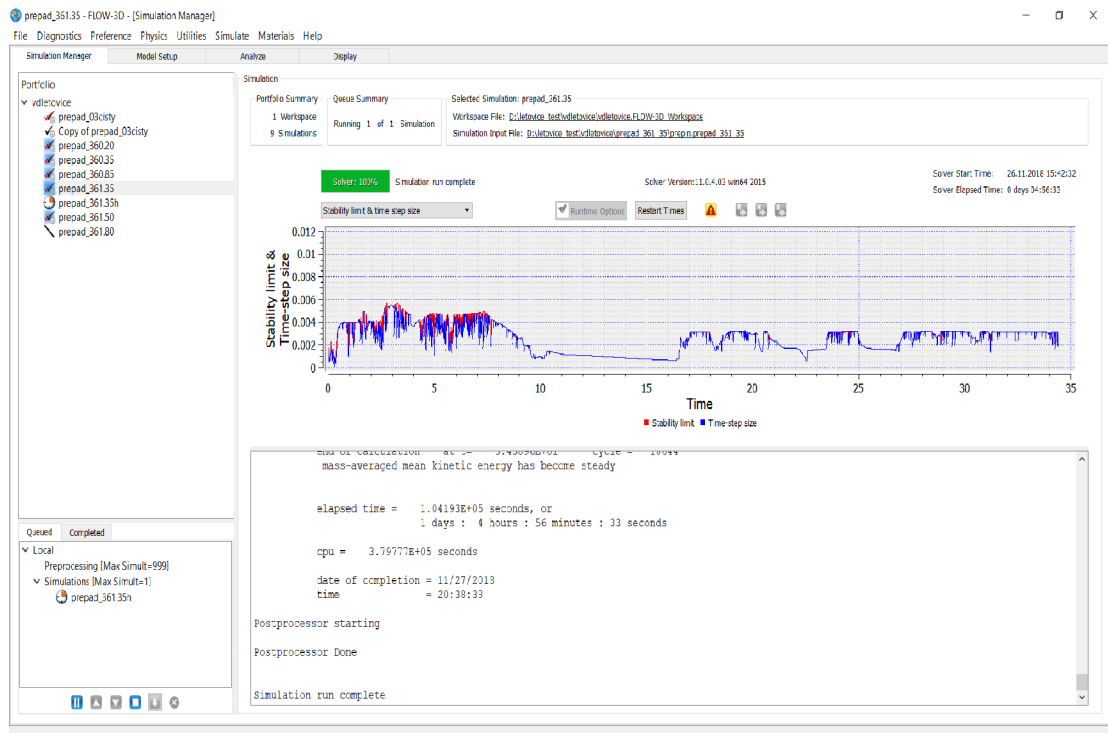
### 4.4.3 Nastavení

Flow 3D má čtyři základní panely nastavení

- Simulation Manager
- Model Setup
- Analyze
- Display

## Simulation Manager

V tomto panelu se v levé části (viz obrázek 4.18) zakládají nová pracovní prostředí (workspace), ve kterých pak jsou jednotlivé simulace. Zde je také možné u jednotlivých simulací spustit výpočet, popřípadě je pozastavit nebo ukončit. Ve zbývající pravé části (viz obrázek 4.18) lze pozovat právě probíhající výpočet a jeho postup. Ve střední části je graf, který ukazuje rychlost výpočtu a který lze zaměnit například za graf ukazující vyplnění prostoru modelu vodou či jiný, který ukazuje změny v čase v průběhu výpočtu.



Obrázek 4.18: Simulation Manager

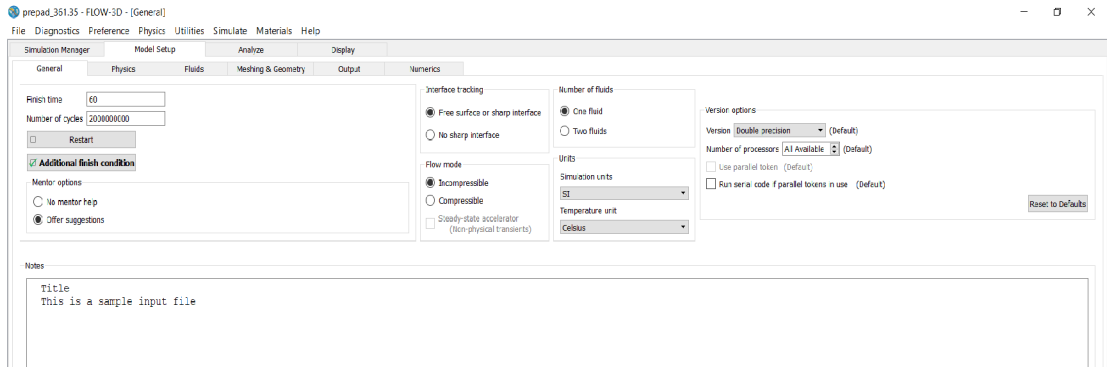
## Model Setup

V tomto panelu je možnost výběru z dalších šesti panelů:

- General
- Physics
- Fluids
- Meshing & Geometry
- Output
- Numeric

### General

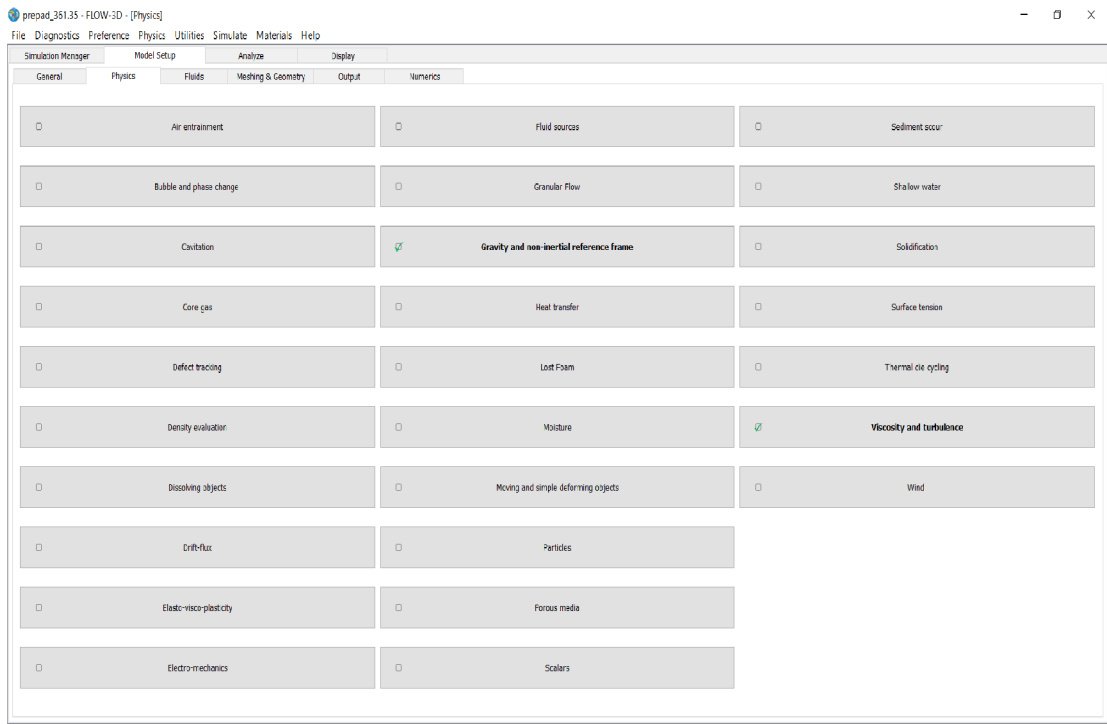
Zde nalezneme základní nastavení jako délka simulace, počet kapalin ve výpočtu, jednotky, počet procesorů použitých k výpočtům atd... Ve spodní části je prostor pro poznámky.



Obrázek 4.19: General

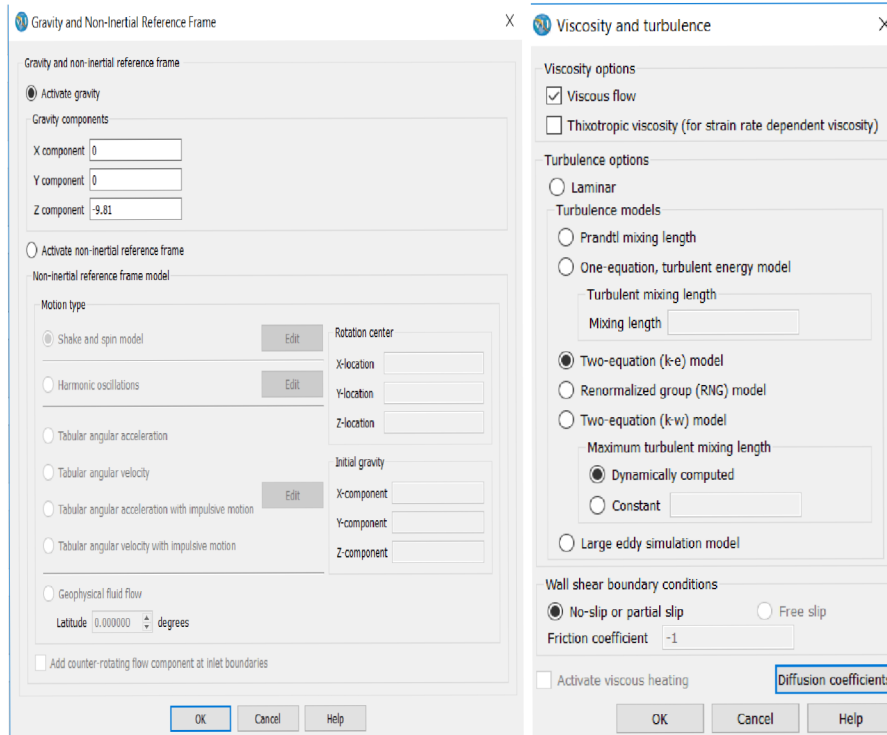
## Physics

Panel je určený k nastavení jednotlivých fyzikálních vlastností. V tomto případě pro daný model bylo využito nastavení pro gravitaci, turbulenci a viskozitu (viz obrázek 4.21)



Obrázek 4.20: Physics

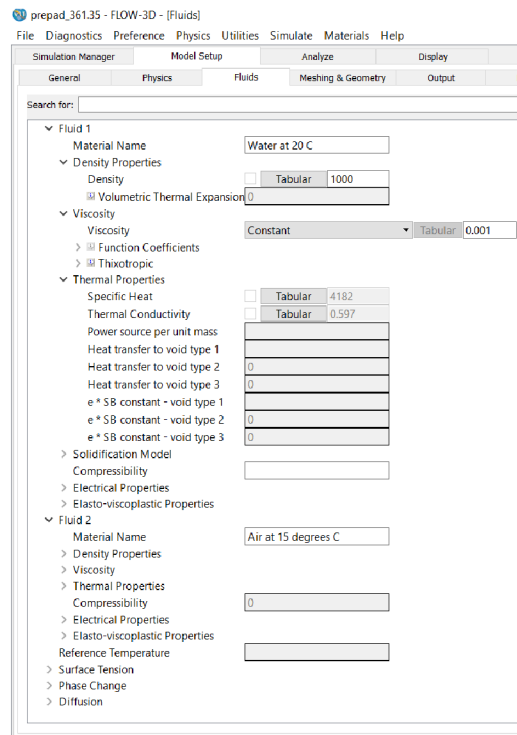




Obrázek 4.21: Physics - jednotlivá nastavení

## Fluids

V panelu Fluids se nastavují jednotlivé kapaliny. Pro tento výpočet byla nastavena voda o 20 °C.



Obrázek 4.22: Fluids

### Meshing & Geometry

V této části nastavení se nastavuje všechno co se týče modelu, jeho rozdělení do výpočetní sítě a okrajových podmínek. V úplně levé části najdeme ikony sloužící k zapínání a vypínání jednotlivých oken pro další nastavení.

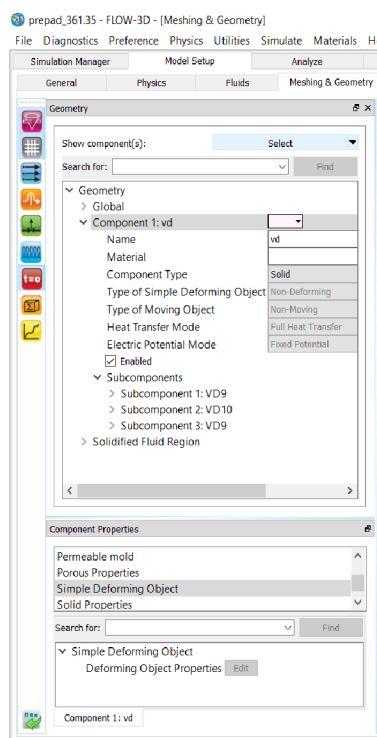


Obrázek 4.23: Záložky v Meshing & Geometry

Dále v levé části najdeme okno Geometry, kde můžeme pojmenovat jednotlivé modely a pracovat s nimi. Pod ním je okno Komponent properties a v něm je nejdůležitější nastavení drsnosti. Ta se zadává pomocí hodnoty, která udává drsnost od Nikuradseho, kterou lze přepočítat z u nás klasičtější drsnosti dle Manninga podle [8]:

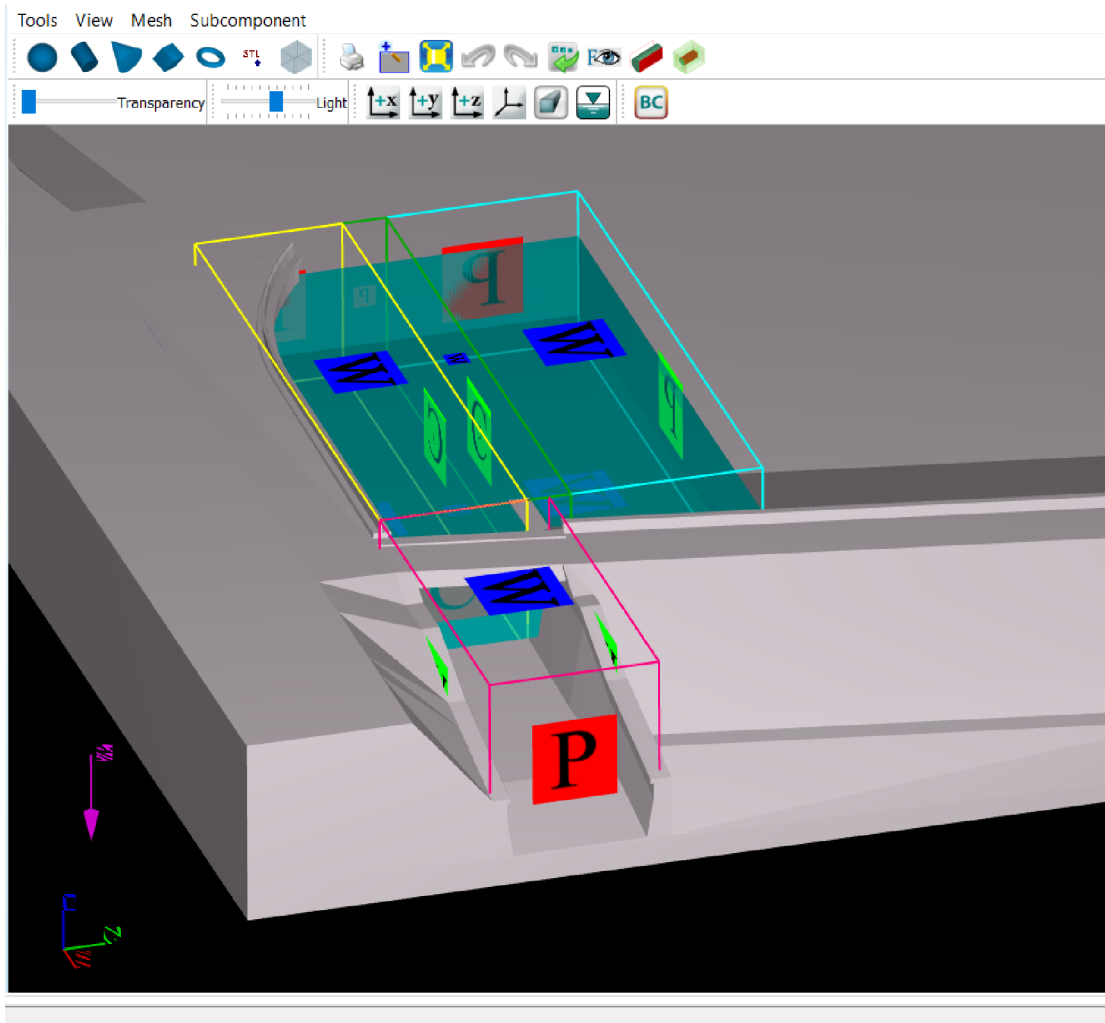
$$k \approx \left( \frac{n}{0,0389} \right)^6, \quad (4.1)$$

$n$  drsnost dle Manninga [-].



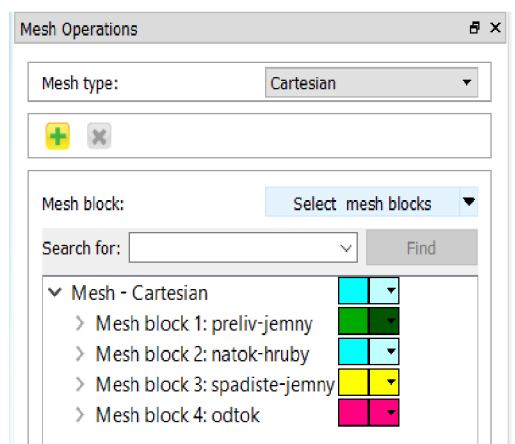
**Obrázek 4.24:** Levá část nastavení v Meshing & Geometry

Střední část panelu je určena k možnosti sledování modelu a také jeho úpravám, popřípadě k vytváření modelu. K vytváření modelu jsou zde jednoduché geometrické tvary, které lze najít na panelu zobrazením na obrázku 4.25, také zde lze najít pomocný program, který zobrazuje přetvořený model určený k výpočtu. Více na 4.4.4.



Obrázek 4.25: Levá část nastavení v Meshing & Geometry

Pravá část je nejdůležitější částí v Meshing & Geometry, protože se v ní určuje velikost výpočtové sítě a velikost jednotlivých dílků. Pro tento výpočet byly zvoleny čtyři různé výpočtové oblasti (tzv mesh). Rozdělení je nezbytné z důvodů různé velikosti výpočtové sítě. Toto rozdělení následně z velké části určuje dobu, po kterou bude pracovat výpočet, jelikož ne všude je potřeba mít stejně jemnou výpočtovou síť.



**Obrázek 4.26:** Rozdělení na jednotlivé meshe

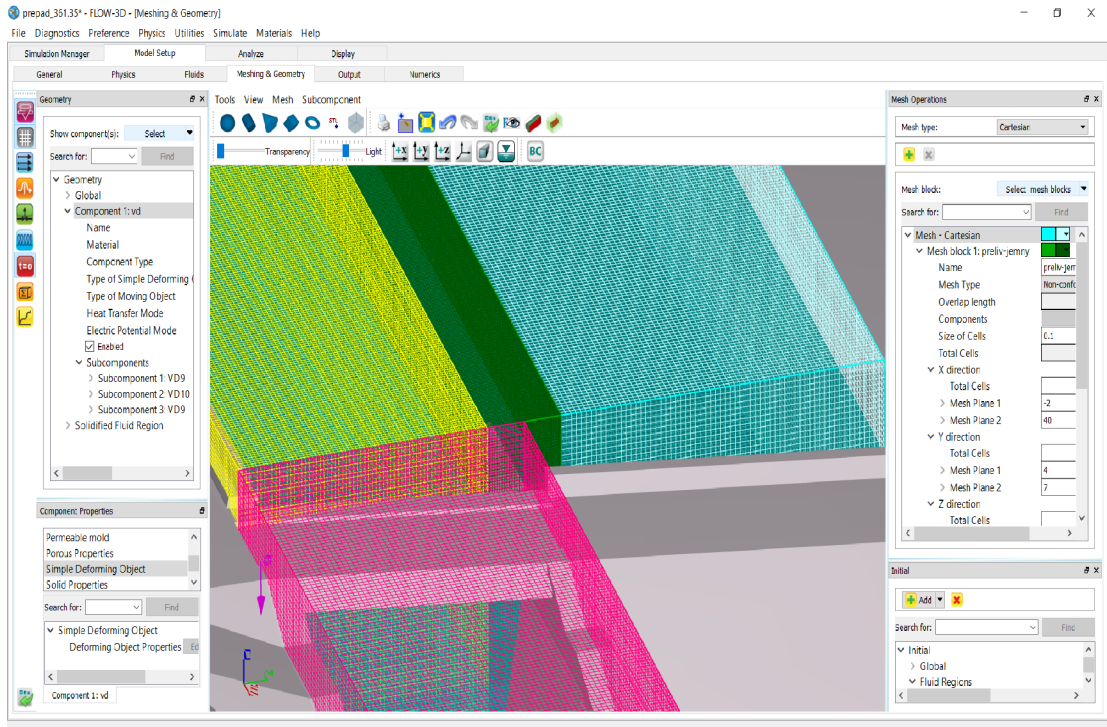
Při rozkliknutí jednotlivých rozbalovacích nabídek pro každý mesh můžeme zadávat jeho velikost a umístění a také jeho jemnost a umístění. Umístění se určuje podle souřadnicového systému a pro co největší zjednodušení je dobré si vhodně určit počátek tohoto systému. Zde je určen na hraně přelivné hrany na jejím konci ve styku s opěrnou zdí. Na tomto místě se rovnou určuje i jemnost výpočtové sítě. Velikost lze zadat dvojnásobným způsobem a to buď celkovým počtem jednotlivých kostek nebo maximální velikostí kostky.

- Nátok - část před přepadem, v nádrži
- Přepad - větší část přepadu
- Spadiště - část přelivu a spadiště v délce přelivu
- Odtok - spadiště za přelivem a kousek skluzu

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Velikost buňky [m]	celkový počet v tis.
Nátok	42	13	11	0,20	750,8
Přeliv	42	3	11	0,10	1 386,0
Spadiště	42	10	11	0,15	1 369,5
Odtok	25	11,5	12,5	0,20	456,7

**Tabulka 4.2:** Velikost meshe

Na obrázku 4.27 lze vidět detail rozdělení na jednotlivé meshe a také je tam zobrazena výpočtová síť.



Obrázek 4.27: Ukázka velikost a rozdělení meshů

Na stejném místě lze ještě nastavit okrajové podmínky, které se nastavují pro každý mesh zvlášť vždy ze všech šesti stran. Použité okrajové podmínky:

- Continuitive (C) - tato podmínka je použita na rozhraní jednotlivých meshů, kde na hranici nastaví nulový gradient
- Wall (W) - použita na dno a strany, tam kam se nedostane voda. Také použita jako horní okrajová podmínka. I když úplně neodpovídá skutečnosti, tak nad hladinou vody je vždy dost místa na volný pohyb vody nad hladinou.
- Specified pressure (P) - použita jako podmínka na přítok a odtok, který je zadán pomocí tlakové výšky od hrany přelivu

	Xmax	Xmin	Ymax	Ymin	Zmax	Zmin
Nátok	W	P	C	P	W	W
Přeliv	C	P	C	C	W	W
Spadiště	C	P	W	C	W	W
Odtok	P	C	W	W	W	W

Tabulka 4.3: Okrajové podmínky

Poslední částí, kterou bylo v tomto panelu potřeba nastavit, je počáteční umístění kapaliny a její velikost. Není nutností ji nastavovat, ale velmi to uspíší výpočet, jelikož se nemusí čekat, než se celý model naplní vodou. Nastavení se najde v části Initial, kterou lze zapnout v 4.23 ikonou s nápisem  $t = 0$ . V této části zadám velikost a umístění stejně jako při nastavování meshu.

### Output

V tomto panelu lze nastavit, která data chceme mít na výstupu. Výstupem pak jsou rychlost, poloha hladiny...

## Numeric

Na tomto panelu je vhodné zanechat původní nastavení

## Analyze

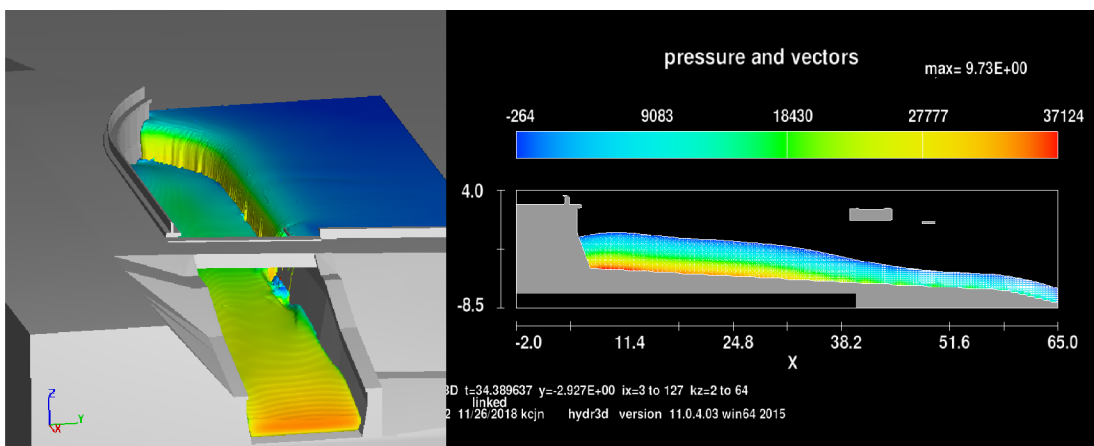
V tomto panelu nastavujeme jaké výsledky chceme vidět. Lze tu nastavit umístění a formu výstupů. Možnosti výsledků, které byly použity jsou tyto:

- 2D - pro řezy
- 3D - pro celkový pohled
- Text Output - jako výstup pro další zpracování

Vhodné je také výsledky zpracovat v programu FlowSight, který je součástí Flow 3D a je vhodnější na zobrazování výsledků.

## Display

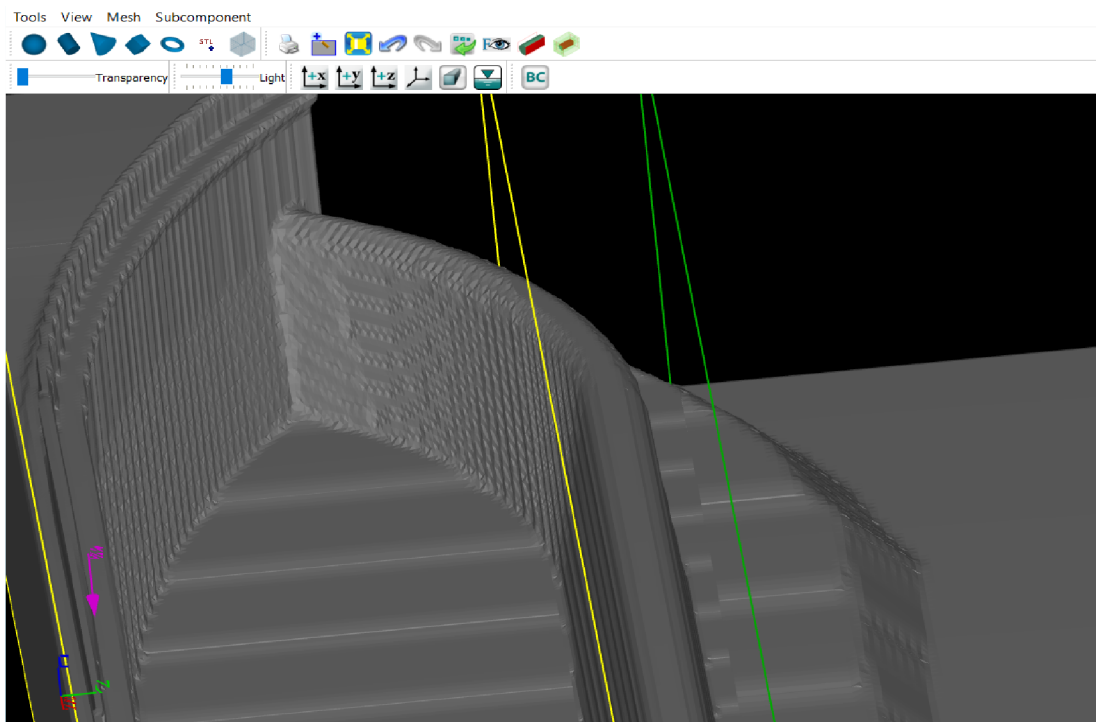
Tento panel slouží pro samotné zobrazování výsledků, který jsme si předvolili v 4.4.3



Obrázek 4.28: Ukázka 3D a 2D výsledku

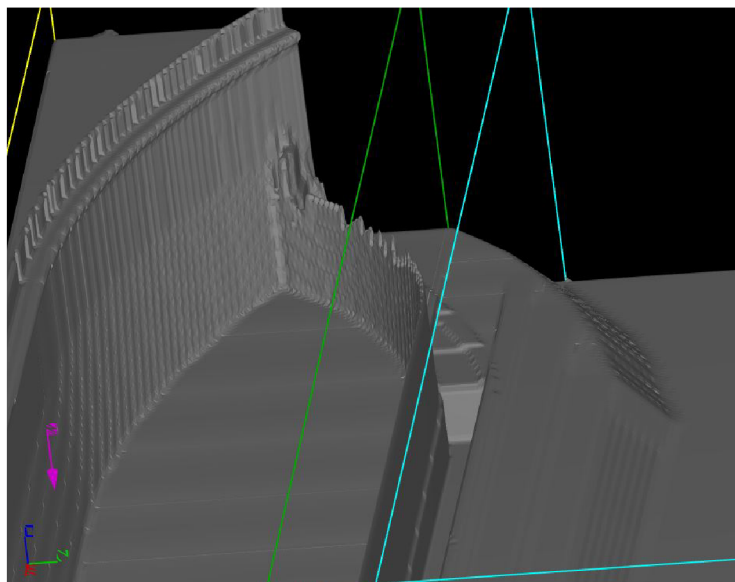
### 4.4.4 FAVOR

Fractional Area-Volume Obstacle Representation je metoda založena na konceptu plošných a objemových frakcí na pravoúhlé strukturované výpočetní síti. Hodnoty plošných a objemových frakcí jsou závislé na hustotě výpočetní sítě, respektive na velikosti výpočetní buňky. Při preprocessingu výpočtu program nejdříve zjišťuje, které rohy výpočetní buňky leží uvnitř geometrie objektu a které ne. Pokud všechny rohy výpočetní buňky leží uvnitř geometrie objektu, pak je buňka brána ve výpočtu jako geometrie objektu. Pokud všechny rohy výpočetní buňky leží vně geometrie, pak je buňka brána ve výpočtu jako volný prostor pro proudění kapaliny. Problém nastává v momentě, kdy část buňky leží vně a část uvnitř geometrie. V tomto případě program hledá průsečíky stěn buňky s geometrií tělesa a tyto body následně spojí rovinnou plochou. To znamená, že ve 2D rovině dojde k propojení dvou průsečíků přímkou. Z linearizace tělesa je patrné, že v případě, kdy je geometrie tělesa zakřivená v rozmezí jedné buňky, dojde ke zjednodušení tohoto zakřivení, a tedy i k určité chybě výpočtu. Je tedy nezbytné uvědomit si před zahájením výpočtu potřebnou míru zahuštění výpočetní sítě ve složitějších částech prostorového modelu [12].



**Obrázek 4.29:** Ukázka modelu po použití metody Favor

Před prvním výpočtem na daném modelu je vhodné se nejprve podívat jak daný model vypadá, jelikož lze tímto snadno zjistit případné chyby, jako třeba špatně udělaný krok 4.3.2, který by mohl mít za následky například děravý model, nebo naopak model někde ucpaný. Chybu lze také vidět následně až ve výsledcích při pohledu v 3D, jestli model někde teče nebo jestli se voda chová tak jak by neměla.



**Obrázek 4.30:** Ukázka špatného modelu ve Favoru



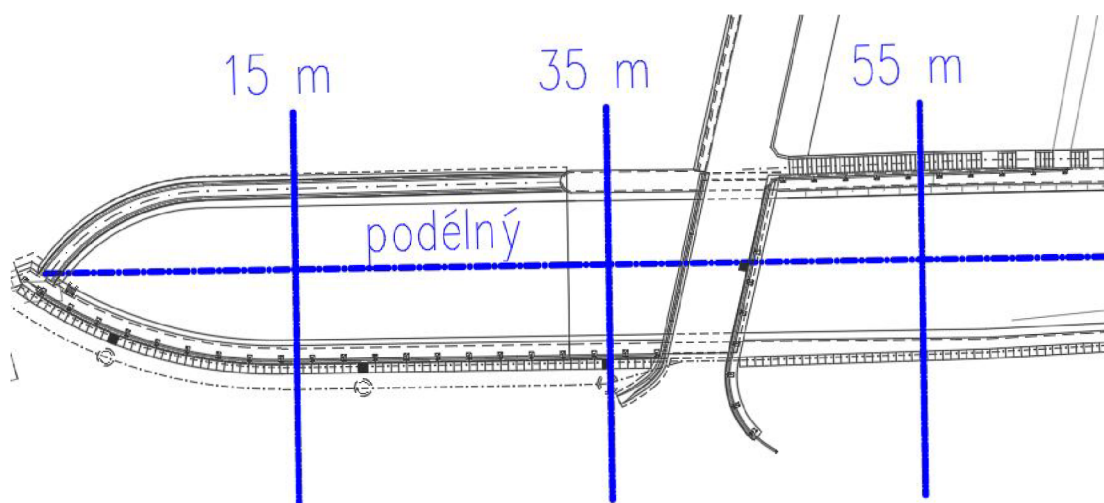
#### 4.4.5 Výpočty

Úkolem výpočtů bylo odvodit měrnou křivku pro bezpečnostní přeliv. Způsob odvozování byl následující:

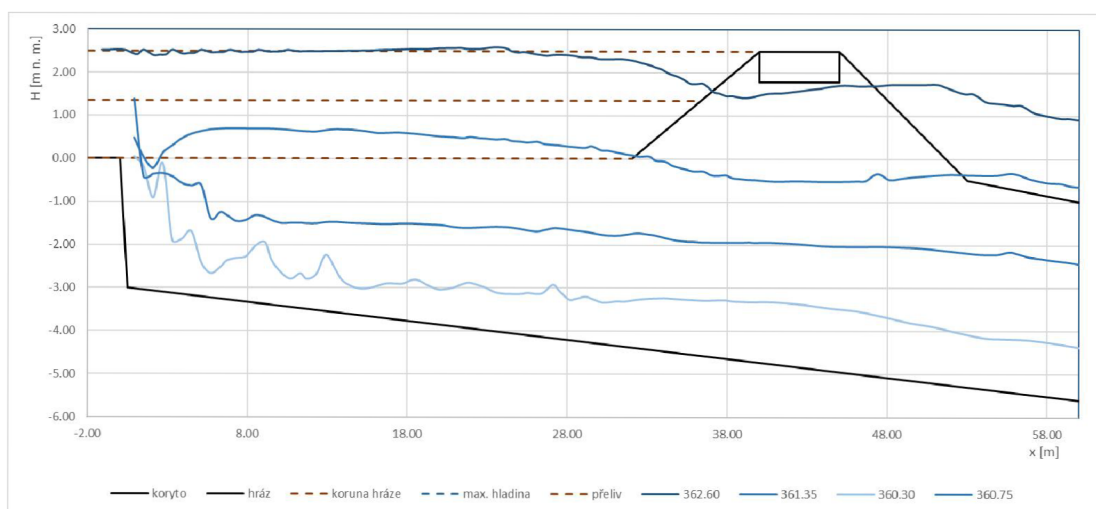
- Udělat výpočet pro danou hladinu vody v nádrži a nechat ho ustálit. Výpočtů udělat dostatečné množství, aby měrná křivka byla plynulá a měla rozsah od výšky přlivné hrany až po korunu hráze.
- Z Flow 3D exportovat výsledky zustáleného výpočtu do textového dokumentu (.txt).
- Textový dokument expotrovat do Excelu (.xls).
- V Exelu přepočítat bodové rychlosti na průtoky.
- Vytvořit měrnou křivku bezpečnostního přelivu na vodním díle Letovice

## 5 Výsledky modelování

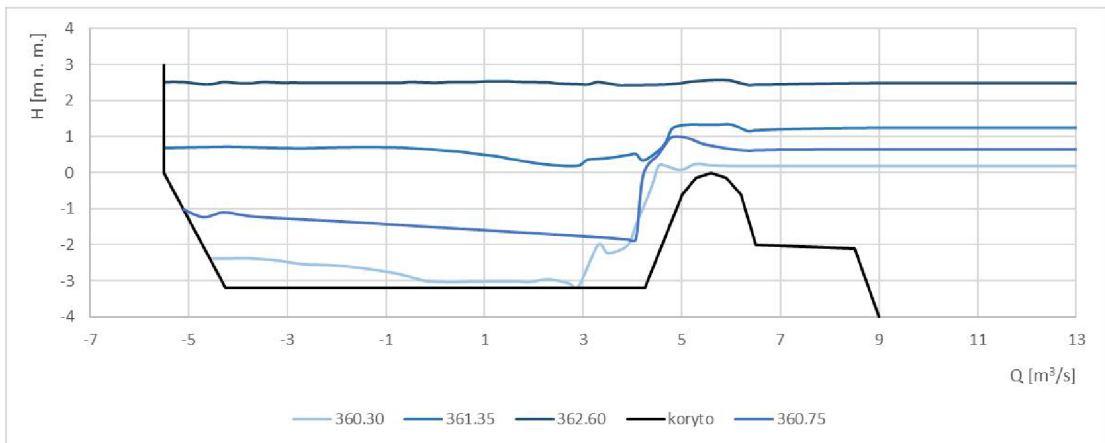
Jako výstup jsou vyhotoveny čtyři řezy ve kterých jsou zobrazeny průběhy hladin. Průběhy hladin jsou čtyři a to pro výšky hladiny v nádrži 360.30 m n. m., která značí malé překročení výšky hladiny nad zásobním prostorem. Pak hladina a kótě 360.75, která ukazuje postup zvětšující se povodně. Dále hladina 361.35 m n. m., která je zároveň maximální povolenou hladinou a poslední je 362.60 m n. m., která je rovna s kótou koruny hráze a ukazuje tedy průběh hladiny při maximální možné hladiny bez přelití hráze. Řez je jeden podélný v ose bezpečnostního přelivu (obrázek 5.2), a tři příčné řezy. První příčný řez (obrázek 5.3) je udělaný 15 m od začátku přelivné hrany a ukazuje jak se bude hladina chovat v místě přelívání přes přeliv. Druhý řez (obrázek 5.4) je kousek za přelivnou hranou (35 m od začátku přelivné hrany) a zobrazuje chování hladiny těsně za koncem přelivné hrany. Poslední třetí řez (obr. 5.5) ukazuje stav hladiny kousek před místem, kde hladina přechází do kritického porudění. Řez je 55 m od začátku přelivné hrany. Zobrazení řezů je na obrázku 5.1.



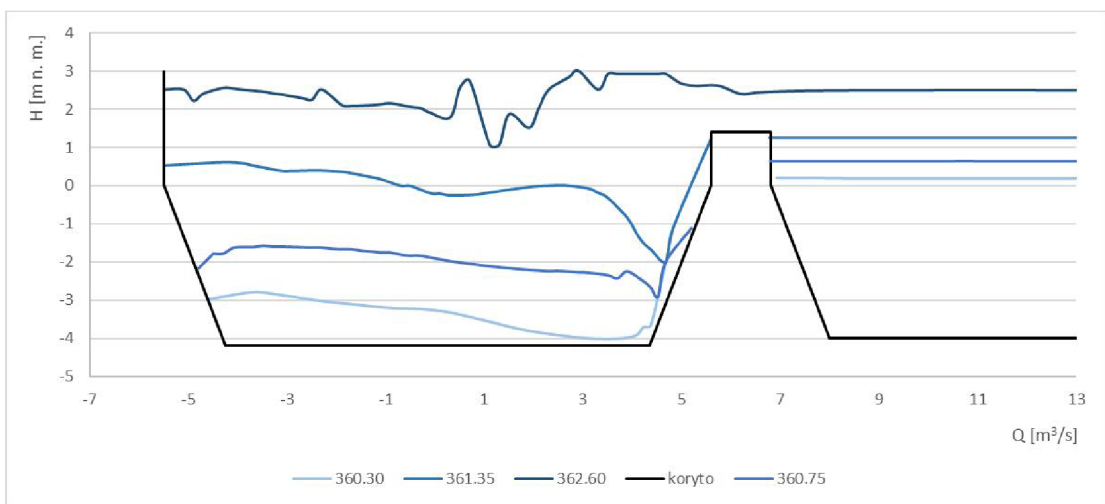
Obrázek 5.1: umístění řezů



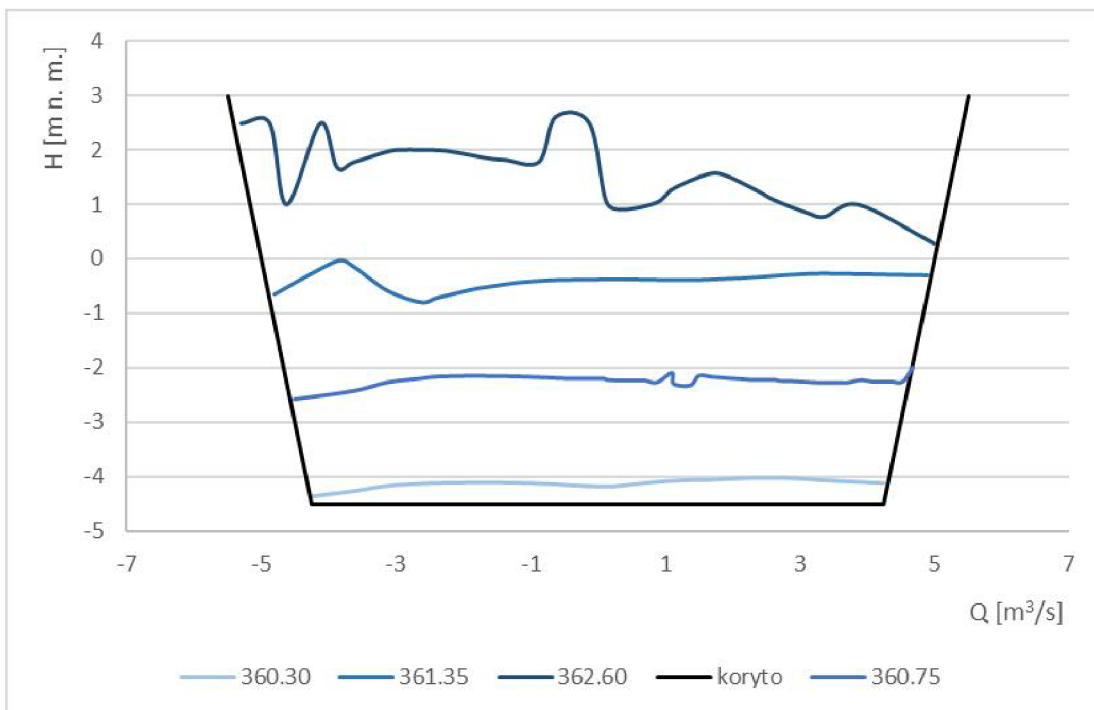
Obrázek 5.2: podélný řez



Obrázek 5.3: příčný řez - 15 m

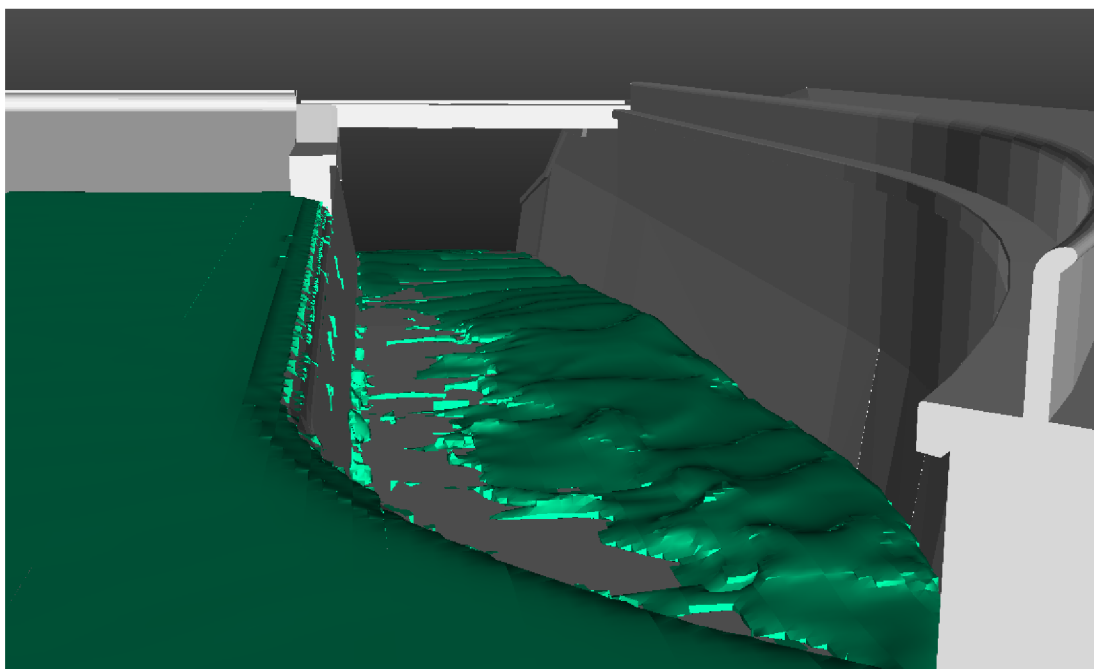


Obrázek 5.4: příčný řez - 35 m

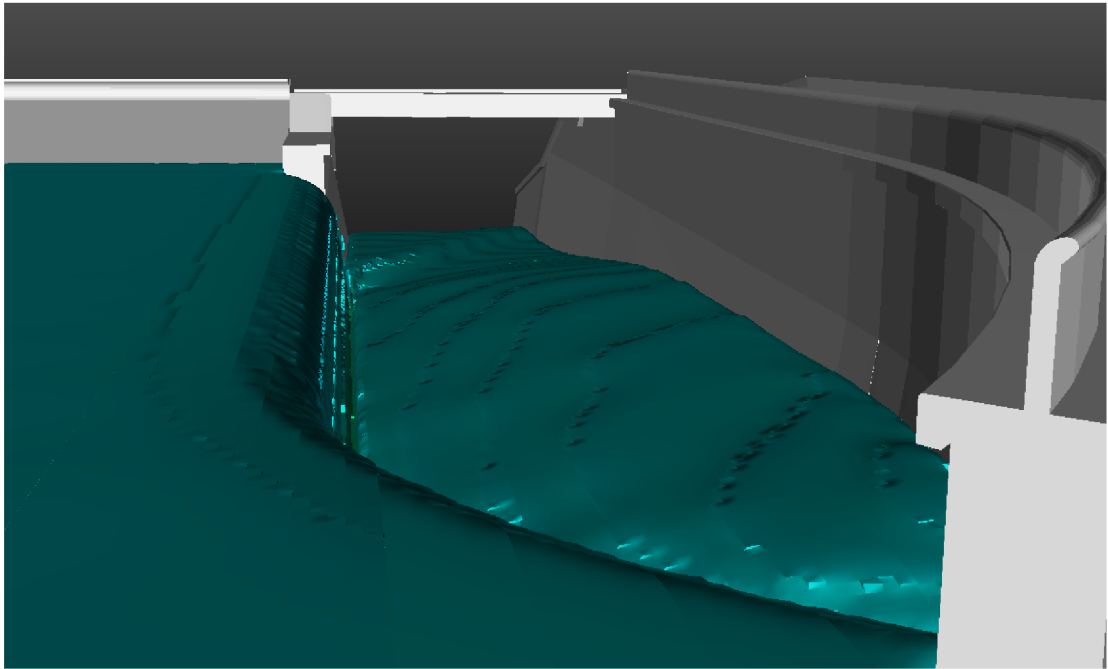


Obrázek 5.5: příčný řez - 55 m

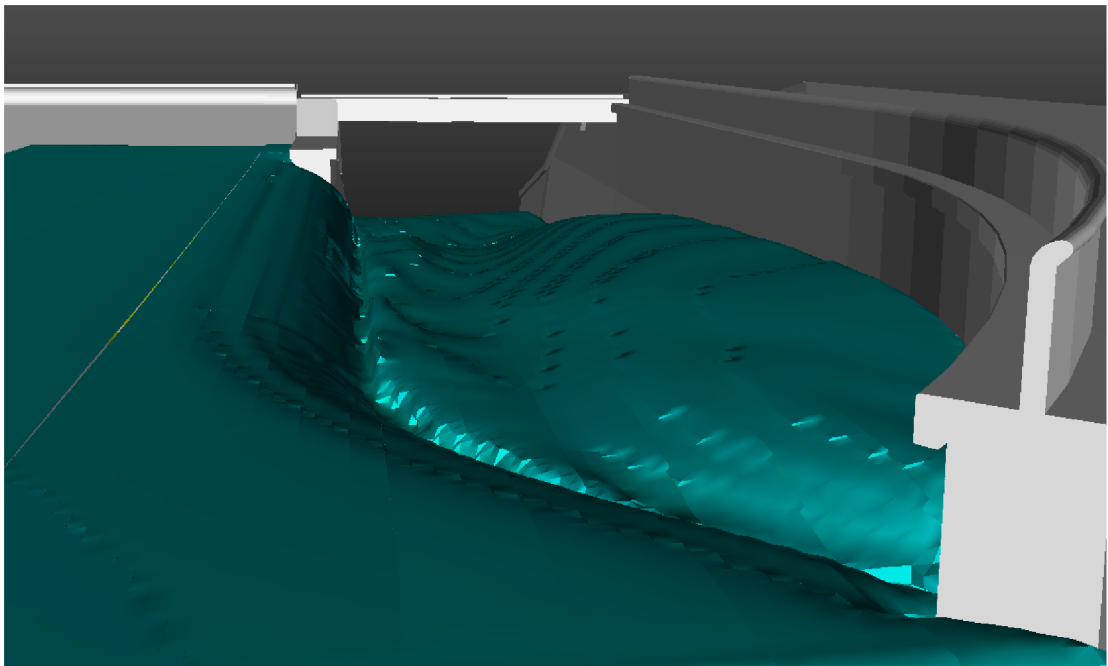
Jednotlivé hladiny zobrazeny v 3D modelu:



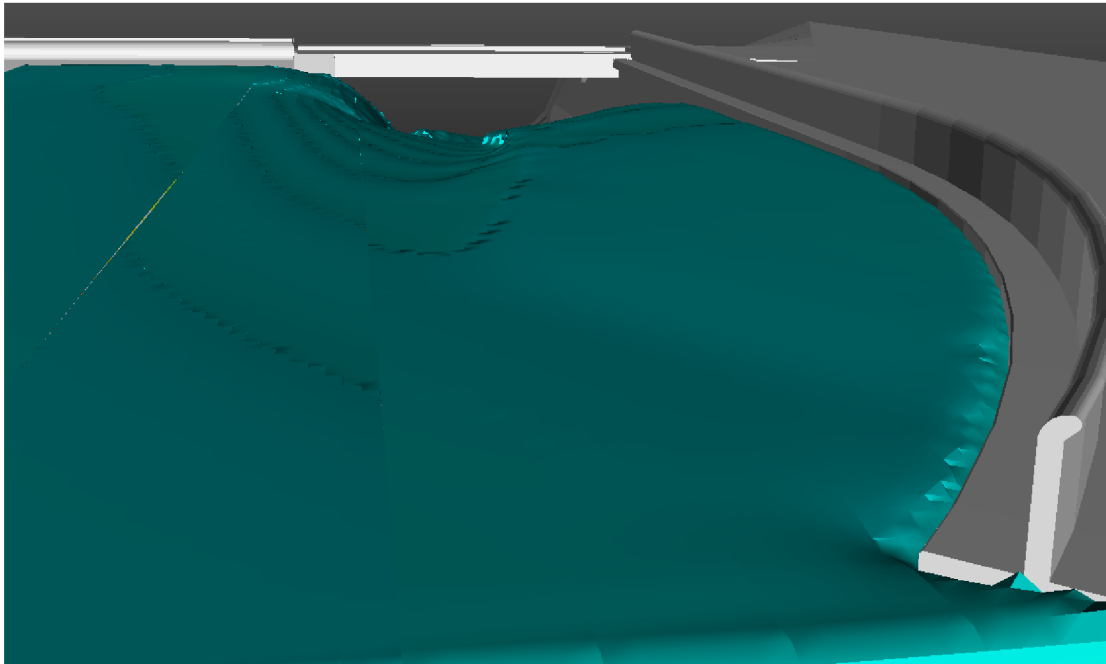
Obrázek 5.6: hladina 360.30 m n. m.



Obrázek 5.7: hladina 360.75 m n. m.

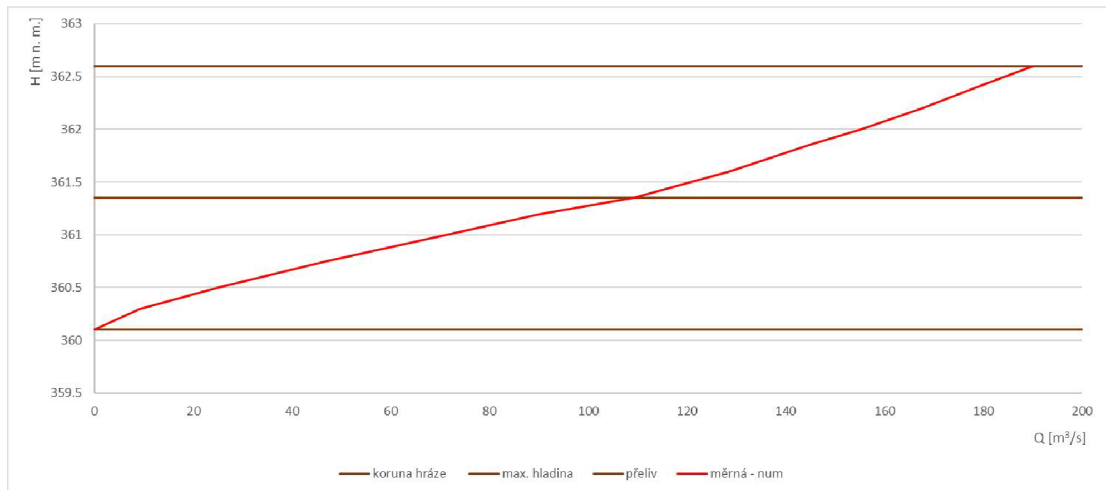


Obrázek 5.8: hladina 361.35 m n. m.



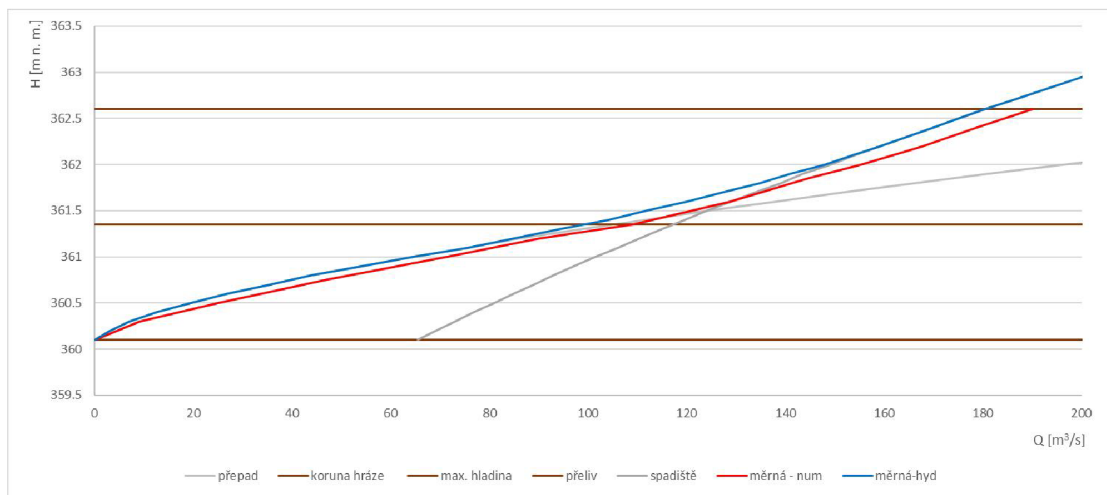
**Obrázek 5.9:** hladina 362.60 m n. m.

Dalším důležitým výsledkem je měrná křivka bezpečnostního přepadu na vodním díle Letovice. Měrná křivka je vytvořena z průtoků pro jednotlivé výšky hladin spočítané ve Flow 3D (4.4).



**Obrázek 5.10:** měrná křivka

Na dalším obrázku lze porovnat rozdíly s měrnou křivkou spočítanou numericky (4.4) a měrnou křivkou spočítanou dle hydraulických rovnic (2.2).



**Obrázek 5.11:** srovnání měrných křivek

## 6 Zhodnocení a závěr

Když se podíváme na obrázek 5.11, který porovnává měrné křivky, tak lze vidět že obě dvě měrné křivky jsou tvarem téměř totožné, ale pomalu se rozvírají a to převážně v horní části, kde voda ve spadišti ovlivňuje přepad. Nicméně se dá říct, že výpočet z numerického modelování potvrzuje výsledek měrné křivky z hydraulických výpočtů a ukazuje, že by mohla být skutečnost více kapacitní než-li ukazuje měrná křivka podle hydraulických výpočtů. Z toho vyplývá, že vypočtené hodnoty v hydraulických výpočtech přiložených k DUR [7] jsou správné a popřípadná nepřesnost je na stranu bezpečnou.

Rozdíly měrných křivek mohly být způsobeny zjednodušujícími předpoklady u obou výpočtů měrných křivek. Přesnější výsledků mohlo být dosaženo použitím jemnější výpočtové sítě při výpočtu.



## Seznam zkratk

BP	bezpečnostní přeliv
DN	průměr potrubí
DUR	dokumentace pro územní rozhodnutí
FAVOR	fractional area-volume obstacle representation
GIS	geografický informační systém
RNG	re-normalisation group
SO	stavební objekt
VD	vodní dílo
TBD	technicko-bezpečnostní dohled

## Seznam veličin

$\alpha$	Coriolisovo číslo [-]
$\delta_{ij}$	Kroneckerovo delta [-]
$\varepsilon$	disipace turbulentní energie na jednotku hmotnosti [ $J/kg/s$ ]
$\dot{\varepsilon}_v$	tenzor rychlosti objemového přetvoření [-]
$\dot{\varepsilon}_{ij}$	tenzor rychlosti přetvoření [-]
$\xi$	součinitel místních ztrát [-]D
$\lambda(\rho, T)$	koeficient objemového přetvoření [-]
$\mu$	výtokový součinitel [-]
$\mu(\rho, T)$	koeficient dynamické viskozity [-]
$\mu_t$	součinitel turbulentní viskozity [ $kg/m/s$ ]
$\rho$	hustota kapaliny [ $kg/m^3$ ]
$\sigma$	součinitel charakterizující sklon svahu v lichoběžníkovém korytě [-]
$\sigma_{\varepsilon, k}$	koeficient $k - \varepsilon$ modelu [-]
$\sigma_z$	součinitel zatopení [-]
$\sigma_{ij}$	symetrický tenzor napětí [-]
$\tau_{ij}^f$	tenzor viskózních napětí
$A$	průtočný průřez [ $m^2$ ]
$b$	šířka [ $m$ ]
$b_0$	účinná šířka [ $m$ ]
$c_{1\varepsilon, 2\varepsilon, \mu}$	koeficient $k - \varepsilon$ modelu [-]
$F_{bi}$	složka vektoru síly objemového zatížení [ $N$ ]
$f_i$	složka objemového zatížení na jednotku hmotnosti [ $m/s^2$ ]
$F_i$	složka vektoru síly [ $N$ ]
$F_{si}$	složka vektoru síly povrchového zatížení [ $N$ ]
$g$	gravitační zrychlení [ $m/s^2$ ]
$h$	výška [ $m$ ]
$h_{k0}$	kritická hloubka v obdélníkovém korytě [ $m$ ]
$h_{kr}$	kritická hloubka v lichoběžníkovém korytě [ $m$ ]
$H$	hladina vody v nádrži [ $m\ n.\ m.$ ]
$H_{př}$	kóta přelivné hrany bezpečnostního přelivu [ $m\ n.\ m.$ ]
$i_{kr}$	kritický sklon [-]
$I_d$	sklon dna spadiště [-]

$I_e$	sklon čáry energie [-]
$k$	koefficient místní ztráty víření dle Ven Te Chowa [-]
$k$	kinetická energie turbulence vztažená na jednotku hmotnosti [ $J/kg$ ]
$L$	délka přelivné hrany [ $m$ ]
$m$	součinitel přepadu [-]
$m_s$	poměr sklonů svahů v lichoběžníkovém korytě [-]
$m_k$	hmotnost kapaliny [ $kg$ ]
$n$	drsnost dle Manninga [-]
$n_z$	počet zúžení [-]
$O_k$	Omočený obvod [ $m$ ]
$p$	tlak [ $Pa$ ]
$\bar{p}$	součet střední hodnoty složky tlaku [ $Pa$ ]
$p'$	fluktační složka tlaku [ $Pa$ ]
$R_k$	kritický hydraulický poloměr [ $m$ ]
$S$	průtočná plocha [ $m^2$ ]
$S_k$	průtočná plocha kritické hloubky [ $m^2$ ]
$t$	čas [ $s$ ]
$u$	složka vektoru bodové rychlosti [ $m/s$ ]
$v$	rychlost [ $m/s$ ]
$v_{kr}$	kritická rychlost [ $m/s$ ]
$\bar{v}_i$	součet střední hodnoty složky rychlosti [ $m/s$ ]
$v'_i$	fluktační složka rychlosti [ $m/s$ ]
$q$	specifický průtok [ $m^2/s$ ],
$Q$	průtok [ $m^3/s$ ]
$Q_{10000}$	kulminační průtok 10 000 leté povodně [ $m^3/s$ ]

## Seznam obrázků

2.1	Ostrohranné přelivy [10]	3
2.2	Rozdělení dle typu konstrukce [10]	4
2.3	Rozdělení dle ovlivnění spodní vodou [10]	4
2.4	Rozdělení dle zúžení [10]	5
2.5	Rozdělení dle půdorysného tvaru [10]	5
2.6	Hydrogram povodní [7]	6
2.7	Měrná křivka [7]	9
3.1	Rovnice kontinuity - 1D	10
3.2	Rovnice kontinuity - 3D	11
3.3	střední rychlosti	15
3.4	Metoda sítí [12]	18
4.1	Potok Křetínka nad nádrží [14]	20
4.2	Situace [3]	21
4.3	Řez hrází [6]	22
4.4	Návodní líc [14]	22
4.5	Vzdušný líc [14]	23
4.6	Odběrný objekt [14]	24
4.7	Malá vodní elektrárna [14]	24
4.8	Stávající bezpečnostní přeliv [14]	25
4.9	Detail hrany přelivu [14]	26
4.10	Spadiště [14]	26
4.11	Dočasný BP varianta 1 [12]	27
4.12	Dočasný BP varianta 2 [12]	28
4.13	Půdorys bezpečnostního přelivu [6]	29
4.14	SketchUp [4]	30
4.15	SketchUp	31
4.16	Blender [1]	32
4.17	Blendr - oprava normál	33
4.18	Simulation Manager	34
4.19	General	35
4.20	Physics	35
4.21	Physics - jednotlivá nastavení	36
4.22	Fluids	37
4.23	Záložky v Meshing & Geometry	37
4.24	Levá část nastavení v Meshing & Geometry	38
4.25	Levá část nastavení v Meshing & Geometry	39
4.26	Rozdělení na jednotlivé meshe	40
4.27	Ukázka velikost a rozdělení meshů	41
4.28	Ukázka 3D a 2D výsledku	42
4.29	Ukázka modelu po použití metody Favor	43
4.30	Ukázka špatného modelu ve Favoru	43
5.1	umístění řezů	45
5.2	podélný řez	45
5.3	příčný řez - 15 m	46
5.4	příčný řez - 35 m	46
5.5	příčný řez - 55 m	47
5.6	hladina 360.30 m n. m.	47
5.7	hladina 360.75 m n. m.	48
5.8	hladina 361.35 m n. m.	48
5.9	hladina 362.60 m n. m.	49
5.10	měrná křivka	49
5.11	srovnání měrných křivek	50

## Seznam tabulek

3.1	Koeficienty $k - \varepsilon$ modelu [9]	17
3.2	Porovnání modelů	18
4.1	Porovnání hodnot [12]	28
4.2	Velikost meshe	40
4.3	Okrajové podmínky	41

## Literatura

- [1] *Blender*.  
URL <https://www.blender.org>
- [2] *Hlásná a předpovědní povodňová služba*.  
URL <http://hydro.chmi.cz>
- [3] *Mapy*.  
URL [www.mapy.cz](http://www.mapy.cz)
- [4] *SketchUp*.  
URL <https://3dwarehouse.sketchup.com>
- [5] *Wikipedia*.  
URL <https://cs.wikipedia.org>
- [6] Borecký, I. K.: *Výkresová dokumentace*. HG projekt s.r.o., 2016.
- [7] Glacn, I. F.: *Hydrotechnické výpočty, VD letovice*. HG partner s.r.o., 2016, dokumentace k územnímu rozhodnutí.
- [8] Holinka, B. M.: *Numerické modelování proudění v bezpečnostním objektu vodního díla*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb, Brno, 2017, 84 s., Diplomová práce, vedoucí práce doc. Ing. Jan Jandora, Ph.D.
- [9] Ing. Jaromír Řáha, C. a. k.: *Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevu*. Vysoké učení technické v Brně, 1997, ISBN 80-214-0827-8.
- [10] Jan Jandora, M. S., Vlastimil Stara: *Hydraulika a hydrologie*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2002, ISBN 80-214-2204-1.
- [11] Jandora, J.: *Matematické modelování ve vodním hospodářství*. Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2008, studijní opora.
- [12] Křivohlávek, B. R.: *Numerické modelování proudění v bezpečnostním přelivu vodního díla Letovice*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb, Brno, 2017, 66 s., Diplomová práce, vedoucí práce doc. Ing. Jan Jandora, Ph.D.
- [13] Povodí moravy s.p.: *Manipulační řád vodního díla Letovice na toku Křetínky v km 2,923*. 2009.
- [14] Šilkhánková, B. L.: *Autorka fotografií*. 2018.